

Modelagem e controle digital do nível de líquido de uma planta piloto, utilizando o algoritmo da colônia de vagalumes

Modeling and digital control of the liquid level of a pilot plant, using the firefly algorithm

Modelado y control digital del nivel de líquido de una planta piloto, utilizando el algoritmo de colonia de luciérnagas

Recebido: 12/07/2021 | Revisado: 17/07/2021 | Aceito: 25/07/2021 | Publicado: 01/08/2021

Yan Alves Almeida

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4817-6211>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: yanalves1@hotmail.com

Danillo Borges Rodrigues

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2457-8299>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: danillo.rodrigues@uftm.edu.br

Davi Leonardo de Souza

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1995-9057>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: davi.souza@uftm.edu.br

Resumo

O controle de processos é de suma importância para a indústria, tanto pela segurança dos funcionários quanto pelo lado econômico. Através dele é possível aumentar a qualidade do produto final e reduzir custos. Existem diversas maneiras de realizar o controle, uma delas é através dos métodos de otimização e algoritmos bioinspirados, como o algoritmo da colônia de vagalumes. Tais métodos minimizam o erro entre o sinal de saída da variável controlada e o *setpoint* (valor desejado). Este trabalho tem como objetivo realizar e avaliar a eficiência da modelagem e do controle digital do nível de líquido de uma planta piloto utilizando o algoritmo da colônia de vagalumes. Os resultados foram obtidos por meio de simulações realizadas no *software* Scilab e experimentos em uma planta piloto. Os resultados indicaram que para esse tipo de sistema, o algoritmo da colônia de vagalumes obteve controladores PI de alta eficiência, conciliando robustez, performance e nenhum *overshoot* (desvio máximo da variável controlada em relação ao valor do setpoint).

Palavras-chave: Algoritmos bioinspirados; Controle; Otimização; Planta piloto.

Abstract

Control is of paramount importance for the industry, both for employee safety and for the economic side, through which it is possible to increase the quality of the final product and reduce costs. There are several ways to perform the control, one of them is through optimization methods and bioinspired algorithms such as the firefly colony algorithm, such methods minimize the error between the output signal of the controlled variable and the setpoint (desired value). This work aimed to perform and evaluate the efficiency of modeling and digital control of the liquid level of a pilot plant using the firefly colony algorithm. The results were obtained through simulations carried out in Scilab software and experiments in a pilot plant. The results indicated that for this type of system the firefly colony algorithm obtained high efficiency PI controllers, reconciling robustness, performance and no overshoot (maximum deviation of the controlled variable with the setpoint value).

Keywords: Bioinspired algorithms; Control; Optimization; Pilot plant.

Resumen

El control de procesos es de suma importancia para la industria, tanto para la seguridad de los empleados como para el aspecto económico. A través de él, es posible aumentar la calidad del producto final y reducir costos. Hay varias formas de controlar, una de ellas es mediante métodos de optimización y algoritmos bioinspirados, como el algoritmo de colonias de luciérnagas. Dichos métodos minimizan el error entre la señal de salida de la variable controlada y el punto de ajuste (valor deseado). Este trabajo tiene como objetivo realizar y evaluar la eficiencia del modelado y control digital del nivel de líquido de una planta piloto utilizando el algoritmo de colonias de luciérnagas. Los resultados se obtuvieron mediante simulaciones realizadas en el *software* Scilab y experimentos en una planta piloto. Los resultados indicaron que para este tipo de sistema, el algoritmo de colonia de luciérnagas obtuvo controladores PI de alta eficiencia, conciliando robustez, rendimiento y ausencia de sobreimpulso (desviación máxima de la variable controlada en relación al valor del setpoint).

Palabras clave: Algoritmos bioinspirados; Control; Mejoramiento; Planta piloto.

1. Introdução

O controle de processos é essencial em qualquer indústria. É através dele que os processos são otimizados garantindo menores custos, maiores rendimentos e segurança para os funcionários e à empresa. O controle é imprescindível para manter as variáveis dentro de um valor desejado (*setpoint*) (Ogata, 2010), sendo as mais comuns em processos químicos pressão, temperatura, concentração e nível.

