



ALGORITMO GENÉTICO APLICADO À SINTONIA DE CONTROLADORES PID, COMPARADO AOS MÉTODOS DE SÍNTESE DIRETA, E ZIEGLER & NICHOLS I E II - - UM ESTUDO DE CASO

ANDRADE FILHO, A. de P.^{1*}, CRUZ JÚNIOR, G. da¹, CARDOSO, A. A.¹

¹Universidade Federal de Goiás, Programa de Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação
*e-mail: alfredofilho@discente.ufg.br

RESUMO - O Em muitas aplicações, sintonizar controladores PID (Proporcional Integral Derivativo) de maneira satisfatória é de suma importância para se obter ganhos de eficiência no processo. No contexto da indústria química, o desafio é ainda maior, devido a complexidade dos processos envolvidos, em cujo quais, a presença de tempo morto e a constante de tempo do sistema, geram grande impacto em sua resposta. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi realizar um estudo comparativo entre alguns dos principais métodos clássicos determinísticos que envolvem a sintonia desses controladores, à um GA (Algoritmo Genético). A metodologia empregada envolveu a utilização das equações do controlador, de uma planta de aquecimento por meio de vapor, e a aplicação prática do GA para obtenção dos parâmetros PID, que foram então simulados no software Matlab® Simulink. Os resultados encontrados, demonstram que a sintonia através do GA, se mostrou melhor em quase todos os aspectos.

Palavras-Chave: Algoritmos Genéticos, Sintonia de Controladores PID, Ziegler & Nichols.

I. INTRODUÇÃO

Dados atuais relacionados a área de automação e controle, nos mostram que em muitas aplicações, os controladores PID ainda são utilizados de forma ineficiente pois são mal sintonizados. No contexto da indústria química, o desafio é ainda maior, pois os processos químicos são naturalmente multivariáveis e com interações significantes entre as suas variáveis de entrada e de saída, demandando dos profissionais envolvidos, a necessidade de uma estratégia efetiva de sintonia e de simples implantação, mas necessariamente robusta. O objetivo deste artigo é realizar um estudo comparativo entre alguns dos principais métodos clássicos de sintonia, sendo estes, o método da Síntese Direta, método de Ziegler e Nichols I e II, e o emprego de uma algoritmo de aprendizagem

de máquina utilizando o conceito de Algoritmo Genético, atuando de forma não determinística, mas sim, buscando soluções candidatas em um universo restrito de possibilidades que são evoluídas a cada geração, se comportando de maneira análoga à evolução genética natural dos seres vivos.

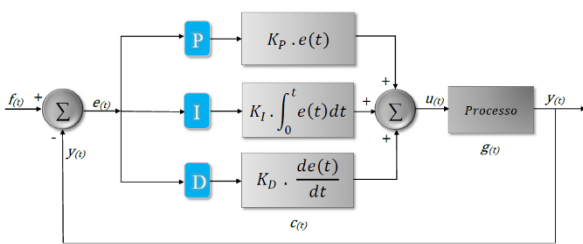
II. CONTROLADORES PID

A tarefa de projetar controladores PID, implementá-los, e principalmente sintonizá-los, é essencial para os profissionais da área, porém, em muitas situações, principalmente onde o problema é multiobjetivo, está pode-se tornar uma árdua tarefa.

Controladores PID são especialmente úteis devido a ação conjunta das ações proporcional, integral e derivativa (NISE,2014), conforme

ilustra a Figura 1, sendo que em relação a ação proporcional, esta, atua de forma direta e imediata no erro de controle. Além do mais, a ação proporcional não leva em consideração o desempenho passado do sistema, não se baseia na tendência de evolução do processo e apresenta erro de regime permanente na maioria dos casos. A sua principal vantagem é a simplicidade de implementação.

Figura 1 - Malha de Controle de Processo com controlador PID.



Fonte: Próprio Autor.

A ação Integral, por sua vez, atua de forma cumulativa em cada instante de amostragem considerando o incremento da área entre o erro de controle e o eixo horizontal. Ele é acumulado em uma posição de memória. Desta forma, a integral é calculada por meio do cálculo cumulativo da área. Passado o efeito da perturbação o saldo da integral contribui na determinação do valor final da variável de controle. A parcela integral tem como principal finalidade a eliminação do erro de regime permanente (NISE,2014).

A ação derivativa deve-se ao fato de a derivada indicar a tendência de variação de uma função que, neste caso, é o sinal de entrada, esta é então dita ação antecipatória ou preditiva e tende a fazer com que o sistema reaja mais rapidamente. Este fato faz com que a ação derivativa seja utilizada para a obtenção de respostas transitórias mais rápidas, ou seja, para a melhora do comportamento dinâmico do sistema em malha fechada (OGATA,2010).

