

# OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE UM CONTROLADOR PROPORCIONAL, INTEGRAL E DERIVATIVO POR ALGORITMO GENÉTICO PARA UM SISTEMA DE CONTROLE DE NÍVEL DE LÍQUIDO

## PROPORTIONAL, INTEGRAL AND DERIVATIVE PARAMETERS OPTIMIZATION BY GENETIC ALGORITHM TO LIQUID LEVEL SYSTEM CONTROL

Moisés de Matos Torres<sup>1</sup>

### RESUMO:

Com o surgimento na indústria da necessidade cada vez mais forte de se aliar produção com um menor gasto possível, o controle seguro em vários setores se torna cada vez mais valorizado. O controle de nível de líquido em um reservatório pode ser muito pertinente neste contexto. Atualmente, os controles adotados são bem distintos, podendo variar desde um sistema liga/desliga (on/off), até um sistema de controle proporcional, integral e derivativo (PID). Neste trabalho foi realizado um ajuste das constantes do controle PID por algoritmos genéticos (AGs). Os AGs constituem de uma técnica de busca e otimização altamente paralela, inspirada no princípio de evolução de Darwin. Os resultados foram obtidos a partir da modelagem de uma planta de controle de nível de líquido, e mostram que o uso do AG proporcionou uma potencialização dos parâmetros do controlador, portanto apresentam valores mais satisfatórios em comparação com métodos tradicionais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Algoritmos Genéticos; Controle; PID.

### ABSTRACT:

With the emergence of the increasingly strong need to align production with least possible expenditure industry, secure control across multiple industries becomes increasingly valued. The control of liquid level in a reservoir can be very relevant in this context. Currently, the adopted controls are quite different, ranging from an on / off system, to a proportional, integral and derivative control system (PID). In this paper an adjustment of the constants of the PID control with genetic algorithms (GAs) was performed. GAs are a search technique and highly parallel optimization, based on the principle of Darwin's evolution. The results were obtained from modeling of a plant control liquid level and show that the use of GA gave an enhancement of the controller parameters thus exhibit more satisfactory values as compared to traditional methods.

**KEYWORDS:** Genetic Algorithms; Control; PID.

## 01 – INTRODUÇÃO

A diminuição do desperdício é hoje um dos maiores objetivos da indústria mundial e também do meio doméstico. Sistemas de controle de líquido são utilizados nos dois setores, sendo que, no parâmetro, doméstico cita-se como exemplo o

<sup>1</sup> Mestrando em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia e graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Minas Gerais. Professor do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Currículo: <http://lattes.cnpq.br/7752070737738755>.

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 05 Páginas 121-135
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

controle em caixas d'água e em máquinas de lavar. Na visão industrial tem-se como exemplo o simples controle de um reservatório, cujo nível de fluido não pode estar abaixo de uma determina faixa, até o controle de misturas entre substâncias distintas.

Na indústria tem-se desenvolvido inúmeros sistemas de controle de nível de reservatórios para uma diminuição de perdas. Os sistemas de controle dentem-se dentro de um grupo muito variado, desde sistemas simples até sistemas bastante complexos. Esta divergência de sistemas é acarretada devido à necessidade específica do controle a ser feito, ou seja, sistemas que necessitam de baixa precisão, como exemplo, um reservatório que deve estar sempre com líquido, porém não faz diferença o nível (cheio, intermediário) apresentado, ou sistemas de alta precisão, como em misturas de substâncias químicas.

Neste contexto, será feito um ajuste do controle PID através de equações encontradas pela modelagem de uma planta de controle de nível de líquido.

A planta consiste em dois tanques de líquidos, sendo que um é utilizado como reservatório de coleta e reposição de fluido, e o segundo foi o tanque com o líquido a ser monitoramento. O reservatório controlado terá acoplado uma válvula simples de controle manual, sendo está com o objetivo de simular um sistema de retirada de fluido. O controle a ser implantado terá um potencial capaz de detectar a vazão estabelecida nesta válvula e, a partir disso, manterá o tanque com um nível pré-determinado, aproximando de um regime permanente.