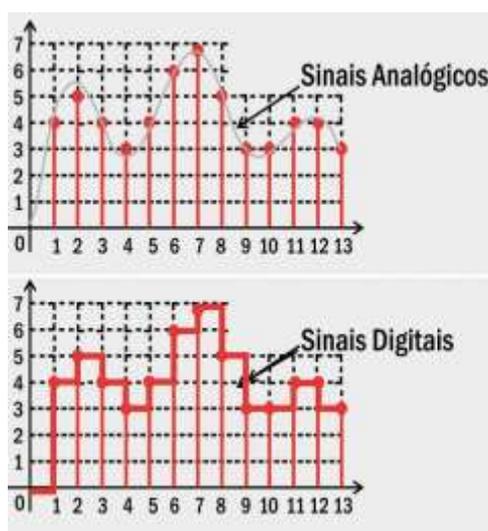
Exemplos de processos que precisam ser controlados podem ser encontrados facilmente em diversos tipos de indústrias. Um exemplo é um reator de síntese de amônia que opera a uma temperatura de 450°C, ao mesmo tempo a reação dentro dele é exotérmica, ou seja, libera calor ao ambiente (Mundo Educação, s.d.). Desta forma, se faz necessária a utilização de um sistema de refrigeração para controlar a temperatura do reator. Caso o sistema não resfrie o suficiente, o reator continuará aquecendo até atingir altas temperaturas podendo ocasionar uma possível explosão dentro da indústria. Por outro lado, se o sistema resfriar demais a reação terá um rendimento menor, reduzindo consideravelmente os lucros da empresa.

Outro exemplo pode ser visto nas refinarias de petróleo, em que são utilizadas colunas de destilação e o produto é vendido com uma determinada pureza para o cliente (CBIE, 2019). Caso o sistema não tenha o controle adequado das vazões de alimentação e refluxo, a composição não será a desejada e o produto não será adequado às especificações que o cliente deseja.

Os controladores são divididos em analógicos ou digitais (Bequette, 2003). O primeiro tem como principal característica uma saída que pode variar ao longo de uma faixa contínua de valores, ou seja, para um determinado instante de tempo haverá um valor determinado para a variável. Um exemplo disso é um carro com uma determinada aceleração, para cada instante de tempo o mesmo irá possuir uma velocidade diferente.

Já os controladores digitais possuem uma faixa discreta (FEIS-UNESP, 2013), sendo os valores da variável de interesse medidas em quantidades proporcionais de tempo. Um exemplo dessa faixa discreta é o relógio digital, que embora o tempo seja contínuo, o relógio só mostra variações a cada minuto ou segundo, os quais são os intervalos proporcionais. A Figura 1 mostra a diferença entre os dois tipos de sinais:

Figura 1. Ilustração da medida de uma variável com sinal analógico e digital.



Fonte: Oficina Brasil (2017).

Os controladores digitais têm assumido uma posição mais relevante no mercado a cada dia. Isso se deve às diversas vantagens que esse tipo de controlador possui em relação ao analógico (ENE-UNB, 2020), possibilitando maior eficiência aos

processos e com isso, os lucros, a segurança dos funcionários e da empresa e o tempo são otimizados. Dentre as vantagens é possível citar:

- Sistemas digitais são mais fáceis de projetar;
- Fácil armazenamento de informações;
- Maior exatidão e precisão;
- Menor sensibilidade à ruídos.

Os controladores podem ser de diversos tipos, em que se destacam os controladores PID, que além de serem eficientes, possuem fácil implementação (Goodwin et al., 2001). O PID é composto por três parâmetros: proporcional, integral e derivativo, os quais são ajustados a fim de otimizar o sistema.

Os parâmetros dos controladores podem ser obtidos por meio de diversos métodos. Um destes métodos é o algoritmo da colônia de vagalumes (ACV), que é uma técnica bioinspirada baseada na bioluminescência dos vagalumes. Esta, além de ser de fácil implementação, tem apresentado alta eficiência para diversos processos nos últimos anos (Yang, 2010). Tal método já provou a sua eficiência em diversas áreas, dentre elas, seleção de genes (Al-Thanoon et al, 2018) e até mesmo a otimização do projeto de trocadores de calor (Mohanty, 2015).

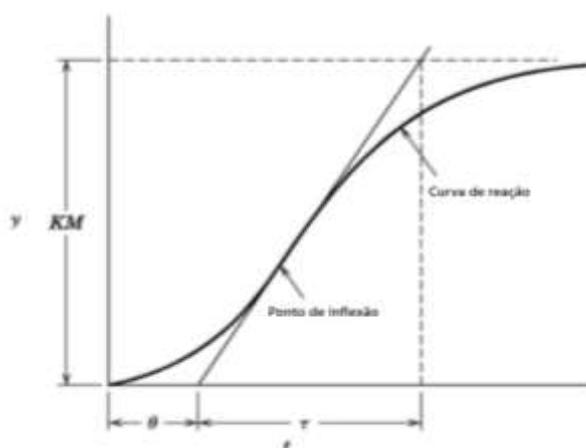
Portanto, este trabalho tem como objetivo utilizar o ACV para obtenção dos parâmetros tanto de uma função de transferência (FT) de 1ª ordem quanto de um controlador PID digital de uma planta piloto utilizando dados experimentais.

