

## AUTO SINTONIA UTILIZANDO MODELO ARMAX

A. U. A. JÚNIOR<sup>1</sup>, M. M. SILVA<sup>1</sup>, A. C. NASCIMENTO<sup>1</sup>, H. BISPO<sup>1</sup> e J. N. SILVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química  
E-mail para contato: nilton@deq.ufcg.edu.br

**RESUMO** – Este trabalho apresenta um método de auto-sintonia de controladores PID (*Proporcional, Integral e Derivativo*), utilizando o modelo ARMAX (*AutoRegressive Moving Average with eXogeneous variable*) junto ao método relé para a estimação dos parâmetros de sintonia. Tal procedimento foi implementado em plataforma VBA (*Visual Basic for Application*), para controle de uma coluna de destilação numa unidade de tratamento de nafta modelada em *Aspen Dynamics*®, a mesma previamente validada com dados reais de planta. Para estimação *on-line* dos parâmetros do modelo ARMAX foi utilizado o método dos mínimos quadrados estendido com predição de erros. Aplicando um estímulo no modelo ARMAX a partir do relé, os parâmetros de ganho final e período final puderam ser calculados, o que possibilitou a obtenção dos parâmetros de sintonia em malha fechada de acordo com as equações clássicas de sintonia de Ziegler-Nichols. A estratégia utilizada para correção *on-line* dos parâmetros dos controladores apresentou desempenho satisfatório na malha de pressão quanto à redução do efeito de distúrbio na planta e modificação do ponto de operação.

### 1. INTRODUÇÃO

Controlar um processo significa atuar no mesmo com o intuito de obter resultados desejados dentro de limites de tolerância. Sempre que houver um distúrbio ou variação de carga no processo, a variável controlada deve retornar ao ponto de operação estabelecido, dentro do tempo prescrito e com um erro limitado. O controlador é o elemento que executa o algoritmo de controle e é capaz de detectar os erros infinitesimais entre o valor da variável de processo e o ponto de ajuste e, responder, instantaneamente, de acordo com os modos de controle e seus ajustes. O uso de controladores é necessário para manter o processo sob controle. Neste campo, controladores PID possuem expressiva aplicação devido à sua metodologia simples e bastante difundida no setor industrial.

Para manter o bom funcionamento do controle de um processo, no entanto, é necessária a sintonia correta dos controladores a fim de que as especificações do *set-point* sejam alcançadas para as variáveis controladas. Desde as técnicas pioneiras propostas por Ziegler-Nichols em 1942, uma vasta quantidade de pesquisas foi desenvolvida neste setor. Com base nas técnicas de sintonia de Ziegler-Nichols, estudos introduzidos por Åström e Hägglund (1984) propuseram a metodologia de sintonia automática de controladores.

A auto-sintonia de controladores é capaz de reajustar automaticamente os parâmetros de sintonia de controladores do processo. É reconhecido que na prática muitos controladores industriais são insatisfatoriamente sintonizados e, por esta razão, as técnicas de sintonia automática têm recebido cada vez mais atenção dos pesquisadores e engenheiros de controle.

Neste sentido, a auto-sintonia é uma área bastante promissora e que tem uma grande oportunidade de aplicação em diversos processos químicos com o intuito de melhorar a controlabilidade destes.

Este trabalho tem como objetivo implementar um sistema de auto-sintonia de controladores do tipo PID, utilizando o modelo auto-regressivo ARMAX como modelo do processo. Para testar o sistema de auto-sintonia proposto, uma unidade de tratamento de nafta foi utilizada, sendo a mesma modelada na plataforma *Aspen Dynamics®*, previamente validada com dados reais de planta.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Auto-sintonia

Em 1942, Ziegler e Nichols sugeriram duas abordagens para ajustar os parâmetros de um controlador PID. O primeiro método, o método da malha fechada, baseia-se em testar a planta com o controlador PID, por tentativa e erro até serem determinados os parâmetros de ganho final e período final para posterior cálculo dos parâmetros de sintonia. O segundo é em malha aberta e análise realizada a partir da curva de reação do processo assumido como sendo de primeira ordem (SILVA, 2013).