As Equações 1, 2 e 3 apresentadas a seguir ilustram o modelamento matemático de um controlador PID (OGATA,2010). Considere a equação do controlador PID independente, conforme Figura 1.

$$u(t) = P * e(t) + I * \int_0^t e(t) dt + D * \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

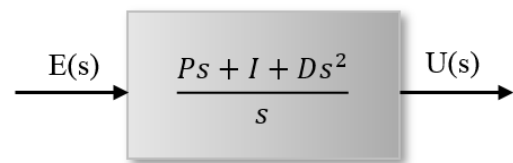
Aplicando-se Laplace, considerando-se o sistema em repouso, ou seja, com as condições iniciais nulas, obtém-se conforme Equação 2.

$$Us = P * Es + Is * Es + D * s * Es \quad (2)$$

Tomando-se a relação entre a entrada e a saída, obtém-se a função de transferência do controlador conforme Equação 3, e o bloco de controle C(s) conforme Figura 2.

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = P + \frac{I}{s} + Ds \quad (3)$$

Figura 2 - Função de Transferência do Controlador PID, C(s) em forma de equação independente.



Fonte: OGATA,2010

Assim, a sintonia de controladores PID visa satisfazer algumas especificações impostas sobre as características de regime transitório e estacionário da resposta do sistema que está sendo controlado. Geralmente, estas especificações recaem sobre os valores de Tempo de Subida (Tr), Tempo de Assentamento (Ts), Valor Máximo de Ultrapassagem (Mp) e um valor máximo de erro estacionário aceitável (NISE,2014; OGATA,2010).

A. Síntese Direta

Nas plantas de controle industriais, a maioria dos controladores PID são ajustados em campo, e o método da síntese direta é um dos mais eficazes e simples de se implementar, ainda mais quando não se conhece a função de transferência característica do processo. O método de sintonia por Síntese Direta consiste em se arbitrar uma constante de tempo desejada (τ_d), que aliada aos parâmetros da função de transferência, tempo morto ou atraso (d), ganho (k) e constante de tempo da função de transferência (τ), seja possível através das equações demonstradas em nas Equações 4:11, obter rapidamente os valores P e I do controlador PI (TEIXEIRA, 2020).

Considerando o sistema genérico ilustrado na Figura 1, Considere $G_d(s)$ como a função de

transferência de malha fechada após a aplicação do controlador $C(s)$. Desta forma, com as Equações 4:11 (TEIXEIRA, 2020), deseja-se que, em malha fechada, obtenha-se:

$$G_{eq}(s) = G_d(s) \quad (4)$$

$G_{eq}(s)$: Função de transferência equivalente.

$$G_{eq}(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} = G_d(s) \quad (5)$$

Considere também que o processo possa ser representado por uma função de transferência de primeira ordem com tempo, considere:

$$G(s) = \frac{k e^{-d*s}}{\tau s + 1} \quad (6)$$

Onde k é o ganho de estado estacionário do sistema, θ é tempo morto e τ é a constante de tempo do processo, deseja-se:

$$G_d(s) = \frac{1 e^{-d*s}}{\tau_d s + 1} \quad (7)$$

Pois, com ganho igual a 1, não haverá erro de regime permanente. A incógnita na Equação 5 é $C(s)$, isto é, deseja-se ajustar o controlador para que $G_{eq}(s) = G_d(s)$, aplicando na Equação 5 temos:

$$C(s)G(s) = G_d(s)[1 + C(s)G(s)]$$

$$\text{ou } \rightarrow C(s)G(s)[1 - G_d(s)] = G_d(s)$$

$$C(s) = \frac{G_d(s)}{G(s)[1 - G_d(s)]} \quad (8)$$

Substituindo as Equações 6 e 7 na Equação 8, tem-se:

$$C(s) = \frac{\frac{1 e^{-d*s}}{\tau_d(s) + 1}}{\frac{k e^{-d*s}}{\tau s + 1} \left[1 - \frac{e^{-d*s}}{\tau_d s + 1}\right]} \quad (9)$$

$$C(s) = \frac{\tau s}{k(\tau_d + d)s} + \frac{1}{k(\tau_d + d)s}$$

Obtém-se as expressões para P e I, sendo o primeiro termo da Equação 9, relativo ao ganho proporcional, e o segundo termo relativo ao ganho integral, o ganho derivativo não é considerado neste método.