1.1 Método da Curva de Reação

Existem diversos métodos para obter os parâmetros do controlador PID, como o método de Ziegler e Nichols, Cohen-Coon e técnicas de otimização multiobjetivo (Araújo, 2015). Para utilizar tais métodos é necessário a obtenção do ganho (K), do tempo morto (θ) e da constante de tempo do sistema (τ), os quais são parâmetros obtidos através do comportamento do sistema após uma perturbação.

Para sistemas de primeira ordem, a forma mais fácil de obtê-los é através do método da curva de reação, em que se aplica um degrau de amplitude M na variável manipulada e com base no comportamento da variável de saída até atingir o novo estado estacionário, é traçada uma reta tangente ao ponto de inflexão, conforme ilustra a Figura 2 (Seborg et al., 2011):

Figura 2. Método da curva de reação.



Fonte: Adaptado de Seborg et al. (2011).

Em posse de tais valores é possível obter a função de transferência de um sistema de primeira ordem, dada pela equação (1) (Smith & Corripio, 2008).

$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (1)$$

em que K é o ganho da FT, θ é o tempo morto e τ é a constante de tempo do sistema.

1.2 Controlador Digital

O controlador digital funciona através de sinais numéricos (digitais). Para coletar tais sinais, existe o processo de amostragem, onde o sinal de saída é medido a cada intervalo de tempo fixo T. Esse tipo de sistema normalmente precisa de dois conversores, o primeiro (A/D) irá transformar o sinal analógico em um digital e este será enviado ao microprocessador que irá realizar a leitura e escolher a ação de controle a ser aplicada no sistema. Em seguida o segundo conversor, (D/A), irá retornar ao sinal ao modo analógico, gerando um sinal constante de tensão. (CIN-UFPE, 2016).

Nos processos de controle surgem equações não lineares e complexas de se trabalhar, por esse motivo é necessário alterar o domínio da equação utilizando a transformada de Laplace. Para sistemas analógicos, a equação passa para o domínio (s). Analogamente, os sistemas digitais trabalham no domínio (z) devido à faixa discreta de valores. A definição da transformada Z é dada pela equação (2) (Castrucci et al., 2011).

$$F(z) = Z\{f(t)\} = Z\{f(kT)\} \triangleq \sum_{k=0}^{\infty} f(kT)z^{-k} \quad (2)$$

1.3 Métodos de Discretização

Os métodos de discretização são utilizados para transformar uma função de um domínio (s) para o (z), onde a função em tempo contínuo tem o seu equivalente em intervalos discretos. Seja G(s) uma FT simples, tem-se a equação (3).

$$G(s) = \frac{1}{s} \quad (3)$$

A equação diferencial equivalente a equação (3) é a equação (4).

$$\frac{dy(t)}{dt} = u(t) \quad (4)$$

Ao integrar ambos os lados da equação (4), em um período T qualquer, $(k-1)T$ a kT , é obtida a equação (5).

$$y(kT) - y[(k-1)T] = \int_{(k-1)T}^{kT} u(t)dt \quad (5)$$

Tal equação é complexa de ser resolvida analiticamente, por isso faz-se necessário a utilização de métodos numéricos (Castrucci et al., 2011). Os mais comuns são o de Tustin, Euler e o retangular para trás, mas ainda existem outros como o Retentor de ordem zero (ZOH).

1.4 Método de Tustin

Tustin aproxima o cálculo da integral à área de um trapézio, onde as bases correspondem aos limites da integral e a altura ao período de amostragem. Com isso ele obtém a equação (6) capaz de mudar o domínio de uma FT no domínio (s) para o (z) (Castrucci et al., 2011).

$$s = \frac{2(z-1)}{T(z+1)} \quad (6)$$

1.5 Método de Euler

O método de Euler realiza o cálculo da integral ao aproximar à área com um retângulo de lados T e $(k-1)T$. Esse método é descrito pela equação (7) (Castrucci et al., 2011).