Åström e Hägglund (1988) identificaram as limitações da metodologia pioneira de sintonia proposta por Ziegler-Nichols e a aperfeiçoaram propondo metodologia de auto-sintonia através de um ensaio de identificação do ponto crítico utilizando um relé realimentado. Dentre as principais vantagens da metodologia proposta destacam-se: a simplicidade de realização do ensaio, a rapidez na sintonia reduzindo custos de projeto e principalmente o fato do método operar em malha fechada não interferindo de forma muito significativa na rotina do processo que se deseja controlar. Diante de tais vantagens e percebendo a potencialidade da auto-sintonia, diversos pesquisadores têm desenvolvido pesquisas buscando melhorar o método proposto.

A estratégia clássica de auto-sintonia proposta em estudos desenvolvidos por Åström (1996) é realizada com o relé ligado ao processo conforme demonstrado na Figura 1, onde o mesmo substitui um controlador PID, o qual estimula o processo. A grande desvantagem dessa estratégia é que o processo não permanece controlado durante o tempo de ajuste. Assim, pode acarretar prejuízos ao processo pelo fato do sistema poder operar fora dos limites de segurança das condições operacionais de equipamentos, assim também como a qualidade do produto final pode apresentar características insatisfatórias para as especificações do processo, e, assim, gerar prejuízo financeiro.

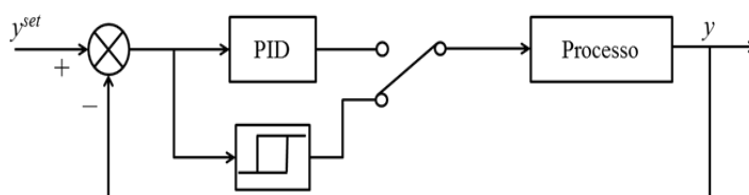


Figura 1 – Estratégia clássica de auto-sintonia.

Para superar esta dificuldade uma pequena modificação foi considerada por Silva (2013), em que ao invés de substituir o controlador, o relé estimula o modelo identificado trabalhando em paralelo ao processo. Essa metodologia modificada faz com que o relé esteja simultaneamente com a ação do controlador PID. Verifica-se na Figura 2 a estrutura detalhada adotada por Silva (2013) para a geração automática dos parâmetros de sintonia para o controlador PID em paralelo com a execução do processo. O diferencial das modificações é a etapa de identificação do processo por método recursivo e estimação pelo modelo ARMAX, com isso permitindo o ajuste dos parâmetros de sintonia do controlador, com este em operação durante todo o procedimento.

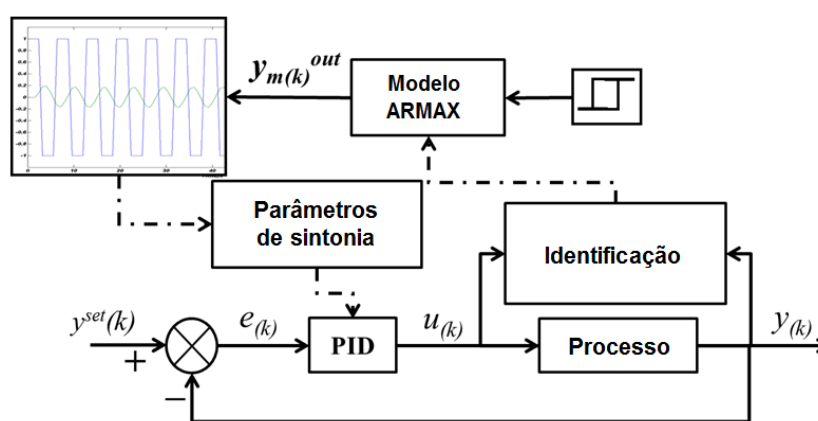


Figura 2 – Estrutura de auto-sintonia modificada.

## 2.2 Modelagem do processo

A modelagem matemática de sistemas é uma metodologia muito comum em ciência e na engenharia devido a sua importância para extrair conhecimento sobre sistema por meio de simulações. No presente trabalho aplicou-se o modelo ARMAX (Modelo Auto-regressivo com média móvel e entrada exógena), conforme apresentado na Equação 1.

