

SISTEMA INTELIGENTE DE SINTONIA DE CONTROLADOR PID PARA CONTROLE DE NÍVEL DE UM DESTILADOR DE ÁGUA COM ALIMENTAÇÃO CONSTANTE

Claudionor Ferreira Pereira Junior ⁽¹⁾ (claudionor.fpj@gmail.com), Álvaro José da Silva Costa ⁽²⁾ (costaalvaro96@gmail.com), Hilton Seheris da Silva Santos ⁽³⁾ (hiltonseheres@hotmail.com), José Ribamar Ribeiro Silva Júnior (juniorjrjsj@gmail.com)

⁽¹⁾ Universidade Federal do Maranhão; CCEM

⁽²⁾ Universidade Federal do Maranhão; CCEM

⁽³⁾ Universidade Federal do Maranhão e Universidade Estadual do Maranhão; CCEM

⁽⁴⁾ Universidade Estadual do Maranhão; CCT

RESUMO: *O presente trabalho traz um método de sintonia do controlador PID baseado em inteligência artificial para gerenciar uma planta de destilação com maior eficiência e sem desperdício de água. Gerando desta forma mecanismos de alta eficiência, baixo consumo de energia e baixo custo operacional. A rede neural artificial é usada como mecanismo de ajustes dos parâmetros do controlador PID. O sinal de erro gerado do controle alimenta a rede neural artificial para atualização dos pesos, para não desperdiçar água do destilador. O controlador é usado para rejeitar as incertezas dos modelos de processo, resistir aos efeitos das perturbações e melhorar o desempenho de um processo, como o destilador. O destilador de água com a alimentação constante é utilizado como parte da planta para aplicação do sistema de controle inteligente. O sistema de controle baseado na sintonia inteligente apresentou resultados satisfatórios e mostrou-se eficiente em termos das respostas do sistema em nível de controle e ao mesmo tempo ganhou uma eficiência energética, evitando o desperdício de água no processo de destilação.*

PALAVRAS-CHAVE: Destilador, controle PID, inteligência artificial, sintonia do controlador e redes neurais artificiais.

INTELLIGENT PID CONTROLLER TUNING SYSTEM FOR LEVEL CONTROL OF A WATER DISTILLER WITH CONSTANT FEEDING

ABSTRACT: *The present work brings a method of tuning of the PID controller based on artificial intelligence to manage a distillation plant with greater efficiency and without waste of water. Generating in this way high efficiency mechanisms, low power consumption and low operational cost. The artificial neural network is used as a mechanism for adjusting the parameters of the PID controller. The control generated error signal feeds the artificial neural network to update the weights, not to waste water from the distiller. The controller is used to reject the uncertainties of process models, resist the effects of disturbances and improve the performance of a process, such as the distiller. The water distiller with the constant feeding is used as part of the plant for the application of the intelligent control system. The intelligent tuning-based control system presented satisfactory results and proved to be efficient in terms of control-level system responses and at the same time gained energy efficiency, avoiding waste of water in the process of distillation.*

KEYWORDS: Distiller, PID control, artificial intelligence, controller tuning and artificial neural network.



1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da economia e da sociedade, a escassez mundial de recursos hídricos tem crescido, especialmente nos países costeiros e regiões que possuem elevada densidade populacional. Nesse cenário, a demanda do mercado está promovendo o desenvolvimento de tecnologias que trabalhem com maior eficiência e sem desperdício de água. Gerando assim, formas mecanismos de alta eficiência, baixo consumo de energia e baixo custo operacional.

De forma geral, os controladores são usados para rejeitar as incertezas dos modelos, resistir aos efeitos das perturbações e melhorar o desempenho do processo, além de controlar as variáveis do sistema de destilação de água com alimentação constante. Já os controladores PI e PID são amplamente utilizados para o controle de sistemas em plantas dinâmicas do mundo real. Em relação à sintonia destes controladores, sua estrutura não depende, em geral, dos valores particulares dos parâmetros do modelo da planta. Eles são aplicados em sistemas de controle de níveis para obter um desempenho dos parâmetros do processo e atender às especificações de projeto.