$$s = \frac{(z-1)}{T} \quad (7)$$

1.6 Método retangular para trás

Assim como o anterior, a área é aproximada a um retângulo, contudo os lados agora são T e kT, resultando na equação (8) (Castrucci et al., 2011).

$$s = \frac{(z-1)}{Tz} \quad (8)$$

1.7 Método do Retentor de ordem zero

Se a aproximação é de ordem zero, então é possível utilizar o método do Retentor de ordem zero (Franklin et al., 1997). Tal método é descrito pela equação (9) e é utilizado pelo *software* Scilab para realizar a discretização.

$$H_{ZOH}(z) = (1 - z^{-1})Z \left\{ \frac{H(s)}{s} \right\} \quad (9)$$

1.8 Controlador PID Digital

Analogamente ao PID analógico, para realizar o controle através de um PID digital deve-se obter os coeficientes da equação (10) (Castrucci et al., 2011).

$$D(z) = Kc \left(1 + \frac{Tz}{\tau_I(z-1)} + \frac{\tau_D(z-1)}{Tz} \right) \quad (10)$$

em que Kc é o ganho da função, T é o tempo de amostragem e τ_I e τ_D são as constantes de tempo do controle integral e derivativo, respectivamente. Uma vez em posse da FT discretizada, é possível obter os parâmetros da equação (10) por meio de diversos métodos. Neste trabalho os parâmetros serão obtidos utilizando-se o ACV.

1.9 Algoritmo da Colônia de Vagalumes

O ACV é um método de otimização não determinístico (ou evolutivo) bioinspirado na bioluminescência dos vagalumes. Tal fenômeno influencia os comportamentos dos vagalumes uma vez que eles são atraídos uns pelos outros de acordo com a luminosidade.

A estrutura do algoritmo é baseada em três regras básicas (Yang, 2010):

- 1- O sexo não interfere na atração, dessa forma todos vagalumes serão atraídos uns pelos outros.
- 2- A atratividade é diretamente proporcional ao brilho e inversamente proporcional a distância entre os vagalumes, dessa forma o menos brilhante se move em direção ao mais brilhante, caso ambos tenham a mesma luminosidade, o movimento será aleatório.

- 3- O brilho de um vagalume é estabelecido pela função objetivo.

A intensidade da luz percebida por um vagalume é dada pela equação (11) (Yang, 2010).

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (11)$$

em que γ é o fator de absorção de luz pelo meio, r é a distância euclidiana entre os vagalumes e I_0 é a intensidade da luz emitida.

De forma análoga, a atratividade β é expressada pela equação (12) (Yang, 2010).

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (12)$$

na qual β_0 é a atratividade inicial. A distância euclidiana pode ser representada pela equação (13) (Yang, 2010).

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (13)$$

Por fim, uma vez que os vagalumes estão constantemente alterando suas posições, é necessário a equação (14) para essa movimentação (Yang, 2010):

$$x_{i+1} = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha \left(\text{rand}() - \frac{1}{2} \right) \quad (14)$$

em que x_{i+1} representa a próxima posição do vagalume, x_i é a posição atual, α é um fator de aleatoriedade e $\text{rand}()$ é um valor aleatório gerado por uma distribuição normal. Com todas as definições feitas, é possível escrever o código em forma de pseudocódigo, o algoritmo pode ser demonstrado na Tabela 1:

Tabela 1. Pseudocódigo do algoritmo da colônia de vagalumes.

Início

Definir a função objetivo

Definir os parâmetros do ACV

Para i=1 até o número máximo de gerações faça:

 Calcular a intensidade da luz

Para j=1 até o número de vagalumes faça:

 Calcular o fator de atratividade,

 Mover o vagalume j em direção aos vagalumes mais brilhantes

 Verificar se o vagalume está dentro dos limites

Fim – Para

Fim – Para

Visualização dos resultados

Fim

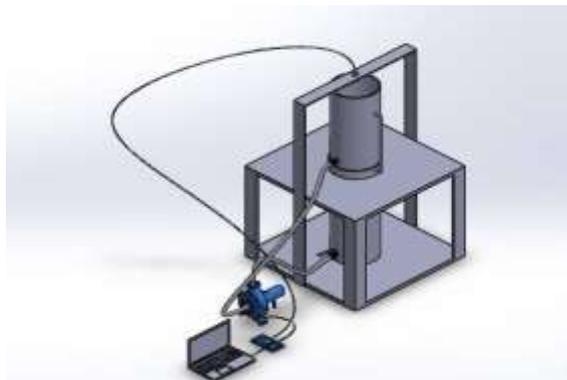
Fonte: Correa (2019).

