

**METAHEURÍSTICAS APLICADAS A SINTONIA DE CONTROLADORES  
PID: ESTUDO DE CASOS**

**João Olegário de Oliveira de Souza**

Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)  
Av. Unisinos, 950 - bairro: Cristo Rei - São Leopoldo/RS - Brasil  
jolegario@unisinos.br

**João Francisco Valiati**

Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)  
Av. Unisinos, 950 - bairro: Cristo Rei - São Leopoldo/RS - Brasil  
jfvaliati@unisinos.br

**Arthur Tórgo Gómez**

Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)  
Av. Unisinos, 950 - bairro: Cristo Rei - São Leopoldo/RS - Brasil  
breno@unisinos.br

**RESUMO**

Os controladores PID (Proporcional, Integral e Derivativo) são controladores largamente utilizados no controle de processos industriais, tanto em sistemas monovariáveis quanto em sistemas multivariáveis. Porém, os métodos convencionais de sintonia não apresentam bons resultados de desempenho quando os processos apresentam tempos de atraso elevados, características não-lineares, dentre outros. Diversas alternativas têm sido propostas para fornecer novos ajustes para o PID a fim de melhorar o desempenho e robustez dos sistemas de controle, cada qual com suas vantagens e desvantagens. O trabalho apresenta duas metaheurísticas inspiradas na natureza e estabelece através de estudo de casos, uma análise comparativa entre estas sintonizações e os métodos consagrados na literatura, utilizando como avaliação critérios no domínio do tempo, o índice Integral do Erro Absoluto (IAE) e robustez. Os resultados obtidos nas simulações demonstram que os métodos propostos neste trabalho são capazes de melhorar o desempenho dos processos em relação aos métodos de sintonia convencionais.

**PALAVRAS CHAVE. Controladores PID. Metaheurísticas. Sintonia.**

**Área principal: Metaheurísticas. Simulação**

**ABSTRACT**

*Conventional PID controllers (Proportional, Integral and Derivative) are widely used in industrial process control, in singlevariable and in multivariable systems. However, conventional tuning methods may not present good results of performance when the processes have high delay times, nonlinear characteristics etc. Several alternatives have been proposed to provide new settings for the PID controller to improve the performance and robustness of control systems, each with its advantages and disadvantages. The paper presents two metaheuristics inspired by nature and established through case studies, a comparative analysis between these methods and conventional methods, using performance criteria in time domain, the Integral Absolute Error (IAE) index and robust performance. The simulation results show that the methods proposed in this paper are able to improve the process performance in comparison with the conventional tuning methods.*

**KEYWORDS. PID controller. Metaheuristics. Tuning.**

**Main area: Metaheuristics. Simulation.**

## 1. Introdução

Apesar dos processos industriais estarem se tornando cada vez mais complexos, os controladores PID continuam sendo utilizados largamente em laços de controle industriais devido a sua estrutura simples e eficiente (COELHO; MANNALA, 2005). De fato, cerca de 95% dos controladores utilizam este tipo de estrutura (ÅSTROM; HÄGGLUND, 1995). Pode-se afirmar também que a sintonia ótima dos parâmetros destes controladores PID constitui ainda hoje um desafio em nível de engenharia, onde uma adequada estratégia de controle dos processos pode resultar em um aumento da vida útil dos atuadores, na melhoria da velocidade de resposta do sistema e no aumento da eficiência energética, ocasionando vantagens de ordem econômica e ambiental. O grande problema dos controladores PID é que grande parte deles estão mal sintonizados, representando um alto custo para a indústria. Além disso, os parâmetros dos controladores são, muitas vezes, sintonizados de forma manual, através de métodos de tentativa e erro, comprometendo em muitos casos o desempenho de malhas industriais (CARMO, 2006).

Desta forma, a motivação deste artigo é a busca por métodos de sintonia mais eficientes, onde as metaheurísticas têm demonstrado excelência nos resultados apresentados baseados em critérios de desempenho dos processos no domínio do tempo e nos índices de desempenho (NAGARAJ; VIJAYAKUMAR, 2011).

Lieslehto (2001) aponta duas vantagens do uso de técnicas metaheurísticas para sintonizar os parâmetros dos controladores PID: podem ser aplicadas para sistemas de alta ordem sem redução do modelo; podem também otimizar os critérios do projeto como a Margem de Ganho, a Reserva de Fase e a largura de banda em malha fechada quando uma mudança de *setpoint* e carga são aplicados ao sistema. Vários autores propuseram diferentes metaheurísticas para ajustes dos parâmetros de controladores PID, dentre as quais pode-se citar:

Nagaraj e Vijayakumar (2011) abordam heurísticas para otimizar o projeto de um controlador PID para um motor DC. É realizada uma comparação entre os resultados obtidos pelos métodos heurísticos (Algoritmos Genéticos, Programação Evolutiva, Otimização por Enxame de Partículas e Otimização por Colônia de Formigas) e métodos convencionais utilizando como função de avaliação o índice Valor Absoluto do Erro ao Quadrado (ISE).

Kumar e Nair (2010) apresentam um método de desenvolvimento de controladores PID multiobjetivo para um sistema altamente não linear, complexo e com múltiplos objetivos e restrições. Para isso, uma técnica de Otimização por Enxame de Partículas (PSO) com pesos adaptativos é aplicada para otimizar os parâmetros dos controladores. Os resultados demonstraram melhora no desempenho dinâmico do sistema com boas características de robustez.

Chang (2007) propõe uma alteração no operador cruzamento do Algoritmo Genético para determinar os parâmetros do controlador PID para processos multivariáveis, comparando seus resultados com os obtidos pelos métodos BLT e algoritmo genético tradicional.

O artigo está organizado da seguinte forma: a seção 2 introduz os controladores PID; as seções 3 e 4 descrevem respectivamente as estruturas do controlador PID para sistemas SISO e MIMO e as metaheurísticas Algoritmos Genéticos (AG) e *Simulated Annealing* (SA); seção 5 comenta a metodologia adotada; a seção 6 apresenta os resultados das simulações e análises realizadas e finalmente, as conclusões são apresentadas na seção 7.