Com a finalidade de ajudar o operador a sintonizar os parâmetros do controlador corretamente e com pequeno esforço, tem-se as conhecidas fórmulas de Ziegler e Nichols (1942), e um grande número de regras de sintonia que foram criadas nas últimas décadas como visto em Åström et al (2001), O'dwyer (2009).

É interessante apontar que as redes neurais artificiais (RNA) tem se distinguido como uma significativa ferramenta de aprendizagem utilizada para a execução de tarefas complexas, tais como a obtenção de aproximações não-lineares e controle de sistemas dinâmicos. Uma prova dessa importância é vista em artigos da década de 90 como Narendra e Parthasarathy (1990), Sastry et al. (1994), Arahalet al. (1998), e mais recentes como Arinton et al. (2012). Tem-se a implantação de sistemas inteligentes embarcados para resolver o problema de sintonia dos parâmetros dos controladores PID's.

Este trabalho visa obter um sistema inteligente de sintonia de controlador PID para controle de nível de um destilador de água com alimentação constante, para aumentar sua eficiência em purificação de água e energia elétrica.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O equipamento destinado a implantação do sistema de controle inteligente é um destilador de água com alimentação constante (Figura 1). Este equipamento é constituído da

vazão de alimentação (seta 1), vazão de despejo, esgoto (seta 2) e, por fim, vazão de produto, água destilada, (seta 3). Ademais, o equipamento realiza a destilação da água, oriunda de alimentação externa.

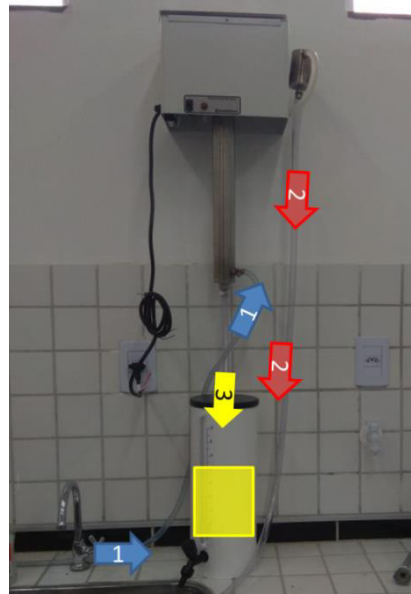


FIGURA 1. Destilador de água com alimentação constante. Fonte: Autoria Própria (2018).

O esquema detalhado mostrando os componentes que constituem o destilador de água com alimentação constante é ilustrado na Figura 2. Esse sistema é composto por uma válvula, uma bomba, um reservatório, um tanque e um destilador. A válvula tem a função de liberar a vazão a ser controlada diretamente no tanque. A este tanque, está associada uma bomba que transporta a água ao destilador. Neste, há duas saídas: a primeira é da água destilada que é direcionada ao reservatório; e a segunda é da água que não foi destilada e retorna ao tanque. Com relação aos componentes:

Válvula - Dispositivo utilizado para controlar a vazão de fluxo e a entrada deste no sistema;

Bomba - Dispositivo utilizado para fazer o fluido ir para determinada direção. No caso, leva a água ao destilador;

Reservatório e tanque - São recipientes para armazenamento de líquidos. Para haver uma diferenciação nesse artigo, o nome reservatório identifica o recipiente que armazena a

O destilador de água com alimentação constante é alimentado com uma vazão de água proveniente de uma fonte externa que se divide em produto e esgoto (água de resfriamento que vai para o meio ambiente). O processo é responsável pela produção de água destilada, enquanto o esgoto, ou seja, a água que é desperdiçada e equivale a 91%. Para reaproveitar toda água do esgoto tem-se um reservatório (2) para armazenar esta água. A saída do reservatório é constituída por uma bomba de vazão constante (5). A saída da bomba substitui a alimentação externa para o destilador. Com relação à alimentação externa, esta é controlada por uma eletroválvula que alimenta o reservatório. A eletroválvula é controlada por um controlador PID com sintonia inteligente. A saída deste reservatório substitui a alimentação do destilador com alimentação constante.