$$P = \frac{\tau}{k(\tau_d + d)} \quad (10)$$

$$I = \frac{1}{k(\tau_d + d)} \quad (11)$$

B. Ziegler e Nichols II – “Curva de Reação”

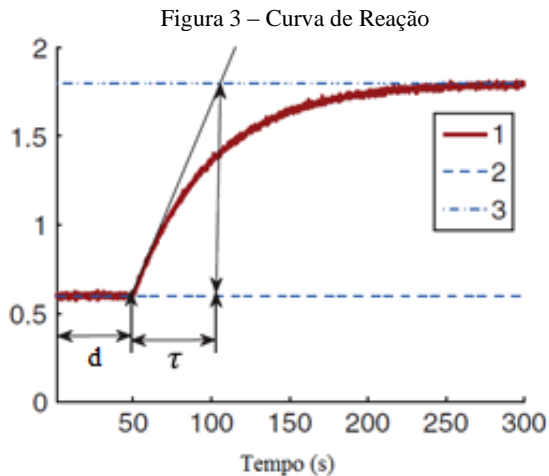
Na década de quarenta, o engenheiro químico John G. Ziegler e o matemático Nathaniel B. Nichols, buscando obter métodos para sintonizar as plantas de processos industriais, desenvolveram dois métodos para sintonia de controladores PID, os métodos foram desenvolvidos a partir da sintonia de muitas plantas diferentes, mas com características de respostas semelhantes.

Nesta seção abordaremos o método da Curva de Reação, sendo necessário para tal, entendermos que este método deve ser aplicado à sistemas com tempo morto relativamente grande, uma vez que sua aplicação em sistemas sem tempo morto ou com tempo morto reduzido podem gerar respostas transitórias indesejadas. Por este motivo, este método não é recomendado à maioria dos processos de automação de manufatura, cujo quais, ou não possuem tempo morto devido a rapidez exigida nos processos de, ou simplesmente não existem.

O método consiste em abrir a malha de retroação e aplicar uma excitação em degrau, e logo após observar e registrar o tempo morto ou atraso (d), ganho (k) que foi aplicado com a excitação em degrau, e a constante de tempo da função de transferência (τ), assim um gráfico poderá ser plotado ilustrando a resposta do sistema, a este gráfico se denomina Curva de Reação e este teste é denominado Teste da Resposta em Degrau.

Ao realizar este teste, o sinal de entrada da planta $u(t)$ sofre uma mudança gradual de um valor constante inicial $U(0)$ para um valor de operação normal, $U(s)$; a medição do sinal de saída da planta $y(t)$ em resposta à mudança de entrada em degrau nos dá os dados do teste de resposta ao degrau da planta ou a curva de reação (WANG, 2020). O teste de resposta é concluído quando o valor do sinal de saída atinge uma constante ou o sinal flutua em torno um valor constante devido ao ruído e perturbações, conforme ilustrado na Figura 3 (WANG, 2020).

A Figura 3, ilustra um conjunto típico de dados de teste de resposta ao degrau, com a aplicação do degrau ocorrendo no tempo $t = 0$.



Fonte: (WANG, 2020). (1) Resposta da Saída; (2) Posição de saída em regime permanente antes da resposta (Y_0); (3) posição de saída de estado estacionário em conclusão da resposta (Y_s);

Após a obtenção de d , k , e τ , com a resposta em degrau, é possível calcular então os parâmetros do PID através da Tabela 1, desenvolvida por (ZIEGLER & NICHOLS, 1943; NISE, 2014; CAMPOS & TEIXEIRA, 2010).

TABELA 1 - REGRAS DE AJUSTE ZIEGLER-NICHOLS COM CURVA DE REAÇÃO

	K_P	T_i	T_d
P	$\frac{\tau}{k * d}$	0	0
PI	$\frac{0.9 * \tau}{k * d}$	$\frac{0.3}{d}$	0
PID	$\frac{1.2 * \tau}{k * d}$	$\frac{0.5}{d}$	$0.5 * d$

Fonte: CAMPOS & TEIXEIRA, 2010

O primeiro método é conhecido como Curva de Reação, e é desenvolvido abrindo-se a malha de realimentação do sistema e aplicando-se uma entrada em degrau, já o segundo método é aplicado fechando-se a malha e aplicando um ganho limite até o que sistema sustente uma oscilação harmônica.

Como a Tabela 1 apresenta os ganhos na forma de equacionamento dependente, os ganhos devem ser transformados para a forma de equação independente sendo: P igual à K_P , I igual à $\frac{K_P}{T_i}$ e K_d igual à T_d . K_P .