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + C(q)e(t) \quad (1)$$

O modelo geral utilizado para representar a relação entre a entrada e saída do sistema com aplicação da média móvel à perturbação é dado por:

$$y_{(t)} + a_1 y_{(t-1)} + a_2 y_{(t-2)} + \dots + a_{n_a} y_{(t-n_a)} = b_1 u_{(t-1)} + b_2 u_{(t-2)} + \dots + b_{n_b} u_{(t-n_b)} + c_1 e_{(t-1)} + c_2 e_{(t-2)} + \dots + c_{n_c} e_{(t-n_c)} + e(t) \quad (2)$$

Para a determinação dos parâmetros do modelo ARMAX foi considerado um vetor parâmetros ( $\theta$ ), conforme apresentado na Equação 3.

$$\theta = [a_1, a_2, \dots, a_{n_a}; b_1, b_2, \dots, b_{n_b}; c_1, c_2, \dots, c_{n_c}]^T \quad (3)$$

Além disso, foi inserido um vetor regressão para armazenar a variável de saída, variável de entrada e desvio do processo. Este vetor segue expresso na Equação 4.

$$\varphi(t, \theta) = [-y_{t-1}, -y_{t-2}, \dots, -y_{t-n_a}; u_{t-1}, u_{t-2}, \dots, u_{t-n_b}; e_{(t-1, \theta)}, e_{(t-2, \theta)}, \dots, e_{(t-n_c, \theta)}]^T \quad (4)$$

Assim, pode ser calculado o vetor  $\hat{y}(t/\theta)$ , que representa o valor preditivo da variável de saída ( $y$ ) no instante  $t$  utilizando o vetor parâmetros  $\theta$ . A correlação para a determinação desse vetor segue apresentada na Equação 5.

$$\hat{y}(t/\theta) = \varphi_{(t, \theta)}^T \theta \quad (5)$$

Para a determinação do vetor  $\theta$  aplicou-se o algoritmo dos mínimos quadrados recursivo conforme proposto por Ljung e Söderström (1983) e Holst (1977). O método dos mínimos quadrados é comumente usado no sistema de identificação. Seu princípio é que o parâmetro desconhecido de um modelo matemático deve ser escolhido por minimização da soma dos quadrados da diferença entre os valores observados e os valores de saída. Assim, os parâmetros estimados com uso do algoritmo mínimos quadrados recursivo ( $\theta^*$ ) pode ser expresso, conforme apresentado na Equação 6, por:

$$\theta^* = [\varphi_{(t)}^T \varphi_{(t)}]^{-1} \varphi_{(t)}^T y_{(t)} \quad (6)$$

A ideia fundamental da estimação é a comparação da resposta observada do sistema ( $y(t)$ ) com a saída do modelo parametrizado ( $\hat{y}(t/\theta)$ ) cuja estrutura é a mesma que a do modelo da planta. Em seguida, as estimações dos parâmetros ( $\theta^*$ ) são ajustadas de modo contínuo de tal forma que ( $\hat{y}(t/\theta^*)$ ) se aproxima de ( $y(t)$ ) à medida que a quantidade amostral aumenta.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Coluna depentanizadora de nafta

Uma unidade de tratamento de nafta foi utilizada no presente trabalho, sendo a mesma modelada na plataforma *Aspen Dynamics®*, previamente validada com dados reais de planta de uma indústria. Para avaliar a estrutura da auto-sintonia proposta neste trabalho, uma coluna de destilação depentanizadora foi considerada, como mostrado no diagrama simplificado na Figura 3.

A coluna adotada para o estudo é constituída por 37 estágios, com uma carga de alimentação média de  $57,55 \text{ t h}^{-1}$ , composta de C1 a C11 de compostos parafínicos e aromáticos mais representativos da carga real do processo. A finalidade desta coluna é separar os componentes maiores que C5 na corrente de base e os menores e iguais a C5 na corrente de destilado.

A corrente de produto de topo, identificada como 454, é composta de 0,998 de hidrocarbonetos até o C5. A corrente do produto de base, identificada como 471, é composta de 0,999 de hidrocarbonetos maiores que o C5.