2. Metodologia

Este trabalho é uma pesquisa laboratorial de natureza quantitativa (Pereira et al., 2018) com coleta de dados realizada diretamente no laboratório. O trabalho foi realizado utilizando uma planta piloto localizada no laboratório de Controle e Automação do Instituto de Ciências e Tecnológicas e Exatas (ICTE) da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), conforme a Figura 3:

Figura 3. Ilustração didática da planta piloto (a), planta piloto (b).

a)



b)



Fonte: Fonseca (2018).

Todos os cálculos e gráficos para obtenção dos resultados foram realizados utilizando-se o *software* Scilab. A unidade é constituída por um reservatório e instrumentos de controle, sendo composta pelos seguintes elementos:

Reservatório:

- Suporte metálico;
- Reservatório de líquido;
- Reservatório para controle de nível;
- Válvula esférica manual;
- Mangueiras para condução do líquido.

Instrumentos de controle:

- Computador;
- Bomba centrífuga;
- Sensor de nível ultrassônico.

Inicialmente obteve-se a FT de 1ª ordem que representa o sistema. Para isso, utilizou-se o ACV. Esta etapa foi dividida em alguns passos, primeiramente os dados foram obtidos após um experimento feito na planta onde as válvulas de entrada e saída do reservatório foram abertas e a bomba ligada, dando início a circulação de água no reservatório até que o mesmo atinja o estado estacionário (EE), ou seja, até que o nível do reservatório fique constante.

Uma vez que o EE é atingido, é realizada uma perturbação do tipo degrau e com isso o nível do sistema sofre uma modificação até atingir um novo EE. Durante esse processo, são coletados dados do nível da planta em determinados instantes de tempo. Tais dados são utilizados com o *software* Scilab para plotar uma curva de reação da variação do nível com o tempo. Em posse da curva, é utilizado o método da curva de reação para obter os parâmetros para uma FT de 1ª ordem.

Tais parâmetros são utilizados para obtenção dos dados que serão utilizados na implementação do código de obtenção da FT pelo ACV. Com base em estudos realizados na área (Yang, 2010), foram definidos os parâmetros do ACV, em que o número de iterações $Max_{Gen} = 250$; absorção de luz pelo meio $\gamma = 1$; parâmetro de aleatoriedade $\alpha = 0,5$; parâmetro de atratividade $\beta = 0,2$ e o tamanho da população $NP = 20$. Ademais, a função objetivo é o somatório dos erros ao quadrado.

Devido à aleatoriedade característica do ACV, cada simulação irá obter diferentes resultados. Por isso, é realizada uma série de corridas no código e no fim é escolhida aquela que mais se adequa aos dados operacionais. A escolha é feita visualmente,

uma vez que em posse dos gráficos fica fácil observar aquele com melhor sobreposição. Os parâmetros da FT obtida nessa corrida são os parâmetros K e τ , os quais são um dos objetivos deste trabalho.

A segunda etapa é a obtenção dos parâmetros de um controlador digital através do ACV. Assim como a primeira etapa, esta também é dividida em alguns passos. O primeiro deles é a discretização da FT obtida pelo ACV. A discretização é necessária visto que os sistemas digitais demandam um domínio discreto. Neste trabalho serão utilizados quatro métodos de discretização com fins comparativos, sendo eles o método de Tustin, Euler, retangular para trás e o ZOH.

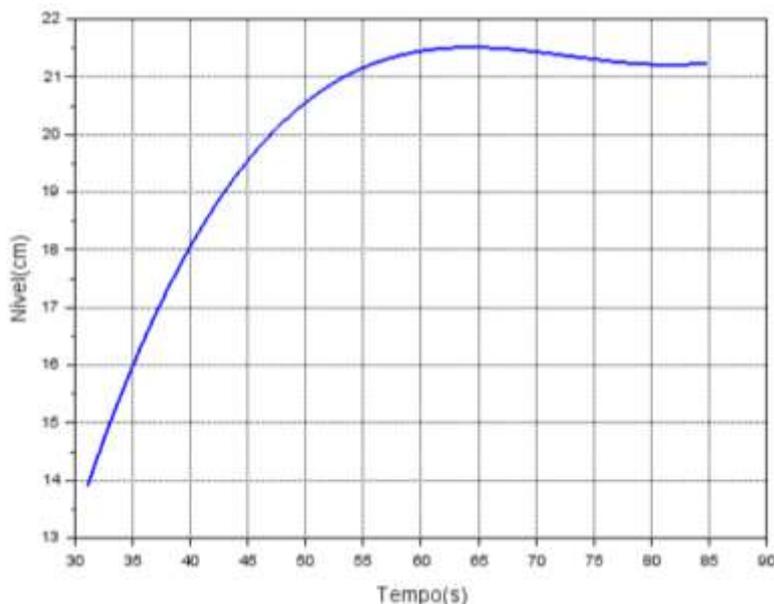
Após obter a FT discretizada por cada método, cada uma das FT's será utilizada no ACV para obter os controladores PID digitais. Com isto, serão obtidos os parâmetros de quatro controladores, um para cada método.