## 2. Controladores PID

Resumidamente, o controlador PID clássico é um algoritmo simples e robusto que possui três ações de controle (proporcional, integral e derivativa) e seus parâmetros devem ser corretamente sintonizados para um correto funcionamento do sistema. Pode-se apresentar a equação da seguinte forma (OGATA, 1997):

$$K(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s, \quad (1)$$

onde  $K_p$  é o ganho proporcional,  $k_i$  o ganho integral e  $K_d$  o ganho derivativo.

A figura 1 mostra o exemplo de um sistema de controle na forma de diagrama de blocos, que contém a planta e o(s) controlador(es) PID, onde seus parâmetros são determinados através de metaheurísticas. O funcionamento do controlador consiste em analisar o sinal de erro e corrigir o sinal de entrada do processo.

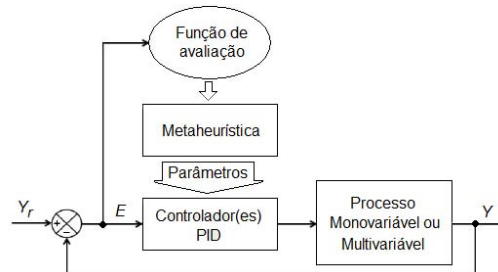


Figura 1: Sintonia de controladores PID através de metaheurísticas

Segundo Lutz e Wendt (2000) e Carvalho (2000), critérios de desempenho dos sistemas de controle são estabelecidos para avaliar e comparar a capacidade dos diferentes tipos de controladores em manter a variável controlada próximo ao *setpoint*, mesmo na presença de perturbações externas. Estas especificações de desempenho estão relacionadas às respostas transitórias e em regime permanente da variável de saída do sistema. Pode-se citar o *overshoot* (*OS*), o tempo de acomodação ( $t_s$ ), o tempo de subida ( $t_R$ ) e o seguimento da referência.

Pode-se ainda avaliar a qualidade da resposta do sistema através da robustez, que é a capacidade de assegurar o desempenho desejado na presença de variações dos parâmetros do sistema (DORF; BISHOP, 1998).

### 3. Estruturas de controle

De acordo com as exigências do processo, são utilizadas diferentes estruturas de controle, entre elas (LUTZ; WENDT, 2000): laço único, cascata e multivariável.

O controle de laço único, também chamado de sistema SISO (*Single Input, Single Output*), devido a sua simplicidade e a facilidade de implementação é a estrutura empregada com maior frequência no controle de sistemas dinâmicos, embora não garanta o desempenho desejado na presença de perturbações (LUTZ; WENDT, 2000) (SCHUMACHER; LEONHARD, 2006). A figura 2 mostra um exemplo de controle de laço único.

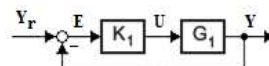


Figura 2: Controle de laço único.

onde  $Y_r$  é a referência do sistema (também chamada de *setpoint* ou SP),  $Y$  é a saída do sistema, também chamada de variável do processo (PV - *Process Variable*),  $E$  é o erro e  $U$  é a variável de entrada do processo  $G_1$ , ou seja, a variável manipulada (MV - *Manipulated Variable*).

A estrutura em cascata é utilizada extensivamente em muitos processos químicos, tais como reatores químicos, colunas de destilação, aquecedores e trocadores de calor (LEE et al., 1998). Sua malha de controle é constituída por malhas aninhadas (figura 3) e variáveis intermediárias que são utilizadas para responder mais rapidamente ao sinal de controle.

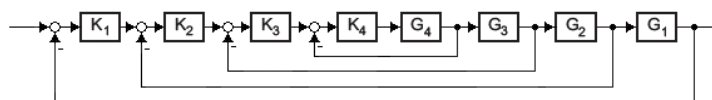


Figura 3: Controle em cascata.

Lee et al. (1998) propõem um método para a sintonia de controladores PID para sistemas de controle em cascata. Esta metodologia permite sintonizar os parâmetros dos controladores PID, tanto da malha interna quanto da malha externa, simultaneamente.

Existem diversos métodos para o projeto de controladores para sistemas multivariáveis ou MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*), dentre eles os controladores PID multivariáveis

descentralizados e os controladores PID multivariáveis com desacopladores. Na estrutura descentralizada (figura 4.a) são utilizados múltiplos controladores, um para cada variável a ser controlada, gerando desta forma, várias malhas de controle independentes, o que é mais fácil de implementar na prática (LUYBEN, 1990). Os desacopladores (figura 4.b) têm como objetivo eliminar ou reduzir a influência entre as variáveis em um sistema MIMO. O seu uso pode trazer benefícios interessantes, pois sem as interações entre as malhas, permite utilizar técnicas de controle monovariável que geralmente são mais simples (HARAMURA JUNIOR, 2010).

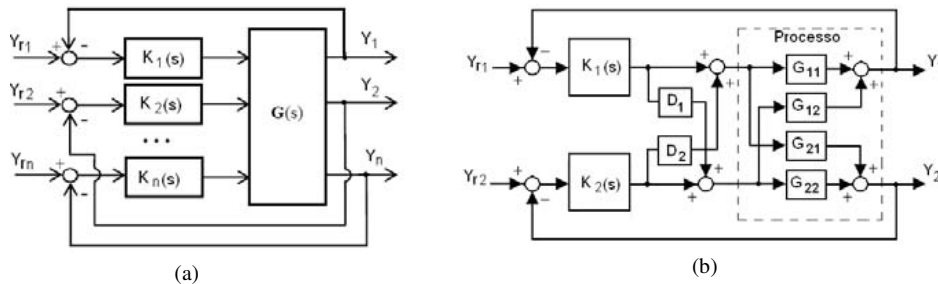


Figura 4: Controle PID multivariável descentralizado (a) e com desacopladores (b).