C. Ziegler e Nichols I – “Ganho Limite”

A grande vantagem do emprego deste método de Ziegler e Nichols em relação ao anterior, é o fato que não é necessário conhecer a função de transferência que modela o sistema físico da planta para se sintonizar o controlador PID, as regras de ajuste são empregadas com a malha de retroação fechada, o que vai de encontro com a realidade de muitos processos industriais onde se torna inviável abrir a malha de retroação (WANG, 2020).

No teste de controle de malha fechada, o controlador é definido para o modo proporcional sem a presença dos ganhos Integrais e Derivativos.

O sinal de k deve ser o mesmo que o ganho de estado estacionário da planta por causa da introdução de retroação negativa no sistema de controle.

Para iniciar o experimento o ganho k deve ser iniciado com uma magnitude diminuta, e gradualmente ser elevado até que o sinal de controle $u(t)$ apresente uma oscilação sustentada.

Após a obtenção da oscilação sustentada, a forma de onda deve ser analisada, e dois parâmetros devem ser obtidos do gráfico, sendo eles o ganho k que foi capaz de produzir a oscilação sustentada, e o período T_0 da oscilação. Após a obtenção desses parâmetros, os mesmos devem ser aplicados a Tabela 2 para que os parâmetros do PID possam ser calculados, (ZIEGLER & NICHOLS, 1942; NISE, 2014; CAMPOS & TEIXEIRA, 2010),

TABELA 2 - REGRAS DE AJUSTE ZIEGLER-NICHOLS COM OSCILAÇÃO

	K_P	T_i	T_d
P	$0.5 * k$	∞	0
PI	$0.45 * k$	$\frac{T_0}{1.2}$	0
PID	$0.60 * k$	$\frac{T_0}{2}$	$\frac{T_0}{8}$

Fonte: CAMPOS & TEIXEIRA, 2010

Novamente, como a Tabela 2 apresenta os ganhos na forma de equacionamento dependente, os ganhos devem ser transformados para a forma de equação independente sendo: P = K_P ; I = $\frac{K_P}{T_i}$; D = T_d . K_P .

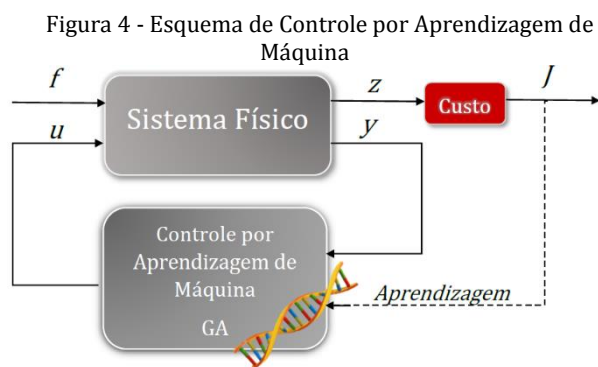
Um controle proporcional não causará oscilação sustentada para planta de primeira ordem e planta de segunda ordem com um zero estável, assim, a regra de ajuste não se aplica a estas duas classes de plantas estáveis (WANG, 2020).

D. Algoritmo Genético

A aprendizagem de máquina, mais conhecida por seu termo em inglês *Machine Learning*, está cada vez mais sendo utilizada em sistemas onde a modelagem física do problema é muito complexa, e como alternativa a uma abordagem determinística que classicamente vem sendo utilizada na sintonia de controladores PID na indústria ao longo de décadas.

A Figura 4 ilustra o esquema de controle de aprendizado de máquina envolvido em um sistema complexo usando retroação do ruído baseado em sensor. O objetivo do controle é minimizar uma função de custo (J) bem definida dentro o espaço de possíveis leis de controle. Um ciclo de aprendizagem *off-line* fornece dados experimentais para treinar o controlador.

A programação genética fornece um algoritmo particularmente flexível para pesquisar leis de controle. O vetor (z) contém todas as informações que podem contribuir para o custo (BRUNTON, 2019).

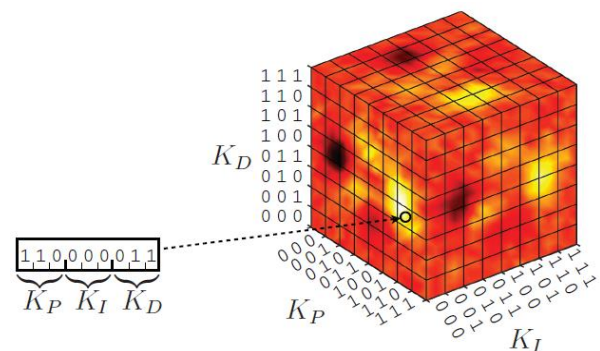


Fonte: Adaptado de (BRUNTON, 2019)