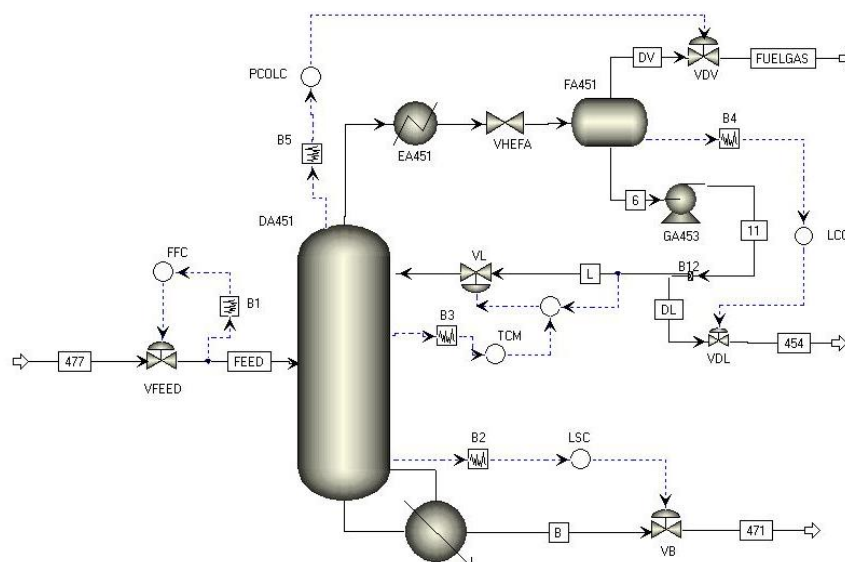


Figura 3 – Fluxograma da coluna de destilação e malhas de controle no *Aspen Dynamics®*.

### 3.2 Algoritmo do sistema de auto-sintonia

A partir da planta implementada na plataforma *Aspen Dynamics®*, a conexão com VBA foi realizada utilizando a tecnologia de comunicação *Object Linking and Embedding* (OLE). Dessa forma, a estimação dos parâmetros para o modelo ARMAX e a auto-sintonia foram programados em VBA considerando o algoritmo simplificado representado na Figura 4.

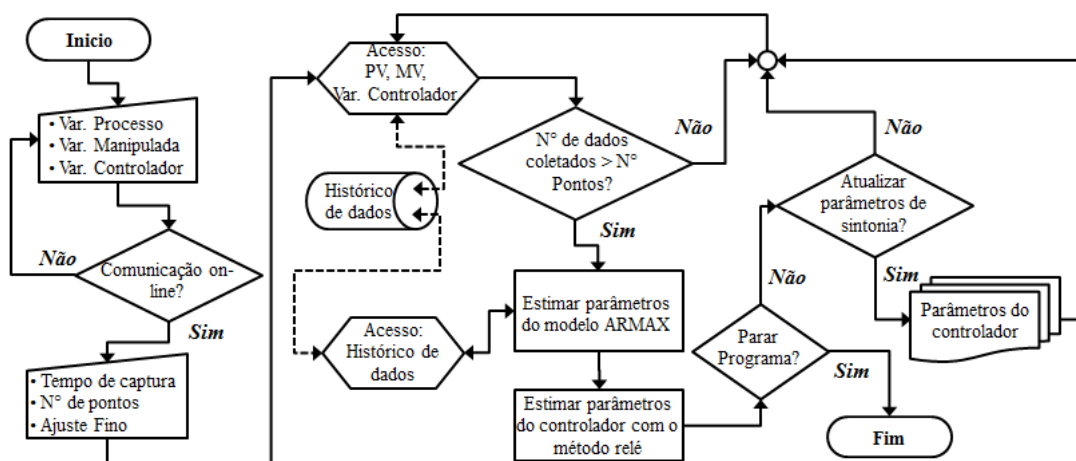


Figura 4 – Algoritmo simplificado do programa de auto-sintonia desenvolvido no VBA.

Inicialmente ocorre a entrada manual das variáveis de processo, manipulada e do controlador a serem analisadas para a malha de controle. A partir da definição dos parâmetros de tempo de captura, número de pontos e ajuste fino desejados, inicia-se o acesso às variáveis PV, MV e *set-point*, sendo continuamente armazenado como histórico de dados. Quando a

quantidade de pontos coletados for superior à quantidade de pontos determinados, com acesso ao histórico de dados, será iniciado o processamento de estimação dos parâmetros pelo modelo ARMAX com uso do método dos mínimos quadrados recursivos.

Após essa etapa, utiliza-se o método do relé onde são estimados os parâmetros de sintonia do controlador PID. Ao longo do processo pode ser observado o comportamento da variável de processo simulada no Aspen Dynamics®, a variável estimada pelo modelo e o *set-point*. Além disso, podem ser conferidas as modificações da variável manipulada, desvio entre valores estipulados pelo modelo e valores simulados e a determinação dos parâmetros  $a$ ,  $b$  e  $c$  do modelo ARMAX.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A metodologia apresentada foi aplicada nas malhas de temperatura, de vazão e de pressão. A seguir estão apresentados os resultados referentes à malha de pressão. Os resultados observados com a malha de pressão foram similares às demais malhas.