Por fim, a última etapa consiste em realizar a comparação entre os controladores. Nesta etapa também será utilizado o ACV para se obter os parâmetros de um controlador analógico e os cinco controladores serão plotados em um mesmo gráfico.

3. Resultados e Discussão

Após a realização do experimento na planta piloto, os dados foram coletados e pôde-se notar uma grande quantidade de ruídos, sendo necessário realizar um ajuste cúbico nos dados de forma que os valores possam ser utilizados de maneira confiável no trabalho. Com isso foi possível obter a curva de reação ajustada do nível do reservatório representada na Figura 4:

Figura 4. Curva de reação ajustada da planta piloto.



Fonte: Autores (2021).

Através da curva, pode-se observar que após o degrau sofrido o sistema apresenta um pequeno *overshoot* e demora cerca de 54 segundos para atingir um novo EE em torno de 21,2 cm. Aplicando-se o método da curva de reação, foi possível obter os parâmetros de uma FT de 1ª ordem, os quais são $K= 7,29$ e $\tau = 12,87 s^{-1}$.

Tais parâmetros foram utilizados para gerar os dados ajustados do sistema, visto que os dados ruidosos são inadequados para o estudo. Em posse dos dados ajustados e utilizando o ACV, foram realizadas 5 corridas a fim de se obter os parâmetros mais adequados ao sistema proposto. Os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 2.

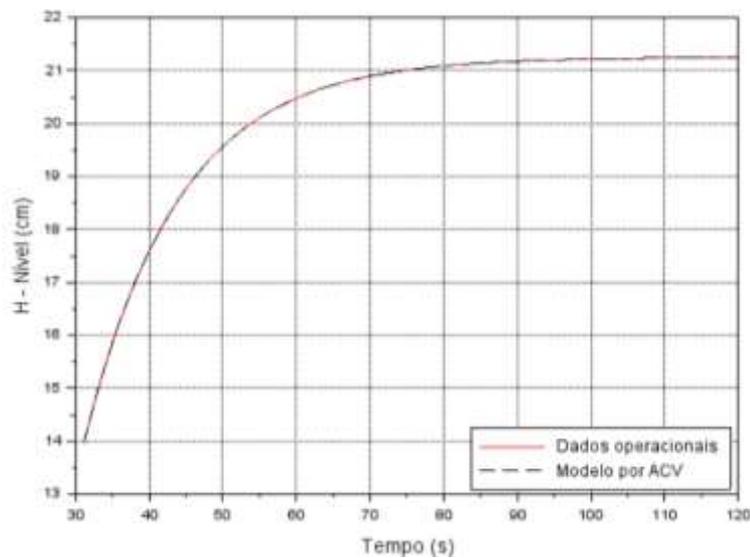
Tabela 2. Parâmetros das corridas utilizando o ACV.

Corrida	K	τ
1	7,29145	12,89291
2	7,29021	12,87407
3	7,29080	12,89793
4	7,36957	13,88377
5	7,29017	12,89551

Fonte: Autores (2021).

Comparando os gráficos das corridas com os dados operacionais, conclui-se que a melhor corrida foi a número 3, visto que ela é a única na qual a sobreposição dos dados operacionais ocorre perfeitamente, indicando que o sistema foi bem representado. Dessa maneira, os parâmetros da corrida número 3 são aqueles escolhidos para projetar os controladores na etapa seguinte. A curva pode ser vista na Figura 5.

Figura 5. Comparativo da corrida número 3 e os dados operacionais.



Fonte: Autores (2021).