## 02 – AÇÕES DE CONTROLE

Segundo Ogata (2003), um controle automático compara o valor real da grandeza de saída do processo com a grandeza de referência (valor desejado), determina o desvio e produz um sinal de controle que reduzirá o desvio a zero ou a um valor pequeno. A maneira pela qual o sinal de controle é gerado pelo controlador automático é chamada de *ação de controle*.

Há várias ações de controle usadas em controladores analógicos industriais. Ogata (2003), ainda afirma que esses controladores podem ser classificados de acordo com a sua ação de controle, por exemplo, pela ordem citada

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 05 Páginas 121-135
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

abaixo.

- Controle de duas posições ou liga-desliga (*on/off*).
- Controle proporcional.
- Controle do tipo integral.
- Controle do tipo proporcional e integral.
- Controle do tipo proporcional e derivativo.
- Controle do tipo proporcional, integral e derivativo.

A Fig. 1 esboça um diagrama de bloco de um sistema de controle industrial.

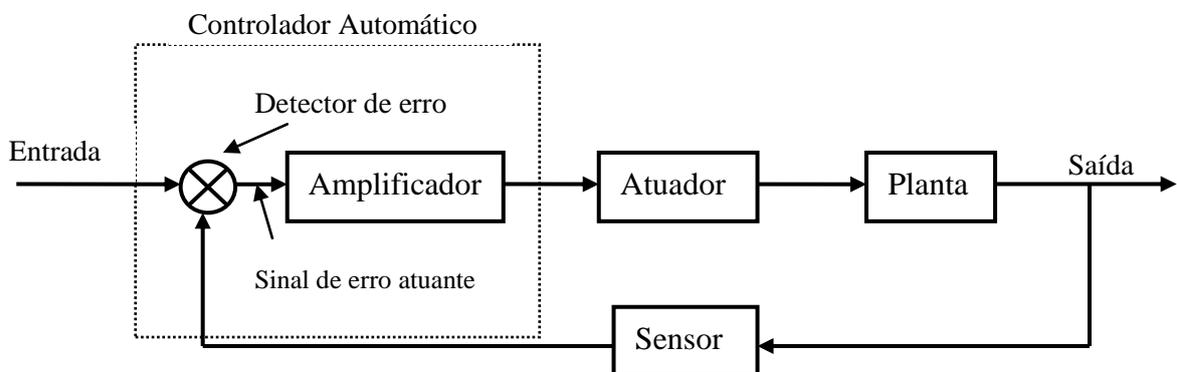


Figura 1 - Diagrama de bloco sistema de controle industrial

## 2.1 – Ação Proporcional-Integral – Derivativa (PID)

Este modo resulta da combinação dos modos proporcional, integral e derivativo. Pode-se afirmar que resulta num compromisso entre as vantagens e desvantagens de um PI e as vantagens de um PD. Este será o controle utilizado no projeto. A Equação de um controlador com esta ação combinada é dada por;

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

ou pela função de transferência;

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Sendo  $K_p$  representa o ganho proporcional,  $T_d$  representante o tempo derivativo e  $T_i$  representa o tempo integral. Neste tipo de controlador, o modo integral é usado para eliminar o erro estacionário causado por grandes variações. O modo derivativo, com o seu efeito estabilizador, permite um aumento do ganho e reduz a tendência para as oscilações, o que conduz a uma velocidade de resposta superior quando comparado com o controle P e PI. A Fig. 2 mostra um diagrama de bloco de um controle PID.

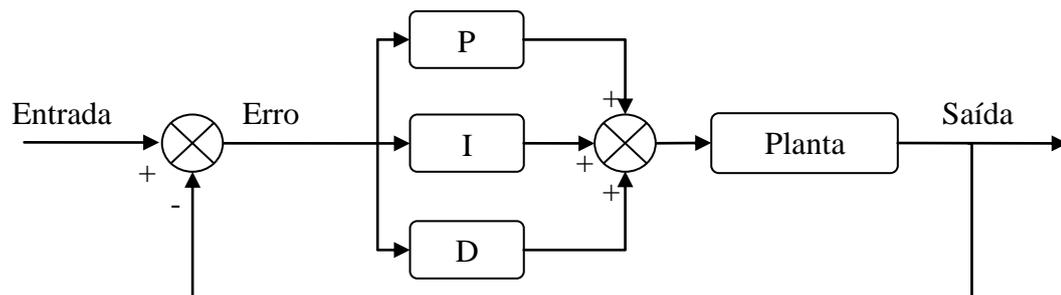


Figura 2 - Diagrama de bloco de um controle PID.