### 4.1 Aplicação da ferramenta de auto-sintonia na malha de pressão

Aplicando-se a estimação dos parâmetros do modelo ARMAX na malha de controle da pressão (PCOLC), verificou-se o comportamento no Aspen Dynamics® e a variável de processo estimada pelo modelo. Avaliou-se esse comportamento sem e com a aplicação da ferramenta de auto-sintonia e os mesmos são apresentados na Figura 5(a) e 5(b).

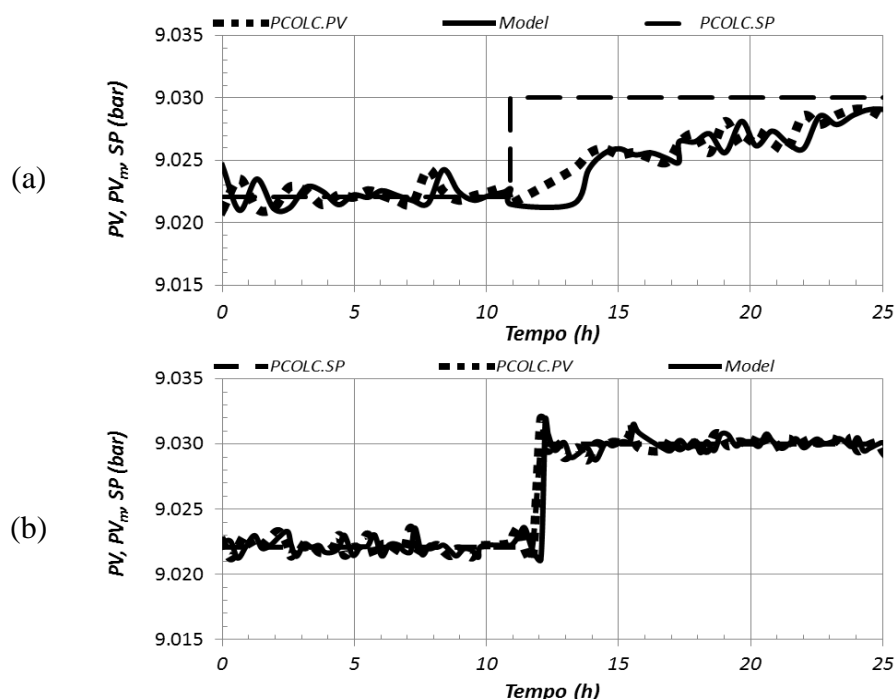


Figura 5 – Comportamento da variável de processo para malha de controle de pressão (a) sem auto-sintonia e (b) com aplicação da auto-sintonia.

A estratégia de controle padrão dos parâmetros de sintonia do controlador PID proposta pelo *Aspen Dynamics®* não foi eficiente e apresentou uma resposta muito lenta e instável. O modelo, por sua vez, apresentou diferença maior em relação à PV simulada logo após o distúrbio no processo, porém foi capaz de mostrar comportamento semelhante ao simulado posteriormente. Ao aplicar a ferramenta de auto-sintonia o desempenho foi melhor, observando uma resposta mais rápida e mais estável.

Além disso, avaliou-se o desvio entre o valor da variável de processo simulada no *Aspen Dynamics®* e a variável estimada pelo modelo ARMAX, conforme mostrado na Figura 6. Verifica-se que o procedimento de estimação do modelo visa minimizar a diferença entre o modelo e o processo. Um desvio maior foi observado logo após o distúrbio, sendo em seguida minimizado.

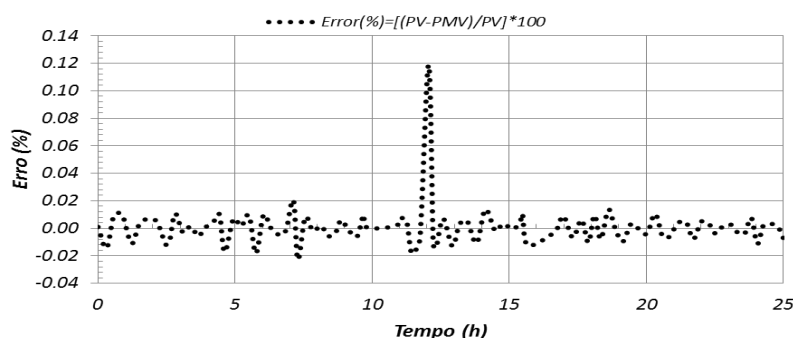


Figura 6 – Desvio entre a variável de processo simulada e variável estimada pelo modelo ARMAX para malha de controle de pressão.

