

Otimização multiobjetivo no projeto de controlador de nível em planta piloto
Multi objective optimization in the level controller project in a pilot plant
Optimización multiobjetivo en el proyecto de controlador de nivel en una planta piloto

Recebido: 21/05/2020 | Revisado: 23/05/2020 | Aceito: 27/05/2020 | Publicado: 08/06/2020

Matheus Divino Moraes Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3301-230X>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: oliveiramatheusmoraes@gmail.com

Rubia Carolina Morais Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1191-5172>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: rubiacarolina_22@hotmail.com

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

Controlar as variáveis de processo no ponto desejado representa desde ganho econômico, qualidade no produto final e controle da segurança industrial. A otimização tem como objetivo a busca pela melhor solução, para que isso ocorra utilizam-se algoritmos como Colônia de Vagalumes e o Evolução Diferencial, os quais minimizam o erro relativo do sinal de saída da variável controlada. Com o objetivo de comparar os algoritmos de evolução diferencial, e o bio-inspirado: colônia de vagalumes e o método clássico de Ziegler-Nichols, foi realizado o projeto de controle PI e de controle PID aplicado em uma planta piloto, considerando dois elementos finais de controle distintos (válvula e bomba) para controle de nível estabelecendo como critério de performance o mínimo esforço possível da variável manipulada. A comparação dos resultados obtidos entre os controladores projetados, utilizando os três métodos para os dois elementos em estudo, demonstrou que os algoritmos de otimização apresentaram um ótimo controle do processo, sem nenhum *overshoot* (desvio

máximo do valor da variável controlada, com o valor do *setpoint*). Os resultados obtidos demonstraram que ambos algoritmos de otimização são bons métodos para o projeto de controladores quando trabalhado com o mínimo esforço da variável manipulada.

Palavras-chave: Algoritmo bio-inspirado; Controle *feedback*; Evolução diferencial; Otimização.

Abstract

Controlling the process variables at the desired point represents from economic gain, quality in the final product and control of industrial safety. The optimization aims to search for the best solution, so that this occurs, algorithms such as Firefly Colony and Differential Evolution are used, which minimize the relative error of the controlled variable output signal. In order to compare the differential evolution algorithms and the bio-inspired: firefly colony and the classic Ziegler-Nichols method, the PI control and PID control project applied to a pilot plant was carried out, considering two final elements control systems (valve and pump) for level control, establishing the minimum effort of the manipulated variable as a performance criterion. The comparison of the results obtained between the designed controllers, using the three methods for the two elements under study, demonstrated that the optimization algorithms showed an excellent control of the process, without any *overshoot* (maximum deviation from the value of the controlled variable, with the *setpoint* value). The results obtained demonstrated that both optimization algorithms are good methods for the design of controllers when worked with the minimum effort of the manipulated variable.

Keywords: Bio-inspired algorithm; *Feedback* control; Differential evolution; Optimization.

Resumen

El control de las variables del proceso en el punto deseado representa desde el beneficio económico, la calidad en el producto final y el control de la seguridad industrial. La optimización tiene como objetivo buscar la mejor solución, para que esto ocurra, se utilizan algoritmos como Firefly Colony y Diferencial Evolution, que minimizan el error relativo de la señal de salida de la variable controlada. Para comparar los algoritmos de evolución diferencial y la bioinspiración: colonia de luciérnagas y el método clásico Ziegler-Nichols, se llevó a cabo el proyecto de control PI y control PID aplicado a una planta piloto, considerando dos elementos finales sistemas de control (válvula y bomba) para control de nivel, estableciendo el mínimo esfuerzo de la variable manipulada como criterio de

rendimiento. La comparación de los resultados obtenidos entre los controladores proyectados, utilizando los tres métodos para los dos elementos en estudio, demostró que los algoritmos de optimización mostraron un excelente control del proceso, sin ningún sobreimpulso (desviación máxima del valor de la variable controlada, con el valor del punto de ajuste). Los resultados obtenidos demostraron que ambos algoritmos de optimización son buenos métodos para el diseño de controladores cuando se trabaja con el mínimo esfuerzo de la variable manipulada.

Palabras clave: Algoritmo bioinspirado; Control de retroalimentación; Evolución diferencial; Optimización.

1. Introdução

Um tanque de armazenamento também conhecido por reservatório é destinado para armazenar fluidos ou ser um recipiente onde ocorrem reações químicas. Para que o rendimento desses tanques seja mais eficaz são empregadas instrumentações que fazem o controle de variáveis desejadas em um processo.

De acordo com Ogata (2010), o controle é essencial para manter os processos em determinados níveis, pressão, temperatura, umidade, entre outras. Para as indústrias manterem essas variáveis no ponto desejado significa desde ganho econômico, melhor qualidade no produto final e controle da segurança industrial.

Esse controle de processo por meio de instrumentação é modelado e definido computacionalmente através de *softwares* disponíveis como o Scilab[®] e o SCADA[®]. Um tipo de controle amplamente utilizado é o de *feedback* ou realimentação, no qual o medidor analisa o valor da variável de saída e compara com o valor desejado, calculando assim o erro que é imediatamente encaminhado para o controlador.

Se o erro for mínimo o *setpoint* foi atingido, caso não o sistema será repetido até a minimização do erro. Nos controladores *feedback* os parâmetros são definidos por meio do controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) corrigindo os interferentes presentes na saída do sistema. O controle conhecido como PID traz respostas a desvios proporcionais, integrais e derivativos.

Para tornar esse controle mais efetivo deve-se utilizar métodos de otimização e existem inúmeros métodos com essa finalidade, porém, nem todos apresentam a mesma

aptidão. A otimização é uma técnica que visa obter os valores ótimos de uma determinada função.

Os métodos de resolução de problemas de otimização podem ser classificados em dois tipos, determinísticos (ou clássicos) e não-determinísticos (meta-heurísticos, evolutivos ou randômicos). Com o foco nos métodos não-determinísticos, estes possuem como base para resolver problemas desse tipo a criação de uma população de possíveis candidatos.