Luyben (1986) propôs o método BLT (*Biggest Log Modulus*) para sistemas MIMO. O método consiste em calcular, de forma descentralizada, os parâmetros dos controladores através do método de Ziegler-Nichols. Em seguida, é realizada dessintonização ajustando um parâmetro que divide e multiplica respectivamente o ganho e o tempo de integração do controlador. Este parâmetro é aumentado de 1 até pico do módulo BLT, de forma a obter a estabilidade do sistema.

#### 4. Metaheurísticas

A busca por melhores métodos de sintonia tem justificado o uso de metaheurísticas para suprir certas deficiências dos métodos convencionais. Foram utilizadas duas metaheurísticas inspiradas na natureza: Algoritmos Genéticos e *Simulated Annealing*.

##### 4.1 Algoritmos Genéticos

Segundo Goldberg (1989), os Algoritmos Genéticos são métodos de busca estocásticos que simulam teorias evolucionárias biológicas para solucionar problemas de otimização.

A ideia básica do Algoritmo Genético é uma população composta por um grupo de indivíduos. Cada indivíduo representa um das possíveis soluções. Esta população é avaliada segundo algum critério que mede a qualidade do indivíduo (função *fitness*). As melhores soluções têm maior probabilidade de sobreviver e através de operadores genéticos, novas soluções são geradas. Os principais operadores genéticos são: seleção, cruzamento e mutação (GOLDBERG, 1989). Repetem-se estas operações até atingir algum critério de parada (encontrar uma solução aceitável e/ou atingir um número limite de gerações e/ou o algoritmo não consiga mais mostrar evolução). A figura 5.a apresenta o fluxograma de um algoritmo AG.

##### 4.2 Simulated Annealing

É uma técnica baseada nos princípios da termodinâmica, análoga ao processo de recozimento de metais. A ideia do SA veio de um artigo publicado por Metropolis (1953). Este algoritmo simula o material como um sistema de partículas, onde a temperatura do metal é inicialmente elevada e em seguida lentamente baixada até alcançar um estado mínimo de energia (KIRKPATRICK et al., 1983). O objetivo deste processo é a obtenção de uma estrutura cristalina (sem imperfeições) proporcionando propriedades mais elevadas de dureza e resistência mecânica.

A ideia básica do algoritmo é gerar uma solução \$S\_j\$ na vizinhança de \$S\_i\$. Se esta resulta em uma melhora na função objetivo, ela é automaticamente aceita. Caso contrário, a solução gerada é aceita ou rejeitada de acordo com uma probabilidade dada pela equação:

$$P = e^{(-\Delta E / K_b T)}, \quad (2)$$

onde  $\Delta E$  é a variação de energia,  $K_b$  é a constante de Boltzmann e  $T$  é a temperatura.

Existe um processo de resfriamento na metaheurística e, à medida que a temperatura diminui, a probabilidade de aceitação diminui até que  $T$  seja tão pequena que nenhuma solução possa ser aceita. O final do processo ocorre quando a temperatura se aproxima de zero (temperatura de congelamento) e/ou mais nenhuma solução de piora é aceita, obtendo desta forma um ótimo local. A figura 5.b apresenta o fluxograma de um algoritmo SA.

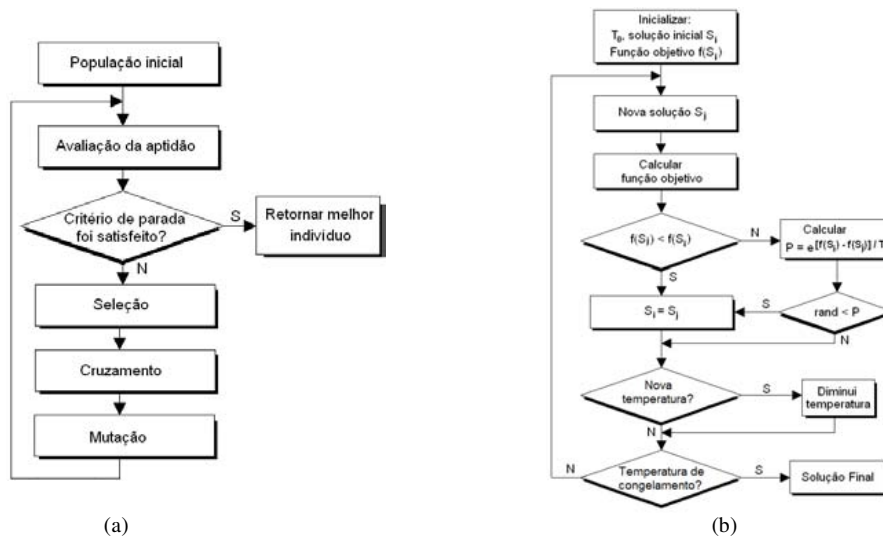


Figura 5: Fluxogramas dos algoritmos AG (a) e SA (b).

## 5. Metodologia

A sintonia dos controladores PID para diferentes estruturas de controle é feita diretamente pela busca dos melhores valores de  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  através da aplicação das metaheurísticas propostas. Dois estudos de caso foram realizados. No primeiro foi utilizada a estrutura em cascata, onde duas metodologias de sintonia (sequencial e simultânea) através das metaheurísticas AG e SA foram comparadas. O segundo estudo de caso apresenta a estrutura MIMO 2x2 e duas arquiteturas (descentralizada e com desacopladores) foram testadas e comparadas. As análises comparativas levaram em consideração os resultados das respostas dos processos através de desempenhos no domínio do tempo (*overshoot*, tempo de subida e tempo de acomodação), índice de desempenho IAE, eliminação de distúrbios e robustez dos sistemas.