O próximo passo foi discretizar a FT de 1ª ordem obtida pelo ACV. Para isso foram utilizados quatro métodos e os resultados do método de Euler, Retangular para trás, Tustin e ZOH podem ser vistos nas equações (15), (16), (17) e (18), respectivamente.

$$H_{zEuler} = \frac{7.2908z}{-12.89793+13.89793z} \quad (15)$$

$$H_{zRetangular} = \frac{14.5816z}{-12.89793+14.89793z} \quad (16)$$

$$H_{zTustin} = \frac{21.8724z}{-12.89793+15.89793z} \quad (17)$$

$$H_{zZOH} = \frac{29.1632z}{-12.89793+16.89793z} \quad (18)$$

Utilizando o código do ACV juntamente às FT's discretizadas obtidas anteriormente, foi possível obter os parâmetros dos controladores digitais. Além disso, também foi projetado um controlador analógico com o ACV. Com base em testes preliminares executados na planta, concluiu-se que o melhor tempo de amostragem para os controladores nesse caso era $T=2$ s. Todos os resultados podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros dos controladores.

Método	Kc	τ_I
Analógico	30,24985	12,87404
Euler	104,66786	0,1
Ret. P/ Trás	132,38287	0,1
Tustin	114,55155	0,1
ZOH	121,1543	0,1

Fonte: Autores (2021).

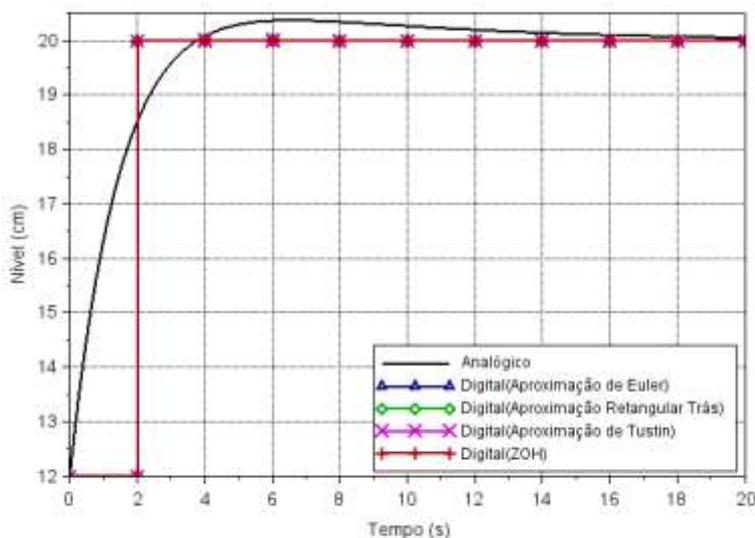
O sistema apresentou muitos ruídos o que fez com que o termo derivativo do controlador PID fosse muito grande, devido a isso, optou-se por utilizar controladores do tipo PI.

Além disso também é possível observar que todos os controladores digitais convergem para um mesmo valor de τ_I , indicando que esse realmente é o melhor valor para este parâmetro. Por fim, o desempenho dos 5 controladores foi comparado plotando-se um gráfico da variação de nível do reservatório com o tempo e o resultado obtido se encontra na Figura 6.

Analisando os resultados dos controladores PI obtidos, pode-se perceber que as curvas dos quatro controladores digitais se sobrepõem variando em intervalos discretos. Além disso, no primeiro ponto de amostragem em $t=2$ s, eles alcançam o *setpoint* e permanecem nele até o fim do experimento.

O comportamento idêntico dos quatro controladores se deve por dois motivos. O primeiro é devido a simplicidade do sistema, o qual faz atingir o EE de maneira muito rápida para todos os métodos digitais. O segundo motivo é devido ao tempo de amostragem ser relativamente alto. Caso ele fosse menor haveriam mais pontos antes de atingir o EE e provavelmente seria possível observar diferenças entre o comportamento de cada controlador. Contudo, após diversos testes, a robustez e performance do controlador foram alcançadas em $T=2$ s.

Figura 6. Comparativo entre os controladores.



Fonte: Autores (2021).

Já o controlador PI analógico apresenta uma faixa de valores contínua e demora cerca de 20 segundos para atingir o *setpoint*. Antes disso, ele ultrapassa o valor do EE em $t=4s$ e provoca um pequeno *overshoot* que demora a se estabilizar. *Overshoots* causam um desvio do valor desejado e causam um aumento da oscilação da variável de saída, e, dessa maneira, reduzem a eficiência do sistema. Caso o overshoot ainda seja muito grande pode causar até mesmo acidentes nos processos.

O fato do controlador analógico levar muito mais tempo que os digitais para atingir o EE é um dos motivos pelo qual os controladores digitais vêm assumindo cada vez mais destaque nas indústrias. Visto que quando se trata de processos químicos industriais poucos instantes podem resultar em uma diferença de lucro de milhões de dólares, além de evitar um possível acidente como um derramamento de líquido e até uma explosão. Vale ainda ressaltar que devido as restrições da pandemia não foi possível realizar a validação dos controladores na planta.