A determinação da função de transferência (FT) é fundamental para o estudo da dinâmica e do controle de processo. A FT é definida como relação entre a variável de saída e variável de entrada. A variável de saída ou controlada, é aquela que deseja manter o valor desejado e a variável de entrada (manipulada) é a entrada do processo que é ajustada para manter a variável controlada no valor desejado (*setpoint*).

Segundo Smith & Corripio (1997), a representação geral de uma função de transferência é dada pela equação 1:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K(a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_1 s^1 + a_0) e^{-t_0 s}}{(b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s^1 + a_0)} \quad (1)$$

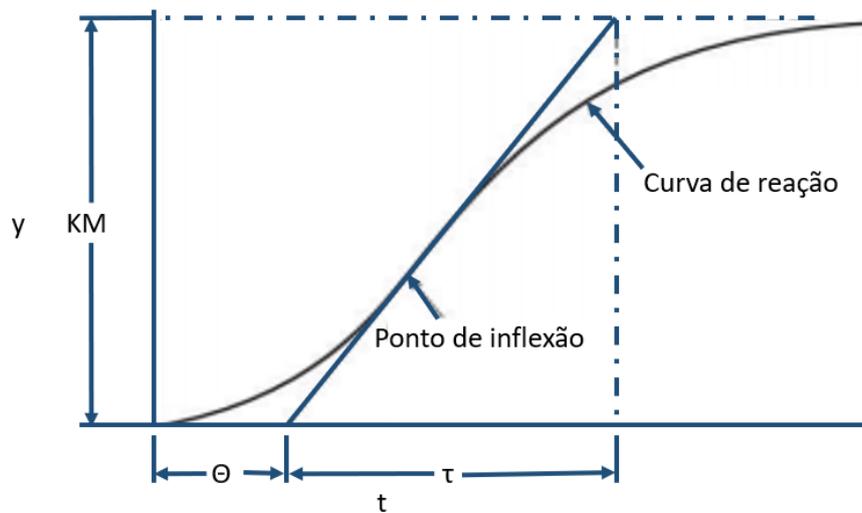
Onde, $G(s)$ representa a função de transferência e $Y(s)$ e $X(s)$ as transformada de Laplace da variável de saída e entrada do processo, respectivamente. A constante K representa o ganho do processo, a e b os coeficientes dos polinômios do numerador e do denominador da função de transferência e t_0 o tempo morto (atraso do sistema).

A equação da função de transferência de um sistema de primeira ordem com tempo morto pode ser mostrada na equação 2.

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (2)$$

em que, K é o ganho do processo, θ o tempo morto e τ a constante de tempo. Segundo Seborg, Edgar, Mellichamp e Doyle (2017), para obter tais parâmetros utiliza-se o método gráfico ou método da curva de reação, mostrado na Figura 1.

Figura 1: Gráfico para obtenção de parâmetros da função de transferência.

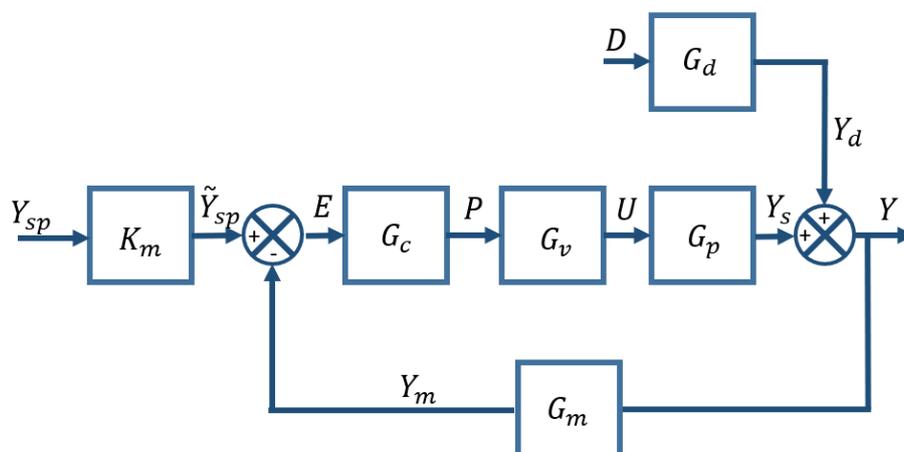


Fonte: Adaptado de Seborg *et al.*, 2017.

Em que, o eixo da abcissa (t) representa a soma do tempo morto (θ) e da constante de tempo (τ), enquanto que o eixo da ordenada (y) o produto da constante do ganho (K) com a amplitude do degrau (M).

Um tipo de controle amplamente utilizado é o de *feedback*, o diagrama de blocos mostrado na Figura 2 representa uma malha fechada de sistema *feedback*. Cada bloco representa uma função de transferência presente no processo, G_c , G_v , G_p , G_m e G_d são representações respectivamente da FT do controlador, do elemento final de controle, da planta, do medidor e da perturbação. A variável de saída é representada por Y , a variável de entrada por Y_{sp} e a perturbação do processo é representada por D .

Figura 2: Diagrama de blocos para malha fechada de sistema de controle *feedback*.



Fonte: Adaptado de Seborg *et al.*, 2017.

Na Figura 2, o medidor analisa o valor da variável de saída (Y) e compara com o valor desejado ou *setpoint* (Y_{sp}) calculando assim o erro que é encaminhado para o controlador. Se o erro for mínimo o valor encontrado é o *setpoint*, mas se o erro não estiver dentro da estimativa acontece novamente o procedimento até que o erro seja minimizado. Este loop contínuo é denominado *feedback*.

Existem dois sistemas que são provenientes desta malha: servo e regulador. O sistema servo leva em consideração apenas as alterações no *setpoint* (Y_{sp}), representado na Equação 3. Enquanto o regulador leva em consideração as perturbações (D), descrito pela Equação 4.

$$\frac{Y(s)}{Y_{sp}(s)} = \frac{K_m G_c G_v G_p}{1 + G_c G_v G_p G_m} \quad (3)$$

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_d}{1 + G_c G_v G_p G_m} \quad (4)$$

O elemento final de controle, representado por G_v , tem como função atuar diretamente sobre o processo, recebendo sinal do controlador para então corrigir o desvio do valor desejado. Podem ser válvula, bomba, solenoide e entre outros.