### 03 – ALGORITMOS GENÉTICOS – AGs

Dado que os algoritmos genéticos é uma ferramenta matemática de otimização o seu uso é pertinente ao projeto. A capacidade de otimizar problemas lineares e não-lineares, tornou os AGs uma ótima opção. A plataforma *Matlab*, que uma linguagem de programação bastante utilizada como ferramenta para solução de problemas matemáticos na engenharia, possui diversas formas para utilizar os Algoritmos Genéticos. A escolha do meio a ser utilizado varia de acordo com cada problema.

Uma vez que os computadores vêm se tornando mais velozes e com grande capacidade de armazenamento de informações, a área de Inteligência Artificial Aplicada (IA) aproxima fortemente dos meios científicos e industriais. Os AGs são ótimos representantes de inteligência artificial. Baseados no princípio da reprodução genética os AGs permitem uma localização de um mínimo ou máximo global de uma função.

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 05 Páginas 121-135
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

Goldberg (1989) afirma que os algoritmos genéticos são sistemas adaptativos que imitam alguns mecanismos observados na evolução natural das espécies. Os primeiros passos neste campo foram dados por John Holland no início dos anos 70, que acreditou ser possível resolver alguns problemas através de processos de evolução semelhantes. Sabe-se da Genética que as moléculas de DNA onde estão gravadas as características das células, são constituídas por cromossomos. Cada cromossomo possui genes organizados em cadeias. Durante a reprodução sexual existe troca de material genético entre os dois progenitores, originando novos cromossomos que combinam as características dos cromossomos pais.

Evidentemente que podem ocorrer mutações ao nível dos genes. Que são pequenas alterações acidentais ou induzidas, que poderão ter repercussões nas características do novo ser. O fenômeno da mutação tem uma probabilidade muito reduzida. Quando acontece, o gene de um filho fica diferente do gene correspondente de ambos os pais. Uma reprodução sem mutações implica que cada gene do cromossomo do filho seja igual ao correspondente gene de um dos pais.

Sabe-se que os indivíduos mais adaptados ao meio ambiente têm maior probabilidade de sobreviverem e de se reproduzirem. Assim, a sua informação genética será herdada por mais descendentes e terá menor probabilidade de se perder. Estas características retiradas da própria evolução das espécies serviram de inspiração para a criação dos algoritmos genéticos. Usando sequências binárias que se designam por cromossomas, e que representam possíveis soluções para um problema, simula-se a evolução natural criando novas sequências através da reprodução das já existentes.

### 3.1 – Inicialização da População

Segundo Mathew (2003) de forma aleatória a população inicial é gerada e o tamanho depende do número de indivíduos dado pelo projetista. Para que se possa cobrir todo o espaço de soluções usa-se a lei das probabilidades. Mas isso não poderá ser garantido, pois a população tem tamanho finito. A população gerada é representada por números binários.

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 05 Páginas 121-135
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

### 3.2 – Função de Avaliação

Mathew (2003) afirma que a função de avaliação é utilizada para determinar a qualidade de um indivíduo como uma solução do problema em questão. A função de avaliação estabelece uma ligação entre o AG e o mundo externo. A avaliação é realizada para representar de forma estratégica o problema, além de fornecer uma medida de aptidão de cada indivíduo.

### 3.3 – Seleção

Nesta fase os indivíduos mais aptos da geração atual são selecionados. Esses indivíduos são utilizados para gerar uma nova população por cruzamento. Cada indivíduo tem uma probabilidade de ser selecionado proporcional à sua aptidão. Mathew (2003) diz que o método de seleção de pais deve simular o mecanismo de seleção natural que atua sobre as espécies biológicas, em que os melhores pais são capazes de gerar mais filhos, ao mesmo tempo em que os pais menos aptos também podem gerar descendentes. Sendo assim, é evidente que não serão desprezados os indivíduos com a função de avaliação extremamente baixa, mas temos que privilegiar os indivíduos com a função de avaliação alta. Esta decisão é razoável, pois até os indivíduos com péssima avaliação podem ter características genéticas capazes de gerar indivíduos que sejam a melhor solução para o problema a que se está procurando a solução, características estas que podem não estar presentes em nenhum outro cromossomo de nossa população.