Os parâmetros (*a*, *b* e *c*) do modelo ARMAX foram obtidos e seguem expressos na Figura 7. Alterações mínimas foram observadas para os parâmetros *a* e *b*, sendo a modificação mais acentuada no parâmetro *c* após ser inserido distúrbio, e, posteriormente, esse comportamento foi suavizado. Tais variações mostram que os mesmos são ajustados com o funcionamento do processo.

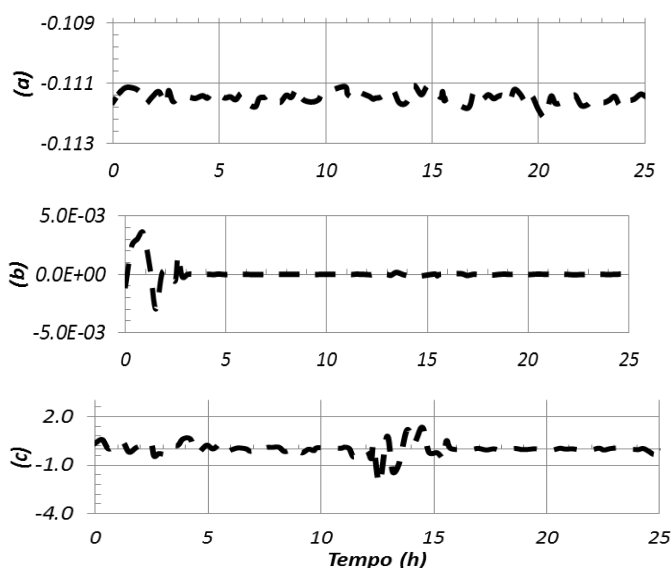


Figura 7 – Parâmetros do modelo ARMAX processo para malha de controle de pressão.



O comportamento do posicionamento da válvula da corrente de destilado vapor, considerado como a variável manipulada, ao longo do processo é apresentada na Figura 8. Após a perturbação no processo ocorreu um fechamento da válvula da corrente de destilado vapor para tentar controlar a pressão da coluna. Após esse instante, verificaram-se mudanças em torno de 1% no posicionamento do elemento final de controle para esta malha analisada.

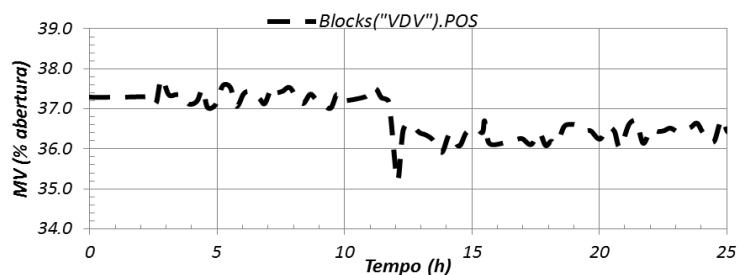


Figura 8 – Comportamento do posicionamento da válvula da corrente de destilado vapor.

## 4.2 Índice de desempenho

Para quantificar o erro ocorrido em função de uma perturbação utilizam-se critérios baseados na integral do erro. Dentre os índices baseado nos erros, utilizou-se o ITAE. Sem a auto-sintonia, o valor do ITAE foi de 1,43, enquanto que ao utilizar a ferramenta de auto-sintonia o valor obtido foi de 0,482, correspondendo a uma redução 66,29%. Tal redução evidencia o bom desempenho do sistema de atualização automática dos parâmetros de sintonia proposto.

## 5. CONCLUSÃO

O método do ARMAX apresentou resultados satisfatórios ao analisar o comportamento real do processo com o estimado pelo modelo. A ferramenta de auto-sintonia apresentou desempenho melhor quando comparado sem o ajuste automático dos parâmetros do controlador, e comprovou ser uma técnica bastante promissora.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T., Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins, *Automatica*, v. 20, p. 645, 1984.
- ÅSTRÖM, K. J., **Tuning and Adaptation**, IFAC 13<sup>th</sup> Triennial World Congress, San Francisco, USA, p. 1-18, 1996.
- HOLST, J., **Adaptive Prediction and Recursive Estimation**, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Sweden, 1977.
- LJUNG, L.; SÖDERSTRÖM, T., **Theory and practice of recursive identification**, The MIT Press (Cambridge - Massachusetts), 1983.
- SILVA, J. N., **Determinação da região robusta de estabilidade e de desempenho inspirada nos princípios da estatística clássica**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, 2013.