O controlador, representado por G_c na malha, pode ser determinado utilizando três ações: proporcional, integral e derivativo (PID). O controle integral corrige os erros ou reduz *offset* gerados pelo controle proporcional. Se o processo for de alta complexidade, o controle derivativo tem como objetivo corrigir as oscilações contínuas gerados pelo controle integral. Mas em processos de baixa complexidade, a inclusão do derivativo acaba atrapalhando o desenvolvimento do mesmo provocando oscilações.

A representação das três ações do controlador pode ser descrita pela Equação 5.

$$p = \bar{p} + K_c \left[e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t e(t) dt + \tau_D \frac{de}{dt} \right] \quad (5)$$

Na qual $e(t)$ representa o erro, p a parte proporcional, K_c o ganho da função e τ_I e τ_D as constantes de tempo do controle integral e derivativo, respectivamente.

Aplicando a transformada de Laplace na equação 5 obtém-se a função de transferência do controlador PID, descrita pela equação 6.

$$G_C = K_C \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right) \quad (6)$$

O controlador descrito na equação 6 é chamado de PID, por apresentar as três ações: proporcional, integral e derivativo. Dependendo do processo em estudo, pode-se utilizar controlador PI (Proporcional Integral) ou apenas P (Proporcional).

No método da curva de reação, Ziegler e Nichols (CRZN) determina modelos que relacionam os parâmetros encontrados experimentalmente pelo método gráfico (K , θ e τ) com os parâmetros do controlador PID (K_C , τ_I e τ_D). Os parâmetros determinados pelo modelo de CRZN tanto para controle PID quanto para PI são descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros dos controladores PID e PI do modelo de Ziegler e Nichols.

	Expressões para controle PID	Expressões para controle PI
K_C	$\frac{1,2}{K} \left(\frac{\theta}{\tau} \right)^{-1}$	$\frac{0,9}{K} \left(\frac{\theta}{\tau} \right)^{-1}$
τ_I	2θ	$3,33 \theta$
τ_D	$0,5 \theta$	0

Fonte: Adaptado de Seborg *et al.*, 2017.

Para tornar o controle de um processo mais efetivo costuma utilizar métodos de otimização, que corresponde a um mecanismo para trabalhar com a melhor solução, na qual o procedimento compara os resultados com a melhor solução. Grande parte dos problemas existentes possuem mais de um objetivo, e para resolver estes problemas utiliza-se de simulações computacionais e otimizações multiobjetivo.

Os métodos de resolução de problemas de otimização como esses podem ser classificados em dois tipos, determinísticos (ou clássicos) e não-determinísticos (meta-heurísticos, evolutivos ou randômicos). Os métodos clássicos possuem uma convergência prematura devido a dificuldade que possuem de lidar com mínimos locais. Enquanto os métodos não determinísticos são métodos evolutivos, com estratégias de solução do problema baseada em comportamentos observados na natureza, ou bio-inspirados. No qual possuem como característica principal encontrar várias soluções ótimas em uma única simulação, devido a sua abordagem de pesquisa baseada na população.

Um exemplo é o algoritmo colônia de vagalumes (ACV) que é baseado na bioluminescência dos vagalumes. A bioluminescência tem uma influência sobre os vagalumes, já que um vagalume é atraído pelo outro devido a luminosidade que emitem.

Segundo Yang (2010), existem três funções associadas a bioluminescência: i) ferramenta de comunicação e atração para acasalamento; ii) isca para atração de possíveis presas; iii) mecanismo de alerta para potenciais predadores.

O algoritmo proposto por Yang (2010) considera as seguintes hipóteses:

- a) Os vagalumes são unissex e podem ser atraídos pelo outro;
- b) A atratividade é diretamente proporcional a luminosidade e diminui com o aumento da distância entre eles. Se não houver um vagalume mais brilhante que os demais, todos se moverão aleatoriamente;
- c) A luminosidade de um vagalume é estabelecida pela função objetivo.
- d)

A intensidade da luz diminui com o aumento da distância entre os vagalumes determinada pela equação 7.

$$I = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (7)$$

Na qual I_0 representa a intensidade inicial, r a distância euclidiana entre os vagalumes e γ a absorção da luz. A atratividade é proporcional a intensidade da luz e representa o quanto os vagalumes estão próximos, podendo ser expressa pela equação 8, onde β_0 é a atratividade inicial em $r = 0$.

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (8)$$

A movimentação do vagalume representa o movimento das soluções no espaço de busca do problema. Este movimento depende de três fatores: atratividade (β), absorção da luz pelo meio (γ) e aleatoriedade (α). O movimento do vagalume i , em direção ao vagalume j mais brilhante é definida pela equação 9.

$$x_{i+1} = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha \text{scale}(\text{rand} - 0.5) \quad (9)$$

Na qual o primeiro termo representa a posição atual do vagalume, o segundo termo a atratividade do vagalume e a intensidade da luz vista pelos outros vagalumes e por fim o terceiro termo indica o movimento aleatório. Onde α é o fator de aleatoriedade, $rand$ é um gerador de números aleatórios dentro de um intervalo [0;1] e $scale$ é um vetor que garante que o vagalume esteja dentro do domínio especificado.

Escrito em forma de pseudocódigo, o ACV é demonstrado pela Tabela 2.

Tabela 2: Algoritmo Colônia de Vagalumes.

Início

Definir a função objetivo $J(x)$, $x = (x_1, x_2, \dots, x_D)^T$

Definir os parâmetros do ACV

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

 Calcular a intensidade da luz l_i para x_i proporcionalmente a $J(x_i)$

Para $j = 1$ até o número de vagalumes

 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

Pós-processamento e visualização dos resultados

Fim

Fonte: Correa, 2019.