### 3.4 - Reprodução

Após a seleção do melhor indivíduo é criado um novo grupo de indivíduos através de cruzamento e mutação. Um novo indivíduo que compartilha as características dos pais é produzido por um par de indivíduos. Este processo dará origem a uma nova geração, com uma maior adequação que a geração anterior.

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 05 Páginas 121-135
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

### 3.5 – Cruzamento

Os indivíduos selecionados são cruzados da seguinte forma: a lista de indivíduos selecionados é embaralhada aleatoriamente. Com isso será criada uma segunda lista, chamada de parceiros. Cada indivíduo selecionado é então cruzado com o indivíduo que ocupa a mesma posição na lista de parceiros. A Fig. 3 mostra como ocorre.

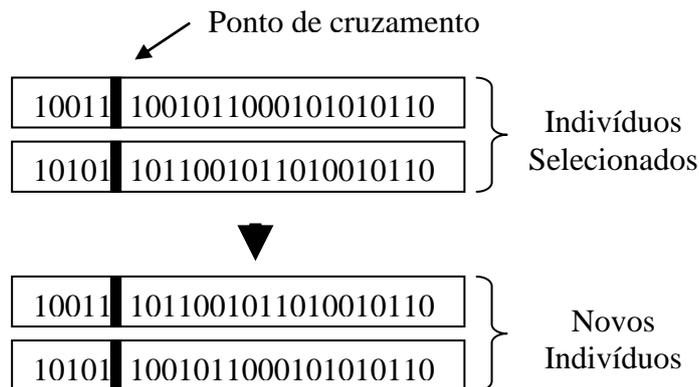


Figura 3 – Cruzamento de dois indivíduos

### 3.6 – Mutação

A operação de mutação proporciona um maior aproveitamento do espaço de estados, com cria uma ajuda que evita que o algoritmo genético convirja muito cedo para mínimos locais. Na mutação, um indivíduo é sorteado aleatoriamente com uma determinada probabilidade, tem os valores de um gene alterados, essa probabilidade é denominada probabilidade de mutação. Conseqüentemente, vários indivíduos da nova população podem ter seus genes alterados aleatoriamente. A Fig. 4 mostra a operação de mutação.

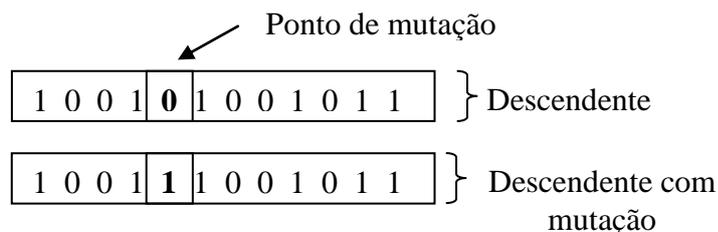


Figura 4 – Operação de mutação

### 3.7 – Funcionamento dos Algoritmos Genéticos

O AG é uma técnica de busca, e seu objetivo é convergir para uma situação onde determinada condição é satisfeita. Dado que a solução para resolver um problema, consiste em buscar um estado satisfatório, o AG desempenha esta função, ou seja, recebe um problema de entrada e retornar uma solução sob a forma de uma sequência de ações para atingir o objetivo desejado. A Fig. 5 representa um fluxograma do funcionamento de um Algoritmo Genético simples, para isso segue as seguintes etapas:

- ❖ Inicialização da População
- ❖ Avaliação (A solução foi encontrada?)
  - Caso seja verdadeiro
    - Finaliza o fluxo
  - Caso contrário
    - Seleção
    - Cruzamento
    - Mutação
    - Reprodução