No processo supracitado, o sistema inteligente de sintonia para controlador PID opera objetivado a melhorar o controle de nível do reservatório. Ressalta-se que o principal componente é o destilador que atua com um nível constante. Com isso é preciso que haja uma vazão de entrada controlada, conforme os parâmetros do destilador.

3. MODELAGEM DO SISTEMA DINÂMICO

Nesta seção, descreve-se as equações do sistema fluido para aplicação do modelo proposto. De modo que se obtenha uma compreensão do modelo de sistemas, o que ajudará a avaliar o sistema de destilador de água com alimentação, no processo. Define-se ao longo desta seção os parâmetros do sistema dinâmico de nível.

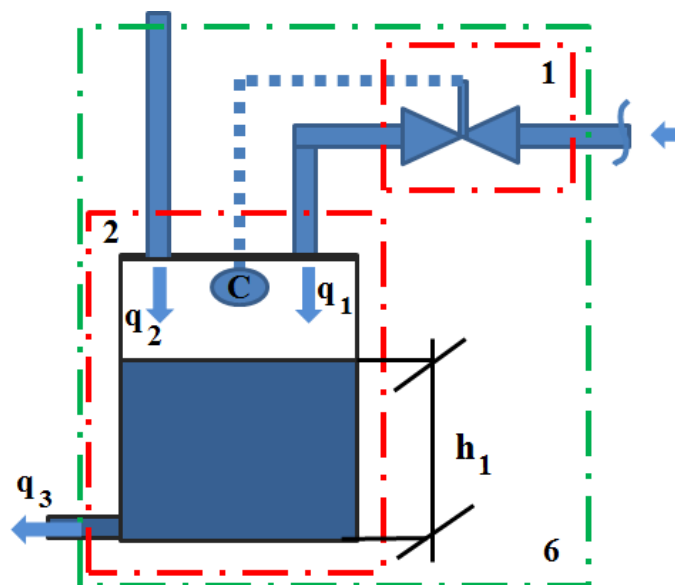


FIGURA 3. Volume de Controle do reservatório. Fonte: Autoria Própria (2018).



O destilador de água com alimentação constante (SD), mostrado na Figura 2 tem o subsistema composto pelo tanque, representado pelo volume de controle ilustrado na Figura 3. A água do subsistema é considerada como fluido incompressível e, de forma similar aos sistemas elétricos, a modelagem desponta-se um agregado de componentes passivos, incluindo resistência, capacitância e indutância. No caso de fluidos incompressível, o volume de fluido permanece constante.

As definições gerais para o fluido do sistema de destilação são tratadas pela equação da continuidade, a lei da conservação da massa que pode ser vista nos autores Cengel (2014), Bergman et al. (2015), Nakayama (2018), Munson et al. (2014), Pecanha (2014). Para a vazão mássica em uma tubulação isolada tem-se,

$$q_m = \rho q \quad (1)$$

$$m = \int \rho q dt \quad (2)$$

$$q = q_i - q_o \quad (3)$$

Onde, m , ρ , q_m são a massa, a densidade e a vazão mássica do fluido. A relação de entrada e saída do volume de controle, para um caso genérico, é dado por q_i e q_o que representa a vazão mássica de entrada e saída do fluido, respectivamente. E por definição das equações da conservação da massa, tem-se a relação de volume dada por,

$$\frac{dm}{dt} = \rho q = \frac{d(M_{vc})}{dt} = \frac{d(\rho V)}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{dm}{dt} = \rho \dot{V} + V \dot{\rho} \quad (5)$$

Onde, M_{vc} e V são respectivamente, a massa e o volume de controle, de forma que a expressão matemática da vazão mássica é dada por,



$$\dot{m} = \rho \dot{V} \quad (6)$$

Compreende-se que os componentes do sistema do destilador são conceituados conforme as variáveis se comportam no modelo para controle de nível.