O algoritmo genético (GA) é um dos algoritmos mais antigos e simples para parâmetros de otimização, com base no princípio biológico de otimização por meio da seleção natural e *fitness* (HOLLAND, 1975). Em GA, uma população composta por muitas realizações de sistema com diferentes valores de parâmetro, compete para minimizar uma

determinada função de custo e parâmetro de sucesso os valores são propagados para as gerações futuras por meio de um conjunto de regras genéticas. Os parâmetros de um sistema são geralmente representados por uma sequência binária, como mostrado na Figura 5, para um sistema de controle PID com três parâmetros, dados pelos três ganhos de controle K_P , K_I e K_D (BRUNTON, 2019). Em seguida, uma série de realizações com diferentes valores de parâmetros, chamados de indivíduos, são inicializados em uma população e seu desempenho é avaliado e comparado com uma resposta considerada excelente (BRUNTON, 2019).

Figura 5 - Descrição do cubo de parâmetros para controle PID.



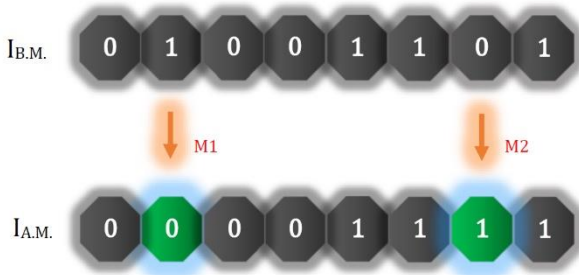
Fonte: BRUNTON, 2019

Indivíduos bem-sucedidos com um custo menor têm uma probabilidade maior de ser selecionados para avançar para a próxima geração, de acordo com as seguintes operações genéticas:

Elitismo (opcional): Um número definido dos indivíduos mais aptos e com o melhor desempenho são avançados diretamente para a próxima geração; **Replicação**: um indivíduo é selecionado para avançar para a próxima geração; **Cruzamento**: dois indivíduos são selecionados para trocar uma parte de seu código e, em seguida, avançar para a próxima geração; crossover serve para explorar e aprimorar estratégias de sucesso; **Mutação**: um indivíduo é selecionado para ter uma parte de seu código modificado com novos valores, conforme Figura 6, sendo o termo IBG utilizado para designar o indivíduo antes da operação de Mutação, e IAG após. A mutação promove diversidade e serve para aumentar a exploração do parâmetro espaço.

Para as operações de replicação, cruzamento e mutação, os indivíduos são selecionados aleatoriamente para avançar para a próxima geração com a probabilidade de seleção aumentando com a adequação. Essas gerações são evoluídas até que a aptidão dos melhores indivíduos converta ou outros critérios sejam atendidos (BRUNTON,2019).

Figura 6 – Mecanismo de Mutação em GA



Fonte: Próprio Autor.

Os indivíduos da geração k são avaliados e classificados em ordem crescente com base em sua função de custo, conforme Figura 7, que é inversamente proporcional à sua probabilidade de seleção para operações genéticas. Então, os indivíduos são escolhidos com base nesta probabilidade ponderada de avanço para a geração $k + 1$ usando as quatro operações: elitismo, replicação, cruzamento e mutação. Isso forma a geração $k + 1$, e a sequência é repetida até que as estatísticas populacionais convergem ou outro critério de parada adequado seja alcançado.

Figura 7 – Algoritmo Genético

```

Algorithm 1 The Genetic Algorithm (GA)
1: function GENETICALGORITHM()
2:   popsize  $\leftarrow$  Desired population size ▷ This is basically  $\lambda$ 
3:    $P \leftarrow \{\}$ 
4:   for popsize times do
5:      $P \leftarrow P \cup \{\text{New random individual}\}$ 
6:    $Best \leftarrow \emptyset$ 
7:   repeat
8:     for each individual  $P_i \in P$  do
9:       AssessFitness( $P_i$ )
10:      if  $Best = \emptyset$  or Fitness( $P_i$ ) > Fitness( $Best$ ) then
11:         $Best \leftarrow P_i$ 
12:      $Q \leftarrow \{\}$ 
13:     for popsize/2times do
14:       Parent  $P_a \leftarrow$  Selection( $P$ )
15:       Parent  $P_b \leftarrow$  Selection( $P$ )
16:       Children  $C_a, C_b \leftarrow$  Crossover( $Copy(P_a), Copy(P_b)$ )
17:        $Q \leftarrow Q \cup \{\text{Mutate}(C_a), \text{Mutate}(C_b)\}$ 
18:      $P \leftarrow Q$ 
19:   until  $Best$  is the ideal solution or we have run out of time
20:   return  $Best$ 

```

Fonte: LUKE, 2013

A função *AssessFitness()*, recebe como entrada a Função de Transferência do Processo a ser avaliado, já com a influência do Tempo Morto, os parâmetros (K_p), (K_i) e (K_d)

fornecidos pelo algoritmo para iteração corrente, os valores desejados dos Parâmetros de Projeto sendo eles: (TrD), (TsD), (MpD) e (EssD), e, por fim, uma sequência de quatro números, cada qual representando o peso da probabilidade de influência sobre determinado parâmetro, o que é uma possibilidade de enviar o algoritmo para que priorize certos parâmetros, uma vez que o problema é multiobjetivo.