Em que $J(x)$ corresponde a função objetivo, (x_1, x_2, \dots, x_D) representam as variáveis de interesse, que o algoritmo fornece ao finalizar o número de iterações. Para a simulação existe a dependência de alguns parâmetros tais como tamanho da população, número de interações, parâmetro de aleatoriedade, parâmetro de atratividade e absorção da luz.

Outro exemplo é o algoritmo evolução diferencial é baseado na evolução natural, tendo como o objetivo manter a diversidade da população e obter a melhor solução. Na evolução diferencial existem três processos: mutação, cruzamento e seleção.

A população inicial é constituída por N_p indivíduos que cobre todo o espaço de busca. Na mutação ocorre a geração de novos indivíduos chamados vetores modificados, pela adição da diferença ponderada entre dois indivíduos aleatórios da população a um terceiro indivíduo. O processo de mutação pode ser descrito na equação 10.

$$v(i)^{(g+1)} = x_{r1}^{(g)} + F \cdot (x_{r3}^{(g)} - x_{r2}^{(g)}) \quad (10)$$

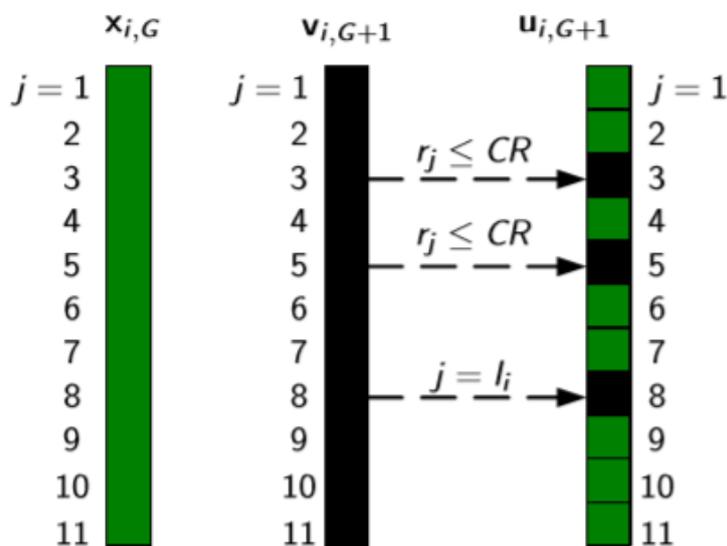
Em que $v(i)$ representa o vetor modificador; x_{r1}, x_{r2} e x_{r3} vetores distintos escolhidos aleatoriamente e F fator de perturbação.

O processo de cruzamento tem como objetivo aumentar a diversidade dos indivíduos que sofreram a mutação. Então a criação do vetor experimental se dá pela mistura dos componentes do indivíduo modificador com as componentes de um indivíduo escolhido aleatoriamente, chamado de vetor alvo. A estratégia da criação do vetor experimental está descrita na equação 11.

$$u(i)^{g+1} = \begin{cases} v(i)^{g+1}, & \text{se } rand_i \leq CR \\ x_s(i)^g, & \text{se } rand_i > CR \end{cases} \quad (11)$$

Onde $u(i)$ representa o vetor experimental, $v(i)$ vetor modificador, $x_s(i)$ vetor alvo, $rand$ um número gerado aleatoriamente no intervalo [0,1] e CR a probabilidade do cruzamento. A Figura 3 é uma representação do processo de cruzamento de acordo com Boccato, Attux & Zuben (2009).

Figura 3: Processo de cruzamento.



Fonte: Boccato et al., 2009.

Após a etapa de cruzamento, acontece a seleção que tem como objetivo escolher o melhor indivíduo utilizando a função objetivo. Esse processo baseia no estudo da função objetivo, ou seja, se o vetor experimental tiver um menor fitness que do vetor alvo, então na

próxima geração o vetor experimental será o vetor alvo. Assim o processo de seleção pode ser expresso pela equação 12.

$$\begin{cases} \text{Se } f(u(i)^{g+1}) \leq f(x_s(i)^g), \text{ então } x_s(i)^{g+1} = u(i)^{g+1} \\ \text{Se } f(u(i)^{g+1}) > f(x_s(i)^g), \text{ então } x_s(i)^{g+1} = x_s(i)^g \end{cases} \quad (12)$$

Assim como o ACV, no desenvolvimento do AED (algoritmo de evolução diferencial) há a dependência depende de alguns parâmetros essenciais tais como tamanho da população, fator de perturbação e probabilidade de cruzamento e número de interações.

Conforme descrito no pseudocódigo por Silva, Neto, e Martins (2011), o algoritmo evolução diferencial é demonstrado pela Tabela 3.

Tabela 3: Algoritmo Evolução Diferencial Multiobjetivo.

Início

t := 1

Inicializa população $X_t := \{x_{t,1} \ x_{t,2} \ \dots \ x_{t,N}\}$

enquanto not (Critério de parada) **faça**

para i = 1 até i = N **faça**

 Selecione aleatoriamente $r1, r2, r3 \in \{1, 2, \dots, N\}$

 Selecione aleatoriamente $\delta_i \in \{1, 2, \dots, N\}$

para j = 1 até j = n **faça**

se $U(0, 1) < C \vee j = \delta_i$ **então**

$u_{t,i,j} := x_{t,r1,j} + \eta(x_{t,r2,j} - x_{t,r3,j})$

senão

$u_{t,i,j} := x_{t,i,j}$

fim se

fim para

fim para

$X_{aux} := \{x_{t,i} \mid N \ i=1 \cup \{u_{t,i} \mid N \ i=1\}$

$X_{t+1} := \text{dominancia}(X_{aux}, N)$

 t := t + 1

Fim enquanto

Fonte: Silva *et al.*, 2011.