Para o sistema de destilação e o balanço de massa no volume de controle no tanque, subsistema 6, tem-se as seguintes equações,

$$\dot{m}_{\text{tanque}} = \dot{m}_{\text{entrada}} - \dot{m}_{\text{saída}} \quad (7)$$

Onde, m_{tanque} , m_{entrada} e $m_{\text{saída}}$ representam a massa de água acumulada no tanque, massa de água que entra no subsistema (água do esgoto mais água de alimentação) e massa de água que deixa o volume de controle, respectivamente. A aplicação de manipulações algébricas tem a equação dada por,

$$\left(\rho A \frac{dh}{dt}\right)_{\text{tanque}} = \rho \dot{q}_{\text{entrada}} - \rho \dot{q}_{\text{saída}} \quad (8)$$

Cita-se que variáveis \dot{q}_{entrada} e $\dot{q}_{\text{saída}}$ são definidas como vazão de entrada e vazão de saída, na devida ordem. Além disso, as variáveis relacionadas às vazões de entrada e saída do volume de controle são incorporadas na modelagem do sistema de controle projetado. A relação de vazão fornecida pelo fabricante é dada por,

$$\dot{m}_{\text{saída}} = \dot{m}_{\text{esgoto}} + \dot{m}_{\text{válvula}} \quad (9)$$

$$(22) = (20) + q_{\text{válvula}} \quad (10)$$

A Equação 10 representa uma relação de 22l de água que deixa o tanque e será enviada ao destilador. A relação de água que deixa o destilador e entra no tanque (subsistema 6) é 20l. Nesta equação enuncia-se a variável controlada representada por $q_{\text{válvula}} = q_{\text{alimentação}}$. A respeito da vazão de saída corresponde à vazão da bomba e a vazão de entrada, esta é dada através da



soma da vazão de esgoto com a vazão de alimentação. A relação das vazões do subsistema, em fração é dada por,

$$Q_{bomba} = Q_{esgoto} + Q_{alimentação} \quad (11)$$

Considerando os requisitos do fabricante, através de ponderações, tem-se a relação dada por,

$$Q_{bomba} = 22 * q = 1 * q \quad (12)$$

$$Q_{esgoto} = 20 * q = 0.909 * q \quad (13)$$

$$Q_{produzida} = 2 * q = 0.0909 * q \quad (14)$$

Utilizando a Equação 8 tem-se como resultado,

$$\left(\rho A \frac{dh}{dt}\right)_{\text{tanque}} = \rho(q_{\text{esgoto}} - q_{\text{alimentação}}) - q_{bomba} \quad (15)$$

Prosseguindo com a manipulação da equação obtém-se,

$$\left(\rho A \frac{dh}{dt}\right)_{\text{tanque}} = \rho q_{\text{alimentação}} - 0.091 \rho q_{bomba} \quad (16)$$

Onde $R = \rho$, $q_{bomba} = \frac{gh}{R}$ e $C = \frac{A}{g}$, de forma que a Equação 16 é reescrita como,

$$\left(RC \frac{dh}{dt}\right)_{\text{tanque}} + 0.091h = \frac{R}{g} q_{\text{alimentação}} \quad (17)$$

Logo, a modelagem matemática do destilador de água com alimentação constante é dada pela Equação 17, e tem-se a equação diferencial do sistema, onde (h) é o nível do tanque, (g) a gravidade.

4. MODELAGEM DO SISTEMA DE CONTROLE

O sistema de controle inteligente do destilador de água com alimentação constante é composto por uma função de transferência, $G(s)$, que relaciona uma entrada de referência (vazão de alimentação), $Q_A(s)$, com a saída do tanque, $H(s)$. O sistema de controle em malha fechada do destilador descrito em diagrama de blocos é ilustrado na Figura 4.

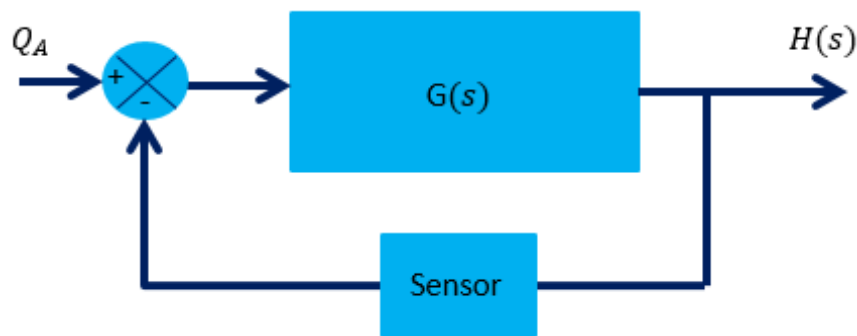


FIGURA 4. Representação em diagrama de bloco do Sistema de controle em malha fechada do subsistema 6. Fonte: Autoria Própria (2018).