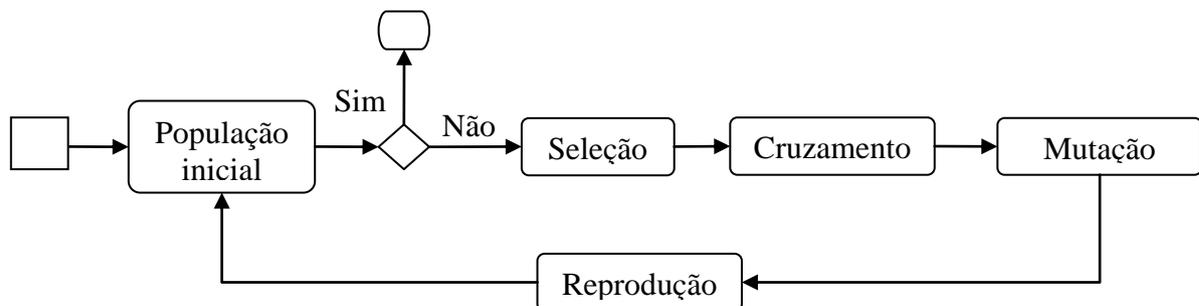


Figura 5 – Passos para o funcionamento do algoritmo genético

O critério de parada mais comum é pela limitação do número de gerações ou por um erro abaixo de um valor especificado pelo projetista para um determinado parâmetro do problema.

## 04 – MÉTODO

A planta que foi modelada pode ser vista na Fig. 6 mostrada abaixo. A otimização das constantes do controlador PID foi feita baseado nas funções de transferência de cada componente relevante para o processo. A modelagem da planta de controle é um pouco complexo e foi omitida deste trabalho, mas pode ser encontrada em Torres (2012). As funções de transferência de cada componente podem ser vista abaixo.

Função de transferência do tanque:

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{0,98}{508,62s + 1}$$

Função de transferência da bomba:

$$\frac{Q(s)}{V(s)} = 5,49$$

Função de transferência do controlador PID;

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

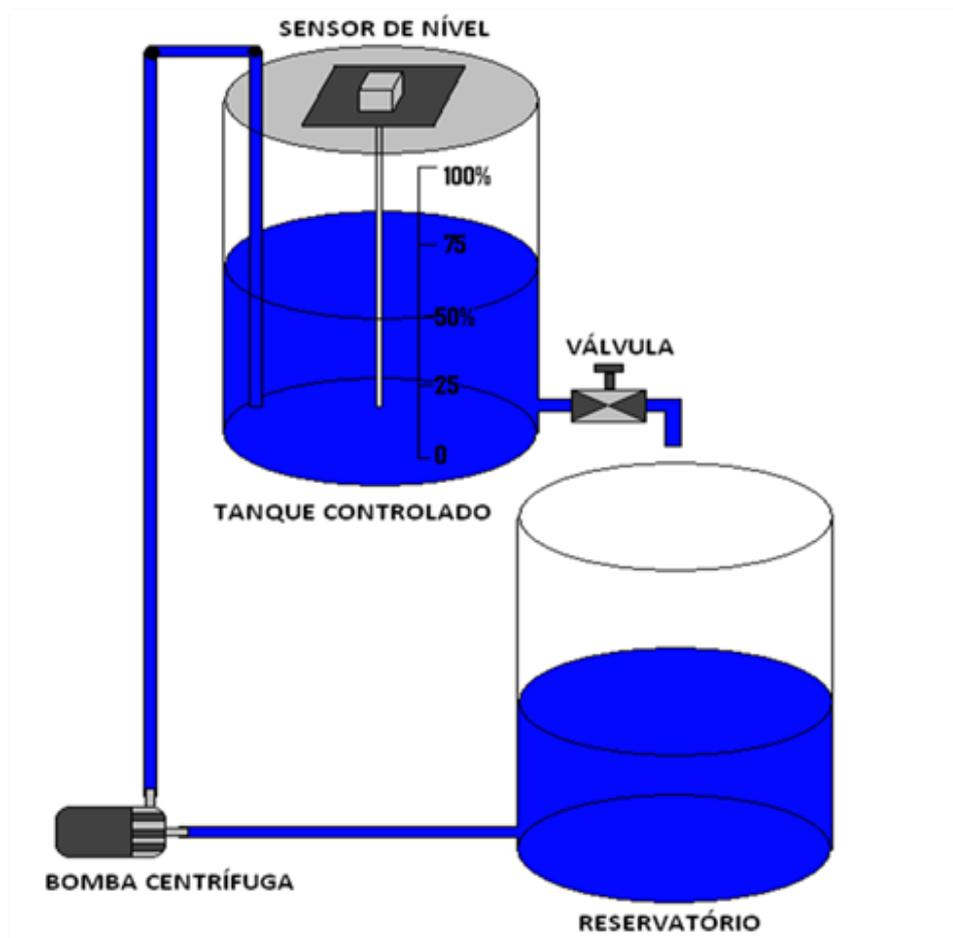


Figura 6 - Diagrama básico da planta desenvolvida.