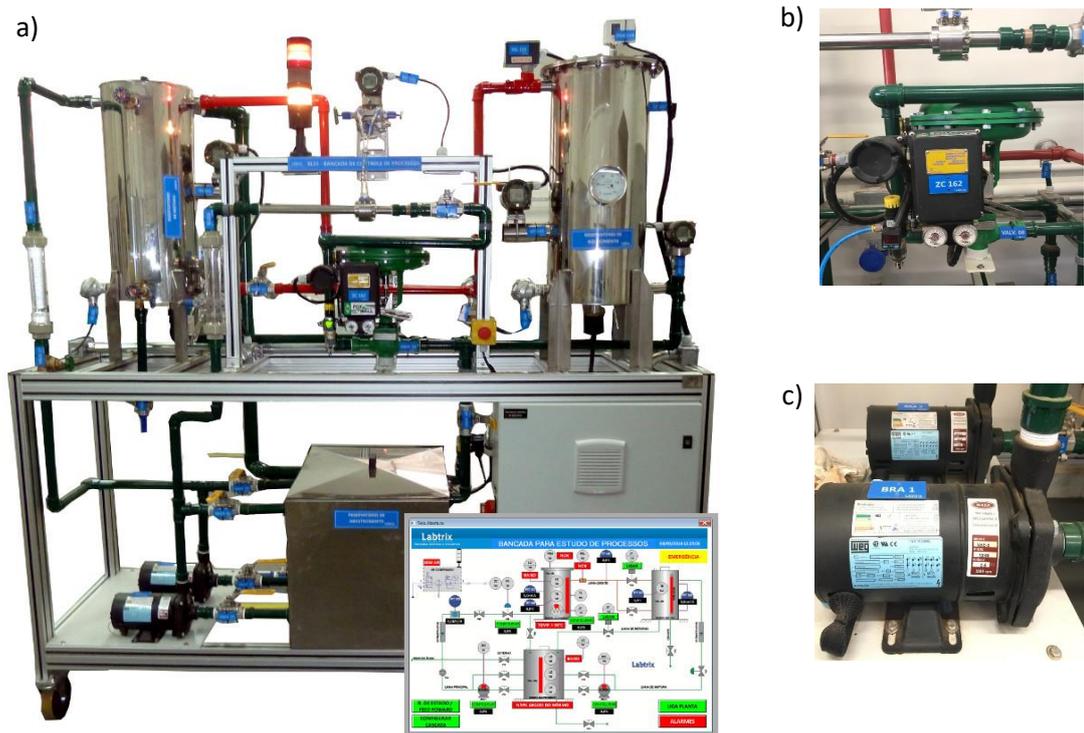
Portanto o objetivo geral do presente trabalho foi comparar os dois algoritmos meta-heurísticos, evolução diferencial e o bio-inspirado (colônia de vagalumes) no projeto de controle PI e PID aplicado em planta piloto, considerando dois elementos finais de controle distintos (válvula e bomba) para controle de nível.

2. Metodologia

2.1 Planta modelo XL33, fabricante Labtrix®

A planta utilizada para testes está localizada na Universidade Federal do Triângulo Mineiro, no Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas, é demonstrada na Figura 4.

Figura 4: Planta modelo XL33 (a), válvula (b) e bomba (c).



Fonte: Adaptado de Labtrix, 2019.

Para os testes deste trabalho foram utilizados o reservatório inferior e o de nível. O objetivo do estudo é o controle de nível, então foi utilizado a válvula V08 (Figura 4a) e a bomba BRA1 (Figura 4b) como elementos finais de controle. Para o supervisor utilizou-se do *software* Elipse Scada®, adquirido juntamente com a planta.

2.2 Modelagem da planta

Para a determinação dos parâmetros do modelo da planta foi utilizado a modelagem clássica através do método gráfico ou método da curva de reação. Este procedimento foi realizado considerando como elemento final de controle a válvula e a bomba.

Para a modelagem da planta levando em conta o elemento final de controle a válvula, definiu-se a potência da bomba em 80%, iniciando assim o processo com 25% de abertura da válvula e com uma vazão de 0,9 m³/h em um nível de 11,6 cm. Aplicou a perturbação no sistema, abrindo a válvula em 35% e conseqüentemente a vazão aumentou-se para 1,15 m³/h, levando o nível a estabilizar-se em 41,2cm.

Para a bomba como elemento final de controle, foi utilizado o mesmo procedimento. Primeiramente definiu a abertura a válvula em 40% e assim iniciou-se a potência da bomba em 64% e vazão em 0,95 m³/h, assim o nível inicial foi de 11,4 cm. Aplicando uma perturbação, aumentou-se a potência da bomba para 74%, assim a vazão foi para 1,125 m³/h e o nível estabilizou-se em 37,5cm.

Os dados descritos para a modelagem da planta tanto para bomba quanto para válvula podem ser demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4: Dados de operação e de perturbação da bomba e válvula.

Dados de operação		
Grandeza	Bomba	Válvula
Potência da Bomba (%)	64	80
Abertura da válvula (%)	40	25
Vazão (m ³ /h)	0,95	0,9
Nível (cm)	11,4	11,6

Dados da perturbação		
Grandeza	Bomba	Válvula
Potência da Bomba (%)	74	80
Abertura da válvula (%)	40	25
Vazão (m ³ /h)	1,12	0,9
Nível (cm)	37,5	11,6

Fonte: Autores, 2019.

Os pontos experimentais foram coletados a cada 30 segundos, pois o supervisório não possui sistema de aquisição de dados automático. O tempo de amostragem foi

estabelecido em virtude de testes prévios, notando que a cada 30 segundos não haveria perda de características no comportamento do sistema.

2.3 Modelo curva de reação Ziegler-Nichols

As simulações do modelo de curva de reação Ziegler – Nichols (CRZN) foram executadas no *software* Scilab[®] utilizando as equações dos parâmetros já estabelecidos pelo modelo. As simulações foram realizadas para os elementos finais de controle, bomba e válvula, e assim projetou-se os controladores PI e PID.