Para a resolução da equação diferencial ordinária do sistema, de forma geral é utilizada a área de controle. A função de transferência é definida como a relação entre a transformada de Laplace da saída (função de resposta) e a transformada de Laplace da entrada (função de excitação), admitindo-se todas as condições de contorno iguais a zero. A notação geral usada é letra s minúscula para a função, e letra maiúscula para a transformada.

Seja $f(t)$ uma função definida nos reais não negativos. Quando a integral,

$$L\{f(t)\} = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (18)$$

for convergente, ela será chamada de transformada de Laplace da função $f(t)$, conforme estudado em Zill e Cullen (2013).



Aplicando a Transformada de Laplace na Equação 17 obtém-se,

$$RC[sH(s) - h(0)] + 0.091H(s) = \frac{R}{g} Q_A(s) \quad (19)$$

$$\frac{H(s)}{Q_A(s)} = \frac{\frac{R}{g}}{\tau s + 0.091} \quad (20)$$

Onde τ representa a constante de tempo do sistema e traz informações sobre o tempo de resposta do sistema de controle em relação a uma entrada fornecida. A aplicação da álgebra de simplificação em diagramas de blocos, fornece a forma reduzida do sistema de controle, Figura 5.



FIGURA 5. Representação simplificada do sistema de controle em diagrama de bloco.
Fonte: Autoria Própria (2018).

Extraíndo a equação característica da Equação 20 temos,

$$\tau s + 0.091 = 0 \quad (21)$$

A partir da Equação 21, será calculado a raiz ou polo da equação,

$$s = -\frac{0.091}{\tau} \quad (22)$$

A Equação 22 revela um polo no semiplano do lado esquerdo. A presença deste polo negativo no sistema informa a estabilidade que a planta traz, em malha fechada. Se tratando da realimentação do controle, esta é composta por um sensor de ondas sonoras.

O Sistema de controle Inteligente para controle de nível do destilador é representado pela Figura 6.

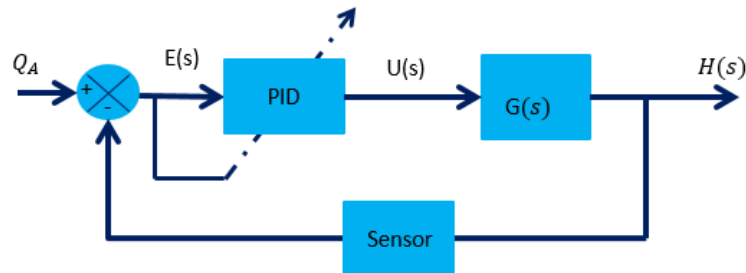


FIGURA 6. Representação em diagrama de bloco do Sistema de controle Inteligente.

Fonte: Autoria Própria (2018).

Na ilustração acima, o controlador PID está sendo alimentado pelo erro do sistema, ou seja, a vazão da válvula controlada e o valor nível do tanque. O sinal de erro alimenta a rede neural artificial para atualização dos pesos como estudado em Haykin (2007). O esquema do mecanismo de sintonia dos parâmetros do controlador PID via rede neural artificial é mostrada na Figura 7.