Para realizar a sintonia ótima do controlador PID, o sistema de simulação foi implementado de acordo com o esquema da Fig. 7:

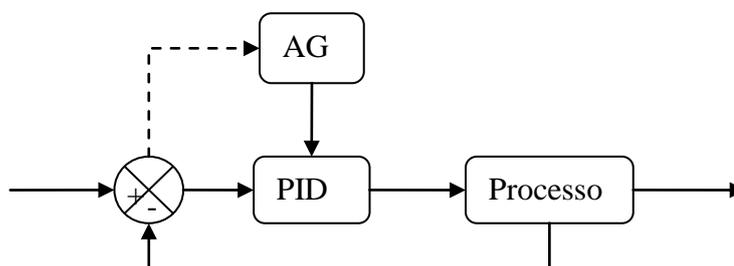


Figura 7 – Ajuste do Controlador PID através do AG

Para os experimentos com AG, foi utilizada uma biblioteca de rotinas (toolbox) criadas especialmente para trabalhar com AG no ambiente *Matlab*.

Muitos parâmetros controlam o processo de evolução em um AG, tais como: tamanho da população, taxa de cruzamento (Crossover), taxa de mutação e número de gerações, que é o número total de ciclos de evolução de um AG. A

Tabela. 1 apresenta os parâmetros adotados para o AG neste trabalho:

Tamanho da população	100	Taxa de cruzamento	0.4
Número de Gerações	100	Taxa de mutação	0.01

Tabela 1 - Parâmetros adotados para o AG

A função que realiza a avaliação (Fitness) é o ponto mais importante no desenvolvimento de um algoritmo genético. Essa função é específica para cada aplicação, e deve representar o comportamento dos cromossomos que, nesse caso, representam os parâmetros do controlador. A função Fitness deve fornecer a informação de qual é a proximidade de adequado do controlador, quando sintonizado com os parâmetros escolhidos pelo AG.

Como função de avaliação para este trabalho, foi adotada a minimização do erro ISE (integral do quadrado do erro absoluto) :

$$I_{ISE} = \int_0^T e^2(t) dt$$

## 05 – RESULTADOS

Para a simulação da resposta da planta de controle a principio foram utilizados os parâmetros do controlador PID em seus valores reais adotados durante o processo de controle da planta construída, esses parâmetros foram escolhidos segundo o método de Ziegler-Nichols, valores que foram julgados ótimos. Na Fig. 8 se pode ver a resposta do sistema. Lembrando que a entrada é do tipo degrau unitário  $R(s) = 1$ .

