

SÍNTESE DE CONTROLADOR PID PARA CONTROLE DE PH EM UM  
REATOR COM OTIMIZAÇÃO VIA ALGORITMOS GENÉTICOS

**MOISÉS DUARTE FILHO**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

AGOSTO – 2014

# SÍNTESE DE CONTROLADOR PID PARA CONTROLE DE PH EM UM REATOR COM OTIMIZAÇÃO VIA ALGORITMOS GENÉTICOS

**MOISÉS DUARTE FILHO**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientadora: Jacqueline Magalhães Rangel Cortes, D. Sc. UENF/LEPROD  
Co-orientador: Adelson Siqueira Carvalho, D. Sc. IFF CAMPUS CAMPOS-CENTRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

AGOSTO - 2014

# SÍNTESE DE CONTROLADOR PID PARA CONTROLE DE PH EM UM REATOR COM OTIMIZAÇÃO VIA ALGORITMOS GENÉTICOS

**Autor:**

**MOISÉS DUARTE FILHO**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Aprovado em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2014

Comissão Examinadora:

---

Prof. Geraldo Galdino de Paula Júnior (Doutor, Engenharia de Sistemas e Computação) – UENF/LEPROD

---

Prof. Alexandre Carvalho Leite (Doutor, Engenharia e Tecnologias Espaciais) – IFF CAMPUS CAMPOS-CENTRO

---

Prof<sup>a</sup>. Jacqueline Magalhães Rangel Cortes (Doutora, Ciências da Engenharia) – UENF/LEPROD (orientadora)

---

Prof. Adelson Siqueira Carvalho (Doutor, Informática na Educação) – IFF CAMPUS CAMPOS-CENTRO (co-orientador)

*“Ó profundidade das riquezas, tanto da sabedoria como da ciência de Deus! Quão insondáveis são os seus juízos, e quão inescrutáveis os seus caminhos! Quem compreendeu a mente do Senhor? Ou quem foi o