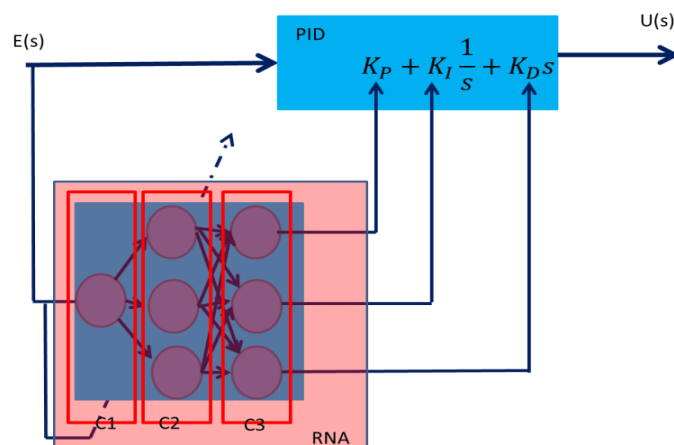


FIGURA 7. Representação em diagrama de bloco do Sistema Inteligente de Sintonia do Controlador PID. Fonte: Autoria Própria (2018).

O sistema de sintonia inteligente é composto por uma rede neural artificial com estrutura 1-3-3, ou seja, um neurônio na camada de entrada (C1) (unidade sensorial), três neurônios na camada oculta (C2) e três neurônios na camada de saída (C3). A função de



ativação empregada pela rede neural artificial é uma sigmoide. Desse modo, a rede neural artificial é alimentada pelo erro e a saída fornece os parâmetros K_P , K_I e K_D do controlador PID.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a Equação 20, temos que $R = 999.7026 \text{ Kg/m}^3$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ e $\tau = 0$ a 10 s. A resposta do destilador de água com alimentação constante sem controle à uma entrada degrau unitária como referência, o qual é o valor desejado do nível, é fornecida pela Figura 8.

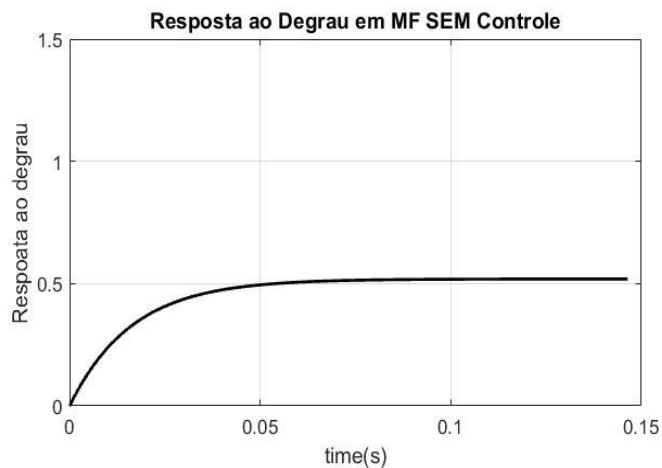


FIGURA 7. Resposta do destilador de água com alimentação constante sem controle à uma entrada degrau. Fonte: Autoria Própria (2018).

Observa-se que não se alcançou o valor desejado do nível, pois o máximo valor alcançado pela resposta foi 0.5190 em um tempo de 0.1719 s. O tempo de subida da resposta corresponde à 0.0358 s. O tempo de acomodação foi 0.0638 s.

Para o caso da resposta do controle de nível do destilador com o sistema Inteligente de Sintonia do Controlador PID, representa-se tal circunstância na Figura 9.

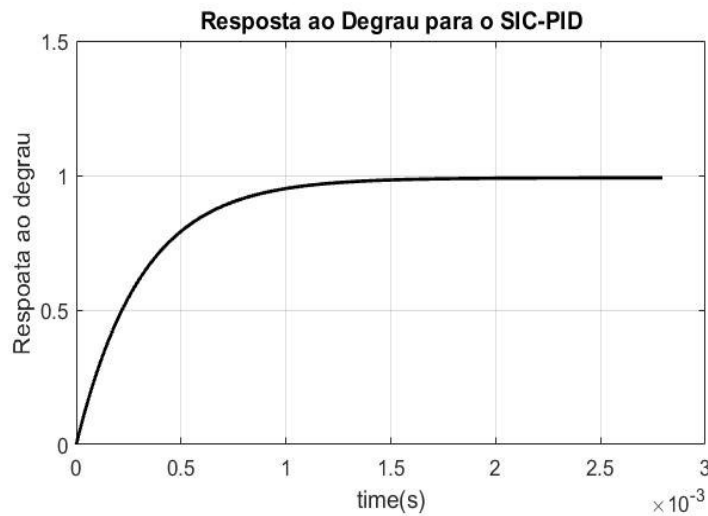


FIGURA 7. Resposta do destilador de água com alimentação constante com controle à uma entrada degrau. Fonte: Autoria Própria (2018).