GA fornece um meio termo entre uma busca de força bruta e uma otimização convexa, e é uma alternativa à amostragem cara de Monte Carlo, que não é escalonada para alta dimensão espaços de parâmetros. No entanto, não há garantia de que os algoritmos genéticos irão convergir para uma solução globalmente ideal. Há também uma série de hiper parâmetros que podem afetar desempenho, incluindo o tamanho das populações, número de gerações e taxas de seleção das várias operações genéticas (KAISER et al., 2017).

III. DESENVOLVIMENTO

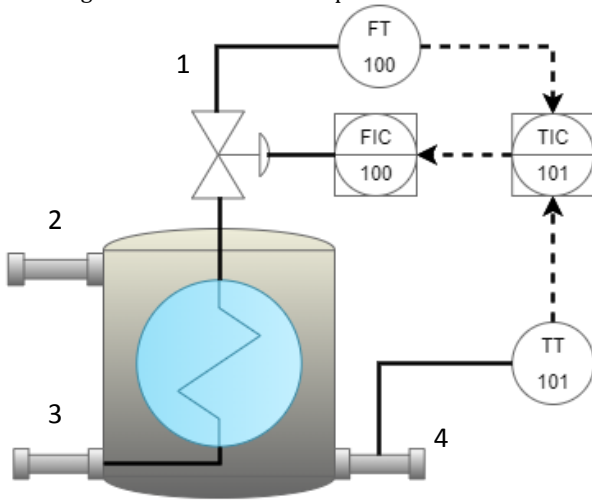
Nesta seção são apresentados os métodos utilizados para o desenvolvimento do estudo comparativo entre a sintonia de controladores PID utilizando algoritmos determinísticos em comparação ao emprego dos algoritmos genéticos.

A. Estudo de Caso

Será utilizado um estudo de caso, conforme ilustrado na Figura 8, na qual é apresentado um trecho de um diagrama P&ID de uma planta na qual se deseja controlar a temperatura de um reator através da injeção de vapor em um trocador de calor que se encontra dentro do reator químico.

Nota-se no diagrama, que foi inserido uma malha escrava, tendo por objetivo verificar a vazão de vapor efetiva que entra no reator, uma vez que é de conhecimento prático que a linha de vapor ao sair da caldeira, passa por vários percursos diferentes e pode sofrer ao longo do processo quedas na vazão efetiva de vapor de acordo com a variação da demanda dos demais processos que dele necessitam.

Figura 8 - Controle de Temperatura em Reator



Fonte: Próprio Autor. (1) Entrada de Vapor; (2) Entrada do Fluido; (3) Condensado; (4) Saída do Fluido;

Assim o *Set Point*, ou valor desejado, será a temperatura interna do reator que é fornecida pelo usuário do sistema, que por sua vez influenciará o controle da vazão de vapor que efetivamente irá provocar mudanças na temperatura do reator em função de sua vazão de entrada no mesmo.

Para verificar o comportamento esperado da planta mediante a atuação do controlador PID, em cada método de sintonia a ser avaliado, serão utilizados os dados de uma ação proposta ao processo.

Considerando que a temperatura no trocador de calor inicialmente estava em 80°C recebendo uma injeção de 2000 Kg/h de vapor, e que para fins de obtenção de dados para a sintonia dos controladores, o operador responsável aumentou de forma manual a vazão de vapor para 2200 Kg/h, e observou-se que a temperatura se estabilizou-se em 85°C, no gráfico de tendências pôde ser observar um tempo morto de 2 minutos, e uma constante de tempo de 16 minutos.

Os *ranges* dos instrumentos utilizados vão de 0 a 5000 Kg/h para o transmissor de vazão e de 0 a 200°C para o transmissor de temperatura.

B. Obtenção da Função de Transferência do Processo

Para a obtenção da Função de Transferência do processo, será utilizado uma abordagem experimental, na qual serão utilizados os *ranges* dos instrumentos envolvidos e as constantes de tempo obtidas pelo gráfico de tendências do processo.