2.4 Algoritmo de colônia de vagalumes

Para implementação do algoritmo de colônia de vagalumes utilizou-se o *software* Scilab[®]. Definiu-se os parâmetros de acordo com os estudos feitos na área, assim considerou-se o tamanho da população $NP = 20$; número de interações $Max_{Gen} = 250$; parâmetro de aleatoriedade $\alpha = 0,5$; parâmetro de atratividade $\beta = 0,2$ e absorção de luz pelo meio $\gamma = 1$

As simulações foram realizadas considerando o elemento final de controle a válvula e a bomba e para cada foram simulados controladores PI e PID. O Algoritmo de colônia de vagalume (ACV) tem como função objetivo minimizar a soma do quadrado do erro do sinal de saída da variável controlada, estabelecida pela equação 13.

$$\min = \sum (y_{sp} - y)^2 \quad (13)$$

2.5 Algoritmo de evolução diferencial

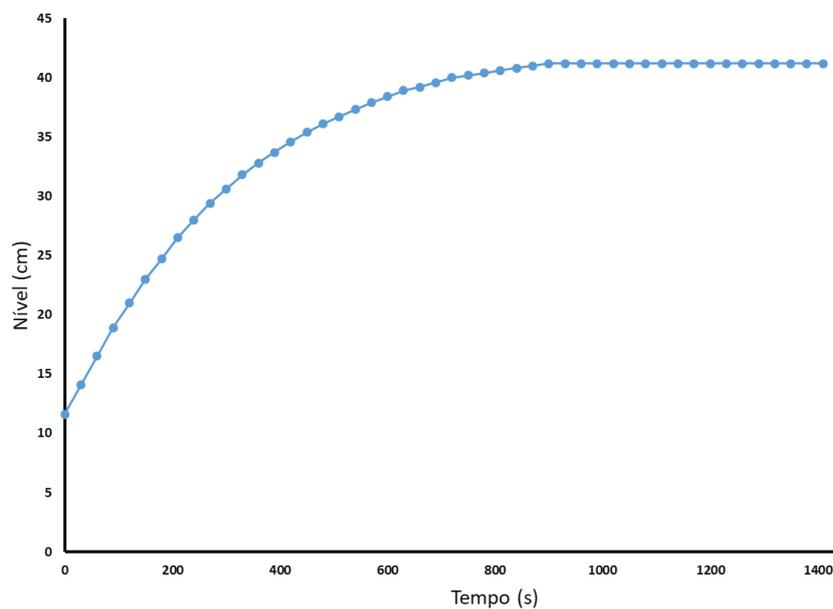
Analogamente ao ACV, as simulações do algoritmo de evolução diferencial (AED) foram executadas no Scilab[®] tanto para a válvula quanto para a bomba, projetando assim controladores PI e PID. Para a execução das simulações do AED, foram definidos os valores dos parâmetros: tamanho da população $NP = 20$; número de interações $itermax = 250$; fator de perturbação $F = 0,8$ e probabilidade de cruzamento $CR = 0,8$.

O AED tem o mesmo objetivo que o ACV, tem como função objetivo minimizar a soma do quadrado do erro do sinal de saída da variável controlada, estabelecida pela equação 13.

3. Resultados e Discussão

Primeiramente, foi obtido a curva de reação para a válvula como elemento final de controle, representada na Figura 5.

Figura 5: Curva de reação para a válvula.



Fonte: Autores, 2019.

Utilizando os conceitos descritos na Figura 1 e relacionando com a Figura 5, foi possível obter os parâmetros da função de transferência da planta de primeira ordem, descritos nas equações 14 e 15.

$$K = 118,4 \quad (14)$$

$$\tau = 380 \text{ s}^{-1} \quad (15)$$

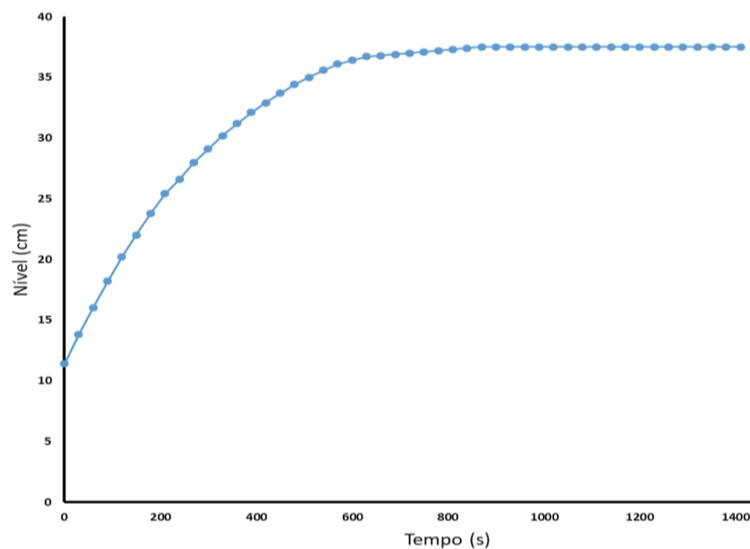
De acordo com o método gráfico, o valor de θ na curva de reação é zero. Porém para executar o modelo de Ziegler – Nichols é necessário um valor para tempo morto, logo foi utilizado um θ de 0,8s para projeto dos controladores.

Com os parâmetros obtidos, obteve-se a expressão da função de transferência da planta, descrita na equação 16.

$$G_P(s) = \frac{118,4}{380s + 1} \quad (16)$$

Analogamente a válvula, a curva de reação foi obtida para a bomba utilizando a planta, demonstrada na Figura 6.

Figura 6: Curva de reação para a bomba.



Fonte: Autores, 2019.

Utilizando a curva de reação encontrada para a bomba, foi possível obter os parâmetros da função de transferência da planta de primeira ordem, mostrados nas equações 17 e 18, utilizando o método gráfico descrito na Figura 1.

$$K = 149,14 \quad (17)$$

$$\tau = 350 \text{ s}^{-1} \quad (18)$$

Analogamente a válvula, utiliza-se o mesmo raciocínio para a bomba como elemento final de controle, o valor de θ na curva de reação é zero. Porém para executar o modelo de Ziegler – Nichols é necessário um valor para tempo morto, logo foi utilizado um θ de 0,8s para projeto dos controladores.