A partir do procedimento, a resposta obtida pelo sistema com a atuação do sistema de sintonia inteligente do controle PID alcançou o valor (0.991) do nível em um tempo de 0.0033s. Foi obtido um *Overshoot* de 0 (zero). O tempo de subida da resposta corresponde à $7.0985e(-04)$ s. O tempo de acomodação foi 0.0014 s. Os parâmetros sintonizados pela rede neural artificial do controlador PID são $K_p=100$, $K_i=67$, $K_d=0$. A taxa de aprendizado da rede foi dada como $\eta=0.02$.

6. CONCLUSÕES

Em suma, na planta em questão, percebe-se que os valores obtidos pelo sistema de controle inteligente estão dentro dos parâmetros de projeto que leva em consideração a resposta desejada do sistema e o valor de *Overshoot*, pois este é de suma importância para o tanque não transbordar.

Conclui-se então que o sistema de controle inteligente, baseado na sintonia do controlador PID por meio de redes neurais artificiais, tornou-se eficiente para o propósito de controle de nível do destilador de água com alimentação constante.

Os resultados atingidos comprovam a eficiência da planta de controle de nível do destilador. E o interessante é que esse método pode ser aplicado a qualquer outra planta, diferenciando suas condições de projeto, geralmente mostrando a contínua eficiência desse novo método da indústria 4.0.



REFERÊNCIAS

- ARAHAL, M. R.; BERENGUEL, M.; CAMACHO, E. F. Neural identification applied to predictive control of a solar plant. *Control Engineering Practice*, v. 6, n. 3, p. 333-344, 1998.
- ARINTON, Eugen; CARAMAN, Sergiu; KORBICZ, József. Neural networks for modelling and fault detection of the inter-stand strip tension of a cold tandem mill. *Control Engineering Practice*, v. 20, n. 7, p. 684-694, 2012.
- ÅSTRÖM, K. J.; ALBERTOS, P.; QUEVEDO, J. *Control Engineering Practice-Special Issue on PID Control*. Elsevier, v. 69, p. 70, 2001.
- BERGMAN, T. L. et al. *Fundamentals of heat and mass transfer*, 2011. USA: John Wiley & Sons. ISBN, v. 13, p. 978-0470, 2015.
- HAYKIN, Simon. *Redes neurais: princípios e prática*. Bookman Editora, 2007.
- MUNSON, Bruce Roy et al. *Fluid mechanics*. Singapore: Wiley, 2013.
- NAKAYAMA, Yasuki. *Introduction to fluid mechanics*. Butterworth-Heinemann, 2018.
- NARENDRA, Kumpati S.; PARTHASARATHY, Kannan. Identification and control of dynamical systems using neural networks. *IEEE Transactions on neural networks*, v. 1, n. 1, p. 4-27, 1990.
- O'DWYER, Aidan. *Handbook of PI and PID controller tuning rules*. Imperial College Press, 2009.
- SASTRY, P. S.; SANTHARAM, G.; UNNIKRISHNAN, K. P. Memory neuron networks for identification and control of dynamical systems. *IEEE transactions on neural networks*, v. 5, n. 2, p. 306-319, 1994.
- PECANHA, Ricardo. *Sistemas Particulados#: Operações unitárias envolvendo partículas e fluídos*. Elsevier Brasil, 2014.
- YUNUS, Cengel A.; AFSHIN, J. Ghajar. *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*. Tata McGraw-Hill, New Delhi, India, 2011.
- ZIEGLER, John G.; NICHOLS, Nathaniel B. Optimum settings for automatic controllers. *trans. ASME*, v. 64, n. 11, 1942.
- ZILL, Dennis G.; CULLEN, Michael R. *Ecuaciones diferenciales*. McGraw-Hill Interamericana, 2013.

Agradecimentos

Agradecemos a Universidade Federal do Maranhão (UFMA) e Coordenação de Engenharia mecânica pelo suporte a pesquisa.