O sistema em questão pode ser aproximado de um sistema de controle de primeira ordem, sendo aproximado matematicamente pela Equação 6, assim, de acordo com os parâmetros informados no gráfico de tendências temos na Equação 12 (TEIXEIRA, 2020):

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta f} \quad [12]$$

$$k = \frac{\frac{85^\circ - 80^\circ}{200^\circ - 0^\circ}}{2200 \left[\frac{kg}{h} \right] - 2000 \left[\frac{kg}{h} \right]}{5000 \left[\frac{kg}{h} \right] - 0 \left[\frac{kg}{h} \right]}$$

$$k = 0,625$$

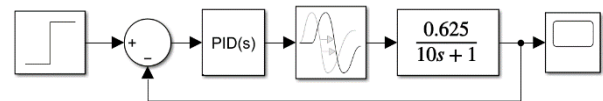
Assim, considerando $d=0,5$, $\tau=10$, $k=0,625$ e conforme Equação 6, temos na Equação 13 a função de transferência do processo.

$$G(s) = \frac{0,625 e^{-0,5s}}{10s + 1} \quad [13]$$

C. Simulação

Para simulação do processo utiliza-se o software Matlab® com a ferramenta Simulink, na qual o diagrama de blocos do processo é mostrado na Figura 9, onde é possível notar que o sistema possui a presença de tempo morto, apesar de pequeno, que é uma característica do caso de uso escolhido, além da presença da planta e do controlador PID.

Figura 9 - Diagrama de Blocos do Processo no Matlab® Simulink.

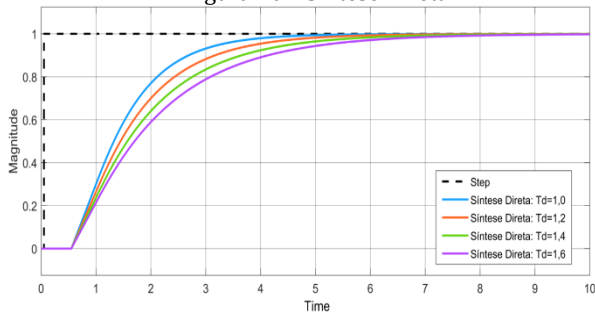


Fonte: Próprio Autor.

IV. RESULTADOS

A Figura 10 ilustra o resultado com a aplicação da Síntese Direta, mediante os diversos valores de T_d . Verifica-se que a melhor simulação para a Síntese Direta, se deu quando T_d é igual a 1.

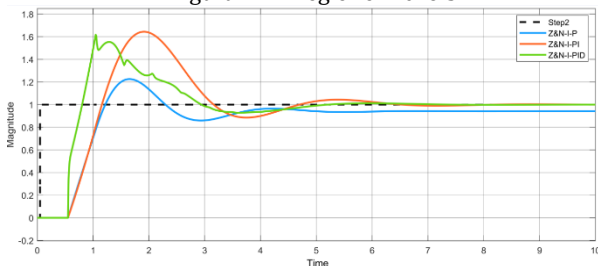
Figura 10 – Síntese Direta



Fonte: Próprio Autor.

Já para a resposta obtida com a aplicação determinística de Ziegler e Nichols I, Figura 11, nota-se que os melhores resultados foram obtidos ajustando o controlador com PI e PID, sendo que somente o proporcional não conseguiu eliminar o erro de regime.

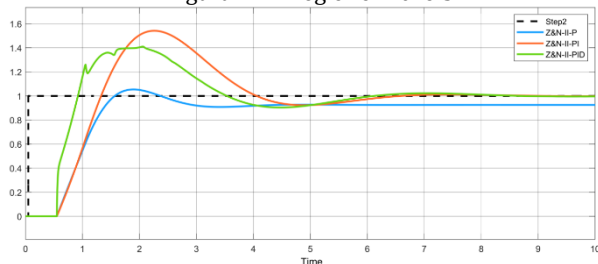
Figura 11 - Ziegler e Nichols I



Fonte: Próprio Autor.

Os resultados alcançados com Ziegler e Nichols II são apresentados na Figura 12, onde é possível notar que a melhor solução foi para o controlador PID.

Figura 12 - Ziegler e Nichols II



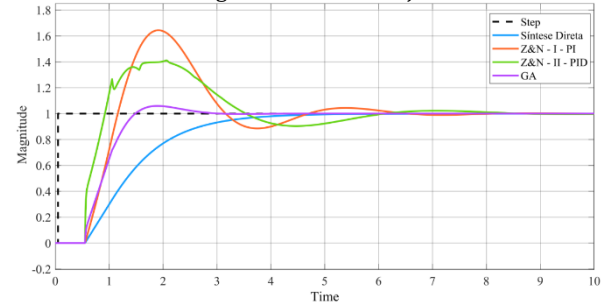
Fonte: Próprio Autor.