Com os parâmetros determinados, obteve-se a equação que representa a função de transferência da planta, descrita na equação 19.

$$G_P(s) = \frac{149,14}{350s + 1} \quad (19)$$

A partir dos parâmetros da planta foram simulados no Scilab os modelos de CRZN, ACV e AED para a sintonia dos controladores PI e PID, com intuito de determinar os parâmetros dos controladores que estabilizam no valor desejado. Os parâmetros encontrados dos controladores para a válvula como elemento final de controle estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros dos controladores para a válvula.

Modelo		K_C	τ_I	τ_D
Ziegler -Nichols	PI	3,61	2,66	0
	PID	4,81	1,60	0,40
Colônia de Vagalume	PI	20	70,28	0
	PID	20	64,55	0,05
Evolução Diferencial	PI	20	70,26	0
	PID	20	69,70	0,05

Fonte: Autores, 2019.

Analogamente a válvula, considerando a bomba como elemento final de controle, obteve-se então os parâmetros dos controladores para os mesmos três métodos, demonstrados na Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros dos controladores para a bomba.

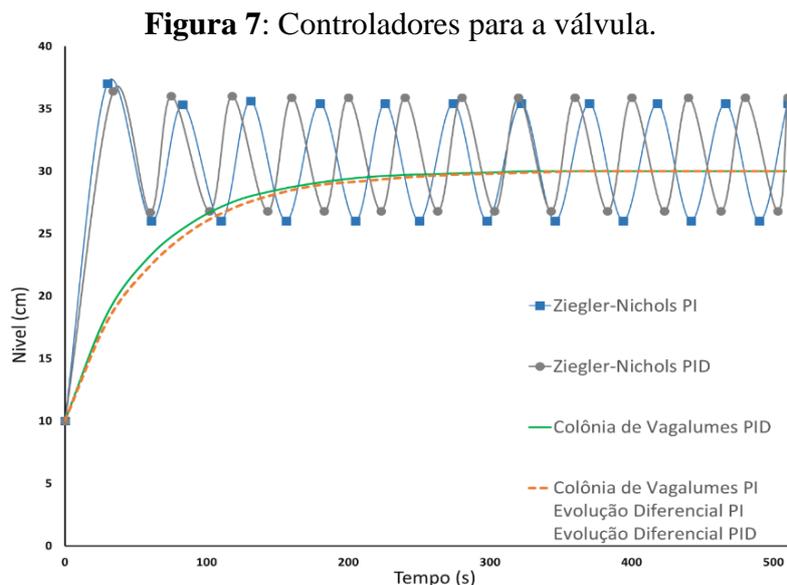
Modelo		K_C	τ_I	τ_D
Ziegler -Nichols	PI	2,64	2,66	0
	PID	3,52	1,60	0,40
Colônia de Vagalume	PI	20	69,35	0
	PID	20	67,28	0,05
Evolução Diferencial	PI	20	69,35	0
	PID	20	67,28	0,05

Fonte: Autores, 2019.

Os parâmetros dos controladores encontrados através das simulações foram então implementados na planta, um de cada vez. Foram coletados os dados no tempo de 30s,

obtendo assim o gráfico representativo utilizando a válvula como elemento final de controle, representado na Figura 7.

Percebe-se pelos valores que o método clássico apresentou valores bem abaixo dos demais métodos, isso se dá devido à dificuldade que esse tipo de técnica tem em trabalhar com mínimos locais, pois apresentam uma convergência prematura. Enquanto os demais apresentam valores maiores depois de ter feito comparações de inúmeras soluções, mostrando a predição e exatidão das técnicas.



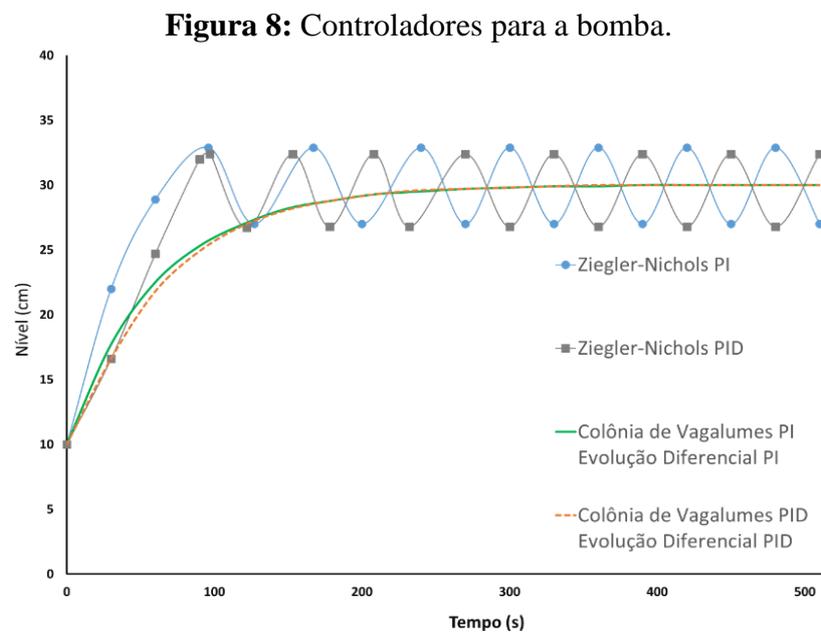
Analisando os resultados experimentais obtidos, pode-se perceber que o controlador implementado pelo método de Ziegler-Nichols não apresentou o comportamento esperado, uma vez que o estado estacionário não foi atingido. Pois este método se baseia em um quarto de decaimento, o que faz geralmente a resposta ser oscilatória como ocorreu tanto para o controlador PI como para o PID. Diferente dos outros quatro controladores em estudo que não tiveram nenhum *overshoot* (desvio máximo do valor da variável controlada, com o valor do *setpoint*) e controlaram o sistema no *setpoint* desejado de 30cm.