O teste de robustez dos sistemas de controle seguiu as recomendações de Hu et al. (2011), citadas abaixo:

- Determinar o intervalo dos parâmetros do objeto pesquisado, e eleger um modelo de amostragem aleatória;
- Repetir a experiência de simulação  $N$  vezes, e obter uma coleção bidimensional de desempenhos incluindo o tempo de acomodação e *overshoot*. Esta coleção pode ser expressa graficamente;
- Comparar os efeitos de diferentes métodos de sintonia e a dispersão dos índices de desempenho dos resultados da experiência de Monte Carlo. Quanto menor o intervalo do desempenho do sistema de controle, mais forte é a robustez do sistema de controle.

Para a função objetivo foram utilizados dois índices: o ITAE e o ITSE. Estes índices ponderam um grande erro inicial com pequeno peso enquanto que os erros gerados na resposta transitória têm maiores pesos (OGATA, 1997). Matematicamente são definidos como:

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (3)$$

$$ITSE = \int_0^{\infty} te^2(t)dt \quad (4)$$

A função objetivo, na forma de agregação de funções, também levou em consideração o mínimo esforço de controle e uma penalidade para o critério *overshoot*.

## 6. Simulações realizadas

Para demonstrar a eficiência dos métodos apresentados, as respostas dos sistemas em malha fechada para cada estrutura foram comparadas com as dos métodos existentes na literatura (método Lee et al. (1998) para sistemas em cascata e o método BLT, proposto por Luyben (1986) para sistemas multivariáveis) e outros trabalhos relacionados como os Algoritmos Genéticos propostos por Sadasivarao e Chidambaram (2006) e Swiech (2005).

O ambiente Matlab® da Mathworks foi escolhido para a realização deste trabalho devido às capacidades gráficas e aos toolboxes com ferramentas disponíveis para controle e otimização global (*Global Optimization Toolbox*) aplicando as metaheurísticas através dos métodos *Simulated Annealing Solver*, *Genetic Algorithm Solver* e *Multiobjective Genetic Algorithm Solver*. O equipamento utilizado para simulação, testes e verificação de resultados foi um computador Intel Celeron de 2,13 GHz, 2 GB de RAM e sistema operacional Windows Vista.

As seguintes opções de configuração do AG foram utilizadas: representação das variáveis através de números reais; seleção torneio; *crossover* aritmético; mutação uniforme. E os seguintes parâmetros de acordo com Goldberg (1989): taxa de cruzamento de 0,80; taxa de mutação igual a 0,07; população igual a 100 indivíduos e número de gerações igual a 100. Para o SA, a função de recozimento escolhida foi a *Fast Simulated Annealing* (SZU; HARTLEY, 1987) e para a função de resfriamento foi utilizada uma função exponencial. Os parâmetros utilizados na simulação dos controladores PID foram: temperatura inicial igual a 100 e número de iterações igual a 1000.

Cada algoritmo foi executado dez vezes e escolhidos os conjuntos de parâmetros dos controladores PID que apresentaram os melhores resultados quanto à função custo.

### 6.1 Sistema em cascata

Para análise dos métodos, foi utilizado como funções de transferência do processo, o modelo apresentado em Krishnaswamy (1990) apud Lee et al. (1998), dado por:

$$G_1(s) = \frac{2e^{-2s}}{(20s + 1)} \quad (5) \quad G_2(s) = \frac{e^{-10s}}{(100s + 1)} \quad (6) \quad G_{L1}(s) = \frac{e^{-10s}}{(10s + 1)} \quad (7) \quad G_{L2}(s) = 1 \quad (8)$$

Dois metodologias de sintonia dos controladores PID com metaheurísticas foram propostas. A primeira utilizou uma função de agregação dos erros das duas malhas (interna e externa) para otimizar os parâmetros do controlador de forma simultânea. A segunda metodologia realizou uma sintonia sequencial dos controladores, ou seja, primeiro sintonizou o controlador da malha interna utilizando o próprio erro da malha como função custo e após sintonizou o controlador da outra malha, utilizando também o erro da malha externa como função objetivo.

As faixas dos ganhos utilizadas para os controladores PID foram os seguintes valores:

- Controlador PID interno:  $0 \leq K_{p1} \leq 10,0$ ;  $0 \leq K_{i1} \leq 1,0$ ;  $0 \leq K_{d1} \leq 10,0$ ;
- Controlador PID externo:  $0 \leq K_{p2} \leq 10,0$ ;  $0 \leq K_{i2} \leq 1,0$ ;  $0 \leq K_{d2} \leq 40,0$ .

O gráfico 1 mostra a simulação da resposta do processo em malha fechada para cada metodologia proposta.

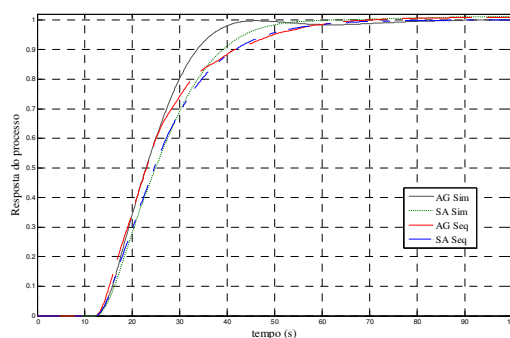


Gráfico 1: Resposta do processo em cascata com diferentes metodologias de sintonia.

Pode-se observar pela superposição das curvas dos gráficos anteriores que as metaheurísticas com diferentes metodologias apresentaram desempenhos semelhantes quanto ao *overshoot*. O método simultâneo apresentou os menores valores de tempo de acomodação e tempo de subida e por isso esta abordagem foi escolhida para fins de comparação com os valores dos métodos Lee et al. (1998) e o Algoritmo Genético (AG SC), proposto por Sadasivarao e Chidambaram (2006). Os parâmetros são mostrados na tabela 1.