A solução utilizando Ziegler e Nichols II foi satisfatória, entretanto apresenta-se de forma agressiva, isso se deve em parte, a característica de comportamento deste método em sistemas com tempo morto reduzido.

A Fig. 13 apresenta as melhores respostas obtidas com cada um dos métodos

experimentados, sendo possível observar que a resposta mais satisfatória se apresentou através do Algoritmo Genético, uma vez que, apesar de não ser a resposta mais rápida, conseguir eliminar o erro de regime permanente, e, dentro as respostas mais rápidas, foi a que apresentou a menor ultrapassagem percentual, apenas 4,8%.

Fig. 13 – Análise Conjunta



Fonte: Próprio Autor.

V. CONCLUSÃO

Com a execução das simulações constatou-se que, de maneira geral, os métodos clássicos de sintonia de controladores PID, apresentaram boa eficiência quando comparados ao algoritmo genético utilizado. Observou-se que para o caso de uso estudado, o AG obteve a melhor resposta quando as características desejadas da resposta são o tempo de assentamento e o limite da ultrapassagem percentual reduzidos, uma vez que o seu tempo de assentamento ocorreu em 1,2 minutos, e sua ultrapassagem máxima foi de apenas 4,8%, muito abaixo dos métodos que apresentaram as respostas mais rápidas.

Acredita-se que este trabalho proporcionará uma contribuição aos profissionais da área de controle, através da análise de um estudo de caso, de uma planta de controle de temperatura, na qual avaliou-se o desempenho de um Algoritmo Genético aplicado à Sintonia de Controladores PID Comparado a Métodos Clássicos Determinísticos.

Diante dos resultados, conclui-se que, para o estudo de caso abordado, o método de sintonia que obteve o melhor desempenho, foi o Algoritmo Genético.

VI. AGRADECIMENTOS

À EMC-UFG (Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação da Universidade Federal de Goiás), pela oportunidade de desenvolvimento deste trabalho, a CAPES DS pelo apoio financeiro, aos professores e organizadores do VI EDEPA (Encontro de Desenvolvimento de Processos Agroindustriais), pela oportunidade de apresentação deste trabalho.

VII. NOMENCLATURA

PID- Controlador Proporcional Integral Derivativo

GA- Algoritmo Genético

IBG- Indivíduo antes da Mutação

IAG- Indivíduo após a Mutação

VIII. REFERÊNCIAS

- BRUNTON, S. L; KUTZ, J. N. (2019), “Engineering, Machine Learning, Dynamical Systems, and Control”, University Printing House, Cambridge CB2 8BS, United Kingdom, Cambridge, UK, 2019.
- CAMPOS, M. C. M. M. e TEIXEIRA, H. G, (2010), Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais. Second. São Paulo-SP-Brasil: Edgar Blucher Ltda, 2010. ISBN 978-85-212-0552-4.
- LUKE, S. Essentials of Metaheuristics. second. [S.l.]: LULU, 2013.
Available:
http://cs.gmu.edu/nsimsean/book/metah_euristics/.
- HOLLAND, J. H. (1975), “Adaptation in natural and artificial systems: Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence”, University of Michigan Press, USA, 1975
- KAISER, E. & KUTZ, J. N. & BRUNTON, S. Sparse. “Identification of nonlinear dynamics for model predictive control in the low-data limit”, To appear in Proceedings of the Royal Society A, University Printing House, Cambridge CB2 8BS, United Kingdom, Cambridge, UK, 2017.
- NISE, N. (2014), Engenharia de sistemas de controle. Sétima Ed. Rio de Janeiro - Rio de Janeiro - Brasil: LTC, 2014.
- OGATA, K. (2010), “Engenharia de Controle Moderno”, Prentice-Hall, 5ª ed., São Paulo: Pearson Prentice Hall do Brasil.
- TEIXEIRA, E. P. (2020), “Notas de aula disciplina Controle de Processos”, Curso de Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba-MG, Brasil.
- WANG, L. (2020), “PID Control System Design and Automatic Tuning Matlab Simulink”, JohnWiley & Sons, First. ed., Hoboken, New Jersey, United States of America.
- ZIEGLER, J. B. and NICHOLS, N. B. (1942), Optimum settings for automatic controllers. Transactions of the ASME - American Society of Mechanical Engineers., p. 759–768, 1942.
- ZIEGLER, J. B. and NICHOLS, N. B. (1943), Process lags in automatic control circuits. Transactions of the ASME - American Society of Mechanical Engineers., p. 433–444, 1943.