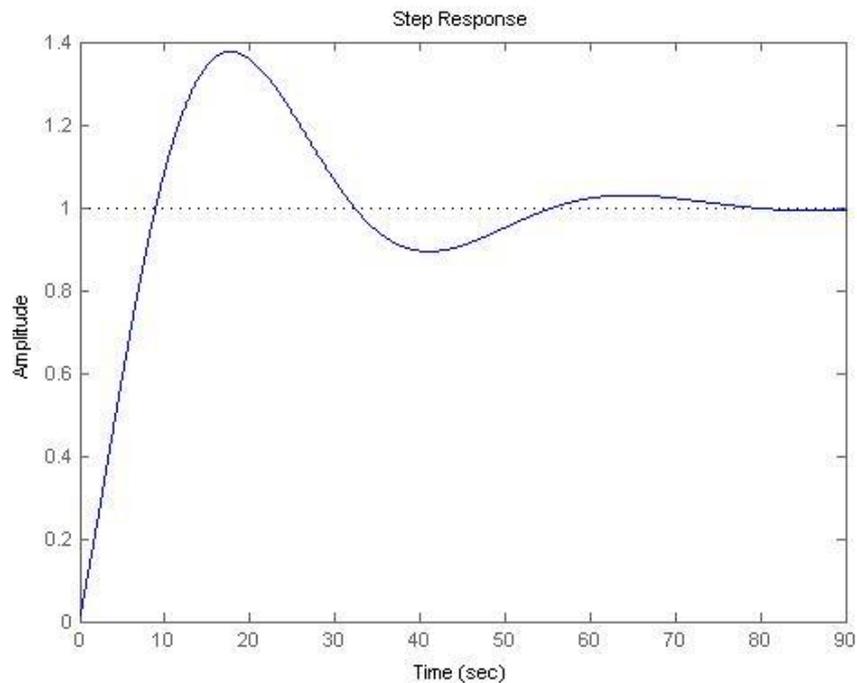


Figura 8 – Simulação para parâmetros reais originalmente adotados na planta

A mesma planta de controle agora com seus parâmetros do controlador PID otimizados pelo algoritmo Genético foi simulada e o resultado pode ser visto na Fig. 9. Os parâmetros encontrados pela otimização foram:  $K_p = 4.6812$ ,  $T_d = 0.0478$  e  $T_i = 4.4085$ .

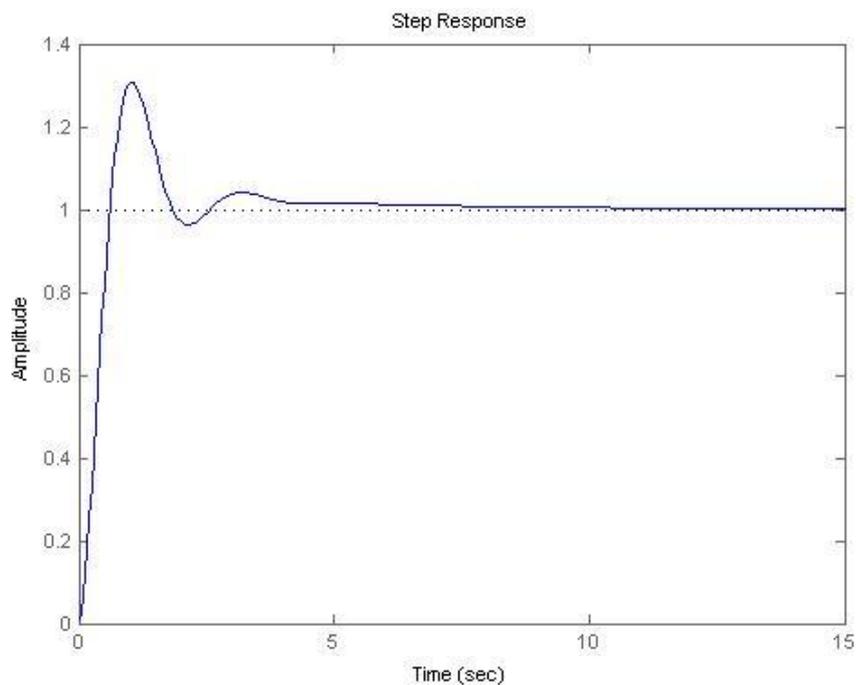


Figura 9 – Simulação para parâmetros otimizados.