Método de sintonia	Parâmetros PID					
	$K_{p1}$	$K_{i1}$	$K_{d1}$	$K_{p2}$	$K_{i2}$	$K_{d2}$
AG	3,0345	0,4406	0,669	4,401	0,0411	6,3396
SA	2,4598	0,4209	0,778	3,9978	0,0393	1,7646
Lee et al. (1998)	3,444	0,1667	2,2217	5,83	0,0555	27,984
AG SC	3,9089	0,785	0,1406	5,9728	0,059	9,2746

Tabela 1: Parâmetros de sintonia através dos métodos Lee et al. (1998) e metaheurísticas.

As respostas das malhas externa e interna podem ser observadas nos gráficos 2.a e 2.b, respectivamente.

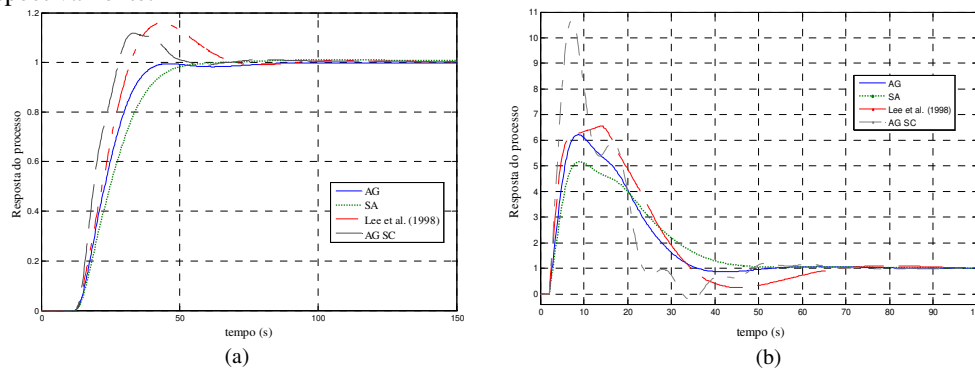


Gráfico 2: Resposta do processo - malhas externa (a) e interna (b).

A tabela 2 mostra os índices de desempenho produzidos pelos controladores PID sintonizados pelos diferentes métodos.

Método de sintonia	OS (%)	$t_R$ (s)	$t_S$ (s)	Índice IAE
AG	1,14	18,0	40,0	24,82
SA	1,18	22,5	49,0	27,73
Lee et al. (1998)	16,09	14,5	65,5	26,52
AG SC	11,96	11,5	49,0	22,56

Tabela 2: Desempenho dos sistemas em cascata.

O AG proposto apresentou os menores valores de *overshoot* e tempo de acomodação e ainda, o algoritmo SA comparado ao AG proposto por Sadasivarao e Chidambaram (2006), apresentou menor *overshoot* e o mesmo tempo de acomodação. Na malha interna, observa-se ainda que as metaheurísticas propostas apresentaram os menores valores de *overshoot*.

Nos testes de rejeição de distúrbios realizados com os controladores, o sinal de referência foi mantido em zero e os distúrbios foram gerados na forma de degraus unitários com valores iguais a 1,0 e adicionados individualmente nas malhas de carga (interna e externa) do processo. Os resultados são apresentados nos gráficos 3.a e 3.b.

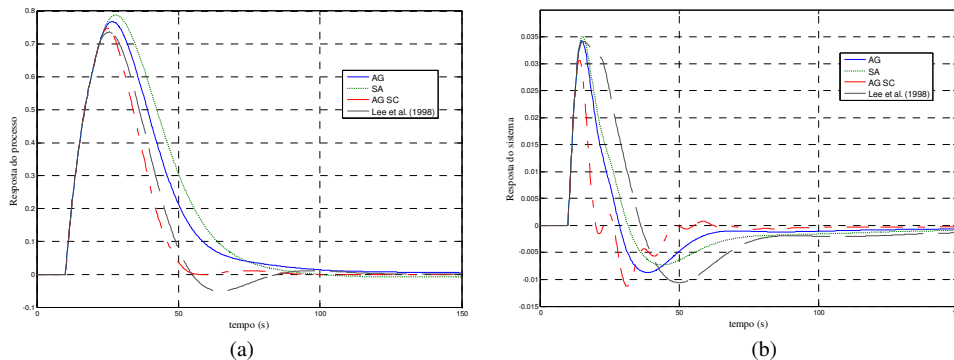


Gráfico 3: Resposta do processo para um degrau nas cargas \$L\_1\$ (a) e \$L\_2\$ (b).

Percebe-se pelo gráfico anterior, que os controladores possuem respostas similares e que todos conseguem compensar os distúrbios aplicados, demonstrando que os métodos são robustos a este tipo de perturbação.

## 6.2 Estrutura MIMO

Para avaliação das metaheurísticas aplicadas a estruturas MIMO foi utilizada a coluna de destilação Wood and Berry (WOOD; BERRY, 1973). É um modelo multivariável com duas entradas e duas saídas de difícil controle, pois possui significativo atraso de transporte e forte acoplamento entre as variáveis (CHANG, 2007). As funções de transferência que descrevem o comportamento da coluna são dadas por:

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12,8e^{-s} & 18,9e^{-3s} \\ 16,7s + 1 & 21s + 1 \\ 6,6e^{-7s} & 19,4e^{-3s} \\ 10,9s + 1 & 14,4s + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(s) \\ x_2(s) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

onde \$y\_1(s)\$ é a porcentagem mássica de metanol no topo, \$y\_2(s)\$ é a porcentagem mássica de metanol no fundo, \$x\_1(s)\$ é a vazão mássica de refluxo e \$x\_2(s)\$ é a vazão mássica de vapor.

As faixas dos ganhos dos controladores PID descentralizados e com desacopladores foram de - 0,2 a 0,2 para todos os parâmetros. Duas arquiteturas foram propostas para a sintonia dos controladores com metaheurísticas: descentralizada e com desacopladores. Os gráficos 4.a e 4.b mostram a simulação da resposta do processo em malha fechada para cada arquitetura proposta.