4. Considerações Finais

A função de transferência obtida através do ACV representou perfeitamente o sistema e isso é comprovado ao se observar a Figura 5. O ACV também foi capaz de obter controladores digitais e analógicos capazes de controlar o sistema proposto em poucos segundos de maneira eficiente.

Com o intuito de comparar os controladores, pode-se perceber que os digitais apresentaram o mesmo resultado entre eles. Contudo, ao comparar com o PI analógico, é visível uma grande diferença, na qual o analógico demora 20 segundos para atingir o EE e apresenta *overshoot*, enquanto isso os digitais atingem o *setpoint* em apenas 2 segundos sem apresentar nenhum *overshoot*. Desta maneira, fica fácil entender o motivo dos controladores digitais serem mais eficientes e estarem assumindo um crescente destaque nas indústrias. Também é possível concluir que os controladores do tipo PI são mais adequados para sistemas que apresentam muitos ruídos.

Em trabalhos futuros, uma abordagem interessante é realizar o controle de temperatura deste sistema utilizando o ACV, analisar qual tipo de controlador será mais adequado ao sistema e realizar a validação dos controladores projetados na planta.

Referências

Al-Thanoon, N. A., Qasim, O. S., & Algamal, Z. Y. (2018). Tuning parameter estimation in SCAD-support vector machine using firefly algorithm with application in gene selection and cancer classification. *Computers in Biology and Medicine*, 103, 262-268.

- Araújo, A. P. (2015). Sintonia de Controladores de um Sistema Não-Linear com Aplicações na Indústria Petroquímica. [Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecatrônica]. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal.
- Bequette, B. W. (2003). *Process Control. Modeling, Design, and Simulation*. Prentice Hall.
- Castrucci, P. L., Bittar, A., & Sales, R. M. (2011). *Controle Automático*. Ed. LTC.
- CBIE. (2019). Como funciona a destilação do petróleo? <https://cbie.com.br/artigos/como-funciona-a-destilacao-do-petroleo/>
- CIN-UFPE. (2016). Conversão Digital Analógico e Analógico Digital. https://www.cin.ufpe.br/~es238/arquivos/aulas/aula17_conversores_adda.pdf.
- Correa, V. (2019). Projeto de Controlador PID Cascata em planta piloto, utilizando algoritmo de otimização Bio-inspirado. [Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química]. Universidade Federal do Triângulo Mineiro. Uberaba.
- ENE-UNB. (2020). Sistemas Analógicos e Digitais. <http://www.ene.unb.br/henrique/CDig/introdução.pdf>.
- FEIS-UNESP. (2013). Controle Digital. <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/lpc1672/control-e-digital.pdf>
- Fonseca, P. (2018). Projeto e análise de controlador PI digital para o nível de líquido em uma planta piloto. [Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química]. Universidade Federal do Triângulo Mineiro. Uberaba.
- Frankin, G. F, Workman, M. L., & Powell, D. (1997). *Digital Control of Dynamic Systems*. USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co.
- Goodwin, G. C., Graebe, S. F., & Salgado, M. E. (2001). *Control System Design*. Prentice-Hall.
- Mohanty, D. K. (2015). Application of firefly algorithm for design optimization of a shell and tube heat exchanger from economic point of view. *International Journal of Thermal Sciences*. 102, 228-238.
- Mundo Educação. (s.d.). Amônia Artificial. <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/amonia-artificial.htm>
- Oficina Brasil. (2017). Sinais Analógicos e Digitais de um Sistema Embarcado: Visão Geral e Análise dos Sistemas Automotivos. <https://www.oficinabrasil.com.br/noticia/tecnicas/sinais-analogicos-e-digitais-de-um-sistema-embarcado-visao-geral-e-analise-dos-sistemas-automotivos>.
- Ogata, K. (2010). *Engenharia de controle moderno*. Pearson Prentice Hall.
- Pereira, A. S. et al. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. UFSM.
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., & Doyle, F. J. (2011). *Process dynamics and control*. John Wiley and Sons.
- Smith, C. A., & Corripio, A. B. (2008). *Princípios e Práticas do Controle Automático de Processos*, Ed. LTC.
- Yang, X. S. (2010). *Engineering Optimization: An Introduction With Metaheuristic Applications*. John Wiley and Sons.