O controlador PID otimizado pelo algoritmo de colônia de vagalumes foi o que apresentou o menor tempo de controle de aproximadamente 330s, seguido pelo também PID porém otimizado pelo algoritmo evolução diferencial com um tempo de controle de 360s, e por fim, o PI de colônia de vagalumes com 360s e evolução diferencial com 390s.

O controlador PID por colônia de vagalumes apresentou uma exigência maior do sistema, podendo analisar que seu comportamento foi acima dos demais enquanto os

controladores PI e PID por evolução diferencial se apresentaram mais conservadores e mesmo assim alcançaram o *setpoint* rapidamente quando submetido à perturbação.

Analogamente a válvula, o mesmo processo foi executado para a bomba obtendo-se assim o gráfico das respostas do sistema para a atuação de cada controlador projetado controladores, demonstrado na Figura 8.



Fonte: Autores, 2019.

Fazendo a análise da mesma forma que foi realizado para a Figura 7. Os dados obtidos, demonstra que novamente os controladores projetados pelo método de Ziegler-Nichols não controlaram o sistema no *setpoint* de 30 cm, também apresentando ação oscilatória tanto para o PI quanto para o PID. Da mesma forma, os outros quatro controladores estudados apresentaram controle do sistema sem apresentar nenhum *overshoot*, o que é bom, visto que não realiza muito esforço do sistema.

Com relação ao tempo de controle os dois controladores PI apresentaram aproximadamente 390s necessários para controlar em 30cm de nível, enquanto os controladores PID gastaram 360s para atingir o *setpoint* e sendo mais conservadores que os PI, realizando o mínimo esforço da variável manipulada.

Para sistemas não muito complexos e que não apresentam *offset* é normalmente utilizado controlador PI pois geralmente não possui a necessidade corrigir *offset*. Este sistema em estudo não é um caso complexo, então a utilização de um derivativo poderia causar algumas oscilações, mas devido as condições de processos pode-se perceber que o PID não

afetou negativamente o sistema, apenas contribuiu para torná-lo conservador como o desejado.

O método de Ziegler-Nichols necessita de tempo morto, para projeto dos controladores foi utilizado um θ de 0,8s. E para os métodos de colônia de vagalumes e evolução diferencial ambos foram realizados sem tempo morto, conforme os modelos das equações 16 e 19.

4. Considerações Finais

Com o intuito de comparar algoritmos evolução diferencial, colônia de vagalumes e o método clássico de Ziegler Nichols no projeto de controle PI e PID. O método clássico não se mostrou satisfatório a princípio para o controle de nível da Planta Piloto XL33, considerando a não utilização de sintonia fina, enquanto os controladores utilizando otimização foram satisfatórios, apresentando uma excelente base de resultados.

Estabelecendo como critério de performance o mínimo esforço possível da variável manipulada. Resultou-se que as respostas não apresentaram *overshoots*, sendo algo interessante visto que se buscava por um sistema conservador, além de que os controladores demonstraram um tempo médio de assentamento de 330s, que corresponde a um tempo aceitável para controle de nível. Conclui-se também que ambos algoritmos de otimização são bons métodos para o projeto de controladores.

O supervisor utilizado na planta piloto não possui sistema de aquisição de dados automático, ou seja, ao final da execução do processo, não há a possibilidade de exportar os pontos experimentais, que neste trabalho, foram coletados a cada 30 segundos, escolhido após testes prévios, e sem perda de características do comportamento do sistema, conforme visualizado nas Figuras 5, 6 7 e 8. Esta é a principal limitação do processo abordado neste trabalho, sendo assim, faz-se necessário para implementação do sistema de aquisição automático, no futuro, possibilitando um maior número de pontos, e melhor observação do comportamento do sistema.

Outra abordagem para trabalhos futuros, seria o estudo da implementação de um monitoramento do sistema de controle, capaz de detectar e localizar falhas.

Referências

Bocato, L., Attux, R. R. F., & Zuben, F. J. V. (2009). *Evolução Diferencial: Introdução e Conceitos Básicos*. Recuperado de:
http://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:95Wqnr8uHEJ:scholar.google.com/&hl=pt-BR&as_sdt=0,5&as_vis=1

Correa, V. (2019). *Projeto de Controlador PID Cascata em planta piloto, utilizando algoritmo de otimização Bio-inspirado*. Trabalho de Conclusão de Curso na Engenharia Química -UFTM Uberaba.

Elipse SCADA. (2020). (Versão 5.1) [Programa de computador]. Kaohsiung - Taiwan: Elipse.

Labtrix. (2019). *Portfolio Labtrix - Bancada para ensino de bancada*. Recuperado de:
<http://www.labtrix.com.br/portfolio-item/xl33-bancada-para-ensino-de-controle-de-processos>.

Ogata, K. (2010); *Engenharia de controle moderno* (5ª ed). Pearson Prentice Hall. Always Learning. 822p.

Scilab – Algos development. (2020). (Versão 6.1.0) [Programa de computador]. Rungis - França: Scilab.

Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A. & Doyle, F. J. (2017). *Process Dynamics and Control* (4ª ed). New Jersey: John Willey and Sons. 515p.

Silva, C. J., Neto, O. M. N. & Martins, F. V. C. (2011). Utilização de algoritmo de evolução diferencial multiobjetivo no projeto de controladores. Departamento de Engenharia Elétrica – UFMG, *In: X Congresso Brasileiro de Inteligência Computacional - CBIC*, Ceará., 7p.

Smith, C. A & Corripio A. (1997). *Principles and Practice of Automatic Process Control* (2ª ed). John Willey and Sons. 768p.

Yang, X. S. (2010). *Engineering Optimization: An Introduction With Metaheuristic Applications* (1° ed). United Kingdom: John Willey and Sons. 347p.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Matheus Divino Moraes Oliveira – 33,35%

Rubia Carolina Morais Silva – 33,35%

Davi Leonardo de Souza – 33,30%