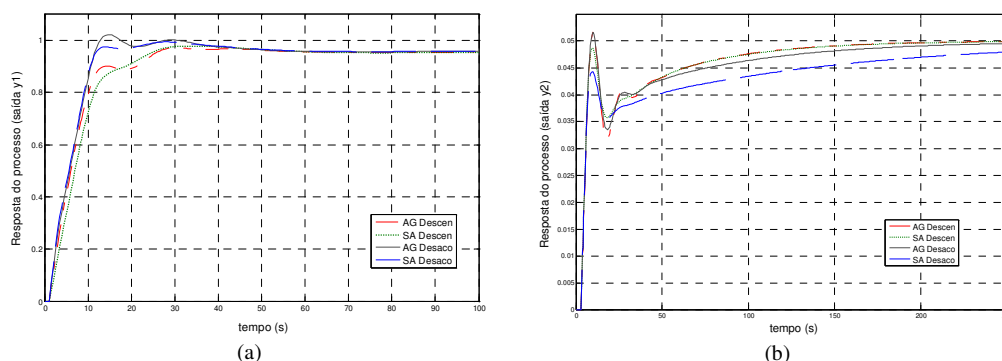


Gráfico 4: Resposta das saídas \$y\_1\$ (a) e \$y\_2\$ (b) com diferentes arquiteturas.

Percebe-se pelo gráfico anterior que a arquitetura descentralizada apresentou os menores valores de *overshoot* e tempo de acomodação e por isso foi utilizada para comparações com o método BLT (*Biggest Log Modulus*), proposto por Luyben (1986) e o trabalho de Swiech (2005), denominado de AG SW. Os parâmetros de cada sintonia são mostrados na tabela 3.



Método de sintonia	Parâmetros PID					
	$K_{p1}$	$K_{i1}$	$K_{d1}$	$K_{p2}$	$K_{i2}$	$K_{d2}$
AG	0,1468	0,0215	0,1535	-0,1684	-0,0052	$-1,46 \times 10^{-12}$
SA	0,1031	0,0198	0,0595	-0,1798	-0,0052	-0,1050
BLT	0,3750	0,0452	0	-0,075	-0,0032	0
AG SW	0,11238	0,02431	0,00639	-0,12129	-0,00158	-0,13549

Tabela 3: Parâmetros de sintonia através dos métodos BLT e metaheurísticas.

Os gráficos 5.a e 5.b mostram as respostas das saídas  $y_1$  e  $y_2$  quando degraus de 0,96 e 0,05 são aplicados individualmente nas respectivas entradas de referência  $x_1$  e  $x_2$  no tempo igual a zero. A tabela 4 apresenta o desempenho de cada método de sintonia.

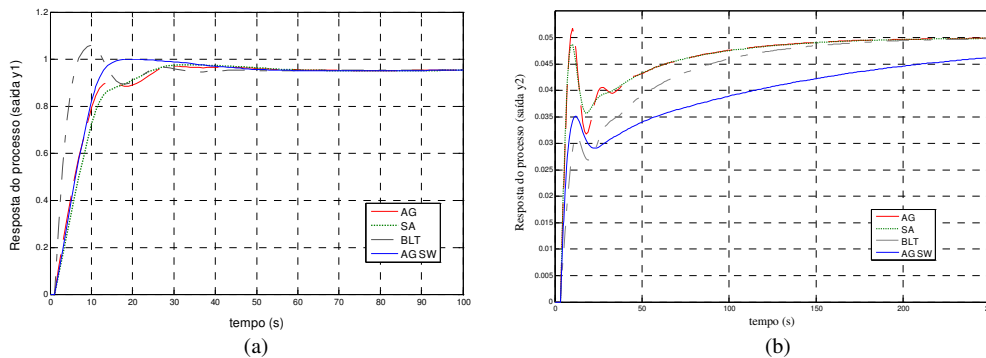


Gráfico 5: Resposta das saídas  $y_1$  (a) e  $y_2$  (b) em malha fechada com os métodos BLT e metaheurísticas.

Método de sintonia	$y_1$				$y_2$			
	OS (%)	$t_R$ (s)	$t_S$ (s)	Índice IAE	OS (%)	$t_R$ (s)	$t_S$ (s)	Índice IAE
AG	1,19	9,68	24,64	7,7276	3,39	4,19	144,8247	1,0100
AS	1,88	11,75	23,14	8,6501	0	4,2	148,1172	1,0025
BLT	10,59	3,66	22,97	4,8290	0	85,05	171,405	1,6146
AG Swiech	4,38	9,61	36,06	7,8476	0	206,82	433,13	2,5596

Tabela 4: Desempenho dos sistemas MIMO 2x2.

Observa-se na tabela que para a saída  $y_1$ , as sintonias efetuadas pelas metaheurísticas propostas apresentaram os menores valores de *overshoot* e tempo de acomodação se comparados ao método AG de Swiech (2005) enquanto que o método BLT apresentou um valor de *overshoot* considerável. Verifica-se ainda para  $y_2$  que o AG e SA propostos apresentaram os menores tempos de acomodação e baixos valores de *overshoot*. Para analisar o desempenho de cada método na eliminação dos distúrbios provocados pelas interações das malhas, um degrau de 0,96 é aplicado na entrada de referência  $x_1$  no tempo igual a zero e um degrau de 0,05 é aplicado na entrada de referência  $x_2$  no tempo igual a 150 s. Os gráficos 6.a e 6.b mostram as respostas das saídas  $y_1$  e  $y_2$  respectivamente.