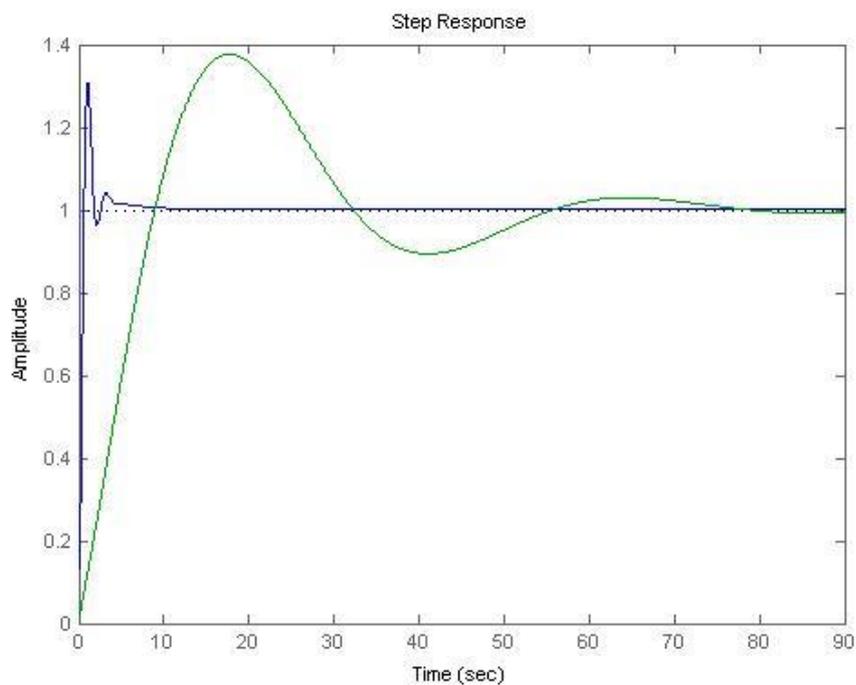


Figura 10 – Comparação entre as simulações

Evidentemente ficou bem claro a melhoria no processo de controle após a otimização dos parâmetros do controlador PID, para os parâmetros encontrados segundo o método de Ziegler-Nichols, que foram os valores originalmente utilizados na planta, nota-se uma demora de aproximadamente 90 segundos para a estabilização do processo, todavia para os novos parâmetros adotados após a otimização utilizando algoritmo genético tem-se que o processo se estabiliza há aproximadamente 15 segundos, ou seja, a otimização dos parâmetros melhorou o processo de controle em aproximadamente 80%, minimizando o tempo gasto.

## 06 – CONCLUSÃO

Este trabalho utilizou um algoritmo genético para a otimização dos parâmetros de um controlador PID, evidentemente como pode ser observado na Fig. 10 a técnica mostrou uma eficiência muito significativa, diminuindo o tempo do processo em aproximadamente 80%. Em suma, a técnica é muito pertinente.

## 07 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BINOUS, HOUSAM. *Dynamic and control of a tank using the genetic algorithm toolbox*. Tunisia, 2007. Disponível em: < <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/16523-dynamic-and-control-of-tank-s-height-using-genetic-algorithm-toolbox-and-fminsearch> > Acessado em 13 de Novembro de 2013.

FRANKLIN, G. F., POWELL, J. D., WORKMAN, M.L. *Digital Control of Dynamic Systems*. 3rd Edition, 1998.

GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Alabama: Addison-Wesley, 1989.

GRACE, A. *Optimization Toolbox- For use with Matlab*. Natick: The Math Works Inc. 1992. Disponível em:< [http://seweb.se.wtb.tue.nl/education/4J530/files/optim\\_tb.pdf](http://seweb.se.wtb.tue.nl/education/4J530/files/optim_tb.pdf) > Acessado em: 15 de Novembro de 2013.

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 05 Páginas 121-135
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

TORRES, Moisés de Matos. Otimização dos Parâmetros de um Controlador Proporcional, Integral e Derivativo por Algoritmo Genético para um Sistema de Controle de Nível de Líquido.

---

MATHEW, V.TOM. *Genetic Algorithm*. Department of Civil Engineering, Indian: Institute of Technology Bombay, 2003. Disponível em: < [https://datajobs.com/data-science-repo/Genetic-Algorithm-Guide-\[Tom-Mathew\].pdf](https://datajobs.com/data-science-repo/Genetic-Algorithm-Guide-[Tom-Mathew].pdf) > Acessado 14 de Novembro de 2013.

OGATA, KATSUHIKO. *Engenharia de Controle Moderno*. 4ª ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

SOCIOAMBIENTAL e APREMAVI, INSITUTO. *Pequeno Manual para Elaboração de Projetos*. São Paulo, 2001.

TORRES, MOISES DE MATOS. *Sistema de controle de nível de líquido de tanque utilizando bomba centrífuga de rotação variável*. Trabalho de graduação. Belo Horizonte, 2012. Disponível em:< <https://www.bu.ufmg.br/>> Acessado em: 12 de Novembro de 2013.

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 05 Páginas 121-135
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	<a href="mailto:periodicoscesg@gmail.com">periodicoscesg@gmail.com</a>	