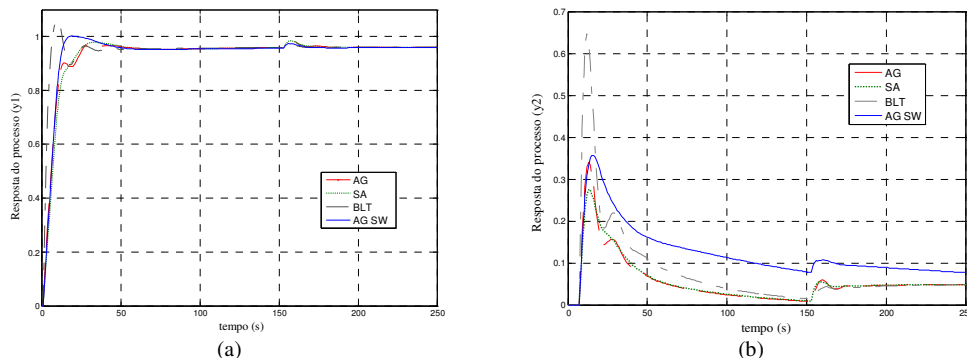


Gráfico 6: Resposta do processo (saída  $y_1$ ) em malha fechada com os métodos BLT e metaheurísticas.

Para a saída  $y_2$  observa-se no gráfico 7.b que as propostas eliminam o distúrbio da interação das malhas (juntamente com o método BLT), mais rápido que o AG SW, apresentando os menores valores de pico para este distúrbio.

A terceira análise testou a robustez dos sistemas de controle através do método de Monte Carlo. Dado o modelo da planta:

$$G_{ij}(s) = (K_{ij} / T_{ij}s + I)e^{-\theta_{ij}s}, i, j = 1, 2. \quad (10)$$

Assumindo-se que o intervalo de perturbação dos parâmetros ( $K_{ij}$ ,  $T_{ij}$ ,  $\theta_{ij}$ ) do modelo é de  $\pm 10\%$  e o número de experimentos estocásticos é  $N = 100$ , os gráficos 7 e 8 mostram a robustez do desempenho do sistema no caso de existência de incerteza na planta controlada.

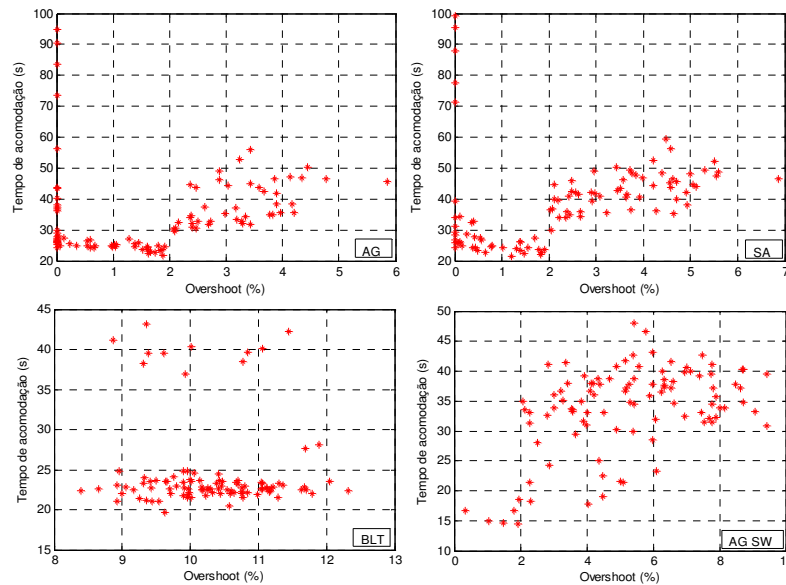


Gráfico 7: Resposta do processo (saída  $y_1$ ) com existência de incerteza na planta controlada.

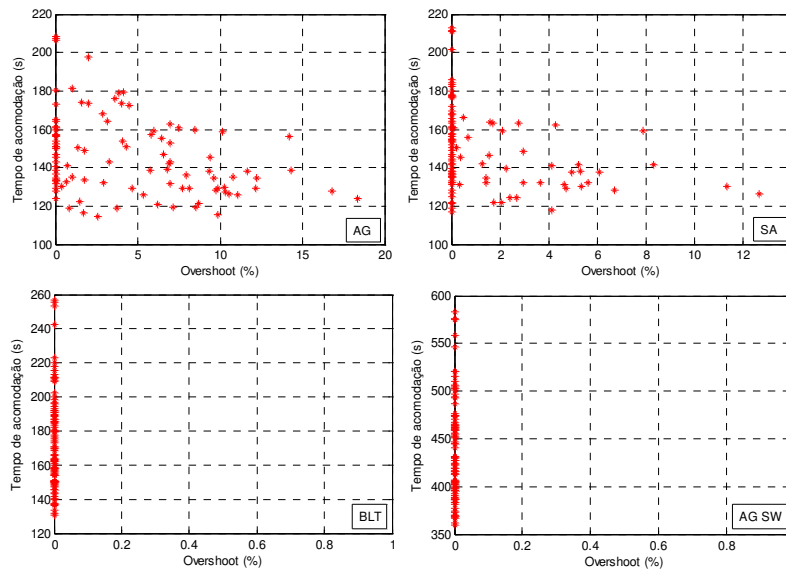


Gráfico 8: Resposta do processo (saída  $y_2$ ) com existência de incerteza na planta controlada.

A tabela 5 apresenta os valores de desempenho das malhas  $y_1$  e  $y_2$ .

	Método de sintonia	OS (%)		$t_s$ (s)	
		Faixa	Média	Faixa	Média
$x_1y_1$	AG	0 - 5,85	1,75	21,84 - 94,67	34,78
	SA	0- 6,86	2,36	21,57 - 99,32	38,83
	BLT	8,39 - 12,32	10,29	19,59 - 43,22	24,67
	AG SW	0,35 - 9,44	5,24	14,55 - 48,05	33,67
$x_2y_2$	AG	0 - 18,34	4,38	114,36 - 208,35	146,22
	SA	0 - 12,68	1,38	116,78 - 212,67	149,50
	BLT	0	0	130,74 - 256,69	173,43
	AG SW	0	0	359,72 - 582,80	436,76

Tabela 5: Robustez dos sistemas MIMO.

Pode-se observar na nos gráficos 7 e 8 e na tabela anterior que as sintonias com metaheurísticas obtiveram para a saída  $y_1$  do processo uma dispersão grande quanto ao tempo de acomodação e para a saída  $y_2$  do processo os menores valores. Quanto ao critério *overshoot*, as metaheurísticas obtiveram os menores valores para a saída  $y_1$  e valores abaixo de 20% para a saída  $y_2$ .

## 7. Conclusões

Neste trabalho foi investigada a utilização de metaheurísticas à solução do problema da sintonia dos parâmetros de controladores PID para diferentes estruturas de controle, propondo para cada estrutura diferentes abordagens para a função objetivo com alternância de metodologias de sintonia e arquiteturas, com a intenção de verificar, em função de especificações de desempenho e robustez, a eficiência dos métodos propostos. A metodologia adotada no projeto foi eficaz na determinação dos parâmetros dos controladores PID. Os resultados das simulações mostraram baixos valores de *overshoot* e bons resultados na eliminação de distúrbios e robustez para cada estrutura apresentada com os algoritmos AG e SA. Comparados aos sistemas convencionais de sintonia, as metaheurísticas mostraram bons resultados em todos os critérios de desempenho e robustez. Percebeu-se ainda que em todas as simulações a metaheurística SA proposta apresentou os menores tempos de simulação. Este fator pode ser decisivo na escolha do método para o projeto de controladores do tipo PID com uma abordagem adaptativa. Como trabalho futuro, pretende-se incluir a identificação de sistemas utilizando métodos baseados em Algoritmos Genéticos, e a determinação dos parâmetros dos controladores através da otimização multiobjetivo com o uso das frentes de Pareto, visando atender múltiplos objetivos como índice de erro, *overshoot* e tempo de acomodação e posteriormente comparar seus resultados com os obtidos pelas otimizações mono-objetivo e de agregação na busca por melhores desempenhos dos processos.

## Referências

- Åström, K. J.; Hägglund, T. *PID controllers: Theory, Design and Tuning*. 2nd. ed. North Carolina: Instrument Society of America, 1995.
- Carmo, M. J. Ambiente educacional multifuncional integrado para sintonia e avaliação do desempenho de malhas industriais de controle. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, 2006.
- Carvalho, J. L. M. *Sistemas de controle automático*. LTC. Rio de Janeiro, RJ, 2000.
- Chang, W. D. A multi-crossover genetic approach to multivariable PID controllers tuning. *Expert Systems with Applications*, 33, pp. 620-626, 2007.
- Coelho, L. S.; Mannala, M. J. Sintonia de Controladores PID baseada em evolução diferencial aplicada à automação de ensaios em cabos condutores de energia elétrica. *Revista da Sociedade Brasileira de Redes Neurais (SBRN)*, v. 3, n. 2, p. 71-83, 2005.
- Dorf, R. C.; Bishop, R. H. *Modern control systems*. 8. ed. California: Addison-Wesley, 1998.

- Goldberg, D. E.** *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley, Massachusetts, 1989.
- Haramura Junior, D.** Controle Preditivo e Desacoplamento de sistema multivariável de um protótipo de incubadora neonatal. Monografia de Graduação. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2010.
- Hu, Z.; Li, D.; Wang, J.; Xue, F.** *Analytical Design of PID Decoupling Control for TITO Processes with Time Delays*. Journal of Computers v. 6, n. 6, 1064-1070, 2011.
- Kirkpatrick, S.; Gelatt, C. D.; Vecchi M. P.** *Optimization by Simulated Annealing*. Science, vol. 220, no. 4598, pp. 671-680, 1983.
- Kumar, C. A.; Nair, N. K.** NSGA-II Based Multiobjective Pid Controller Tuning for Speed Control of DC Motor Drives. International Journal of Soft Computing, 5: 83-87, 2010.
- Lee, Y., Park, S.; Lee, M.** *PID controller tuning to obtain desired closed loop responses for cascade control systems*. Ind. Eng Chem. Res., 37, 1859–1865, 1998.
- Lieslehto J.** PID controller tuning using Evolutionary programming. American Control Conference, VA, 2001.
- Lutz, H.; Wendt, W.** *Taschenbuch der Regelungstechnik*. 3. ed. Harri Deutsch. Frankfurt Am Main, 2000.
- Luyben, W. L.** *Simple method for tuning SISO controllers in multivariable systems*. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., v.25, pp.654- 660, 1986.
- Luyben, W. L.** *Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers*. 2nd edition, McGraw Hill, New York, 1990.
- Nagaraj, B.; Vijayakumar, P.** *A Comparative Study of PID Controller Tuning using GA, EP, PSO and ACO*. Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems, v. 5, n. 2, 2011.
- Ogata, K.** Engenharia de controle moderno. 4. ed. Prentice-Hall. New Jersey, 1997.
- Sadasivarao, M. V.; Chidambaram, M.** *PID Controller tuning of cascade control systems using genetic algorithm*. Journal Indian Institute of Science, n.86, pp. 343-354, 2006.
- Schumacher, W.; Leonhard, W.** *Grundlagen der Regelungstechnik*. Technische Universität Braunschweig, 2006.
- Seborg, D. E.; Edgar, T. F.; Mellichamp, D. A.** *Process Dynamics and Control*. John Wiley & Sons, 1989.
- Swiech, M.C.S.** Algoritmos Genéticos para a sintonia simultânea de múltiplos controladores em processos de refino. 127 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2005.
- Szu, H.; Hartley, R.** Fast Simulated Annealing. Phys. Lett. A, vol 122, pp. 157-162, 1987.
- Varol, H. A. e Bingul, Z. A.** *New PID Tuning Technique Using Ant Algorithm*. American Control Conference, Boston, USA, 2154-2159, 2004.
- Vu, T. N. L.; Le, M.** *Multi-loop PI/PID Controller Design Based on Direct Synthesis for Multivariable Systems*. World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS), San Francisco, USA, 2008.
- Wood, R. K. Berry, M. W.** *Terminal composition of a binary distillation column*. Chemical. Engineering Sciences, v. 28, pp. 1707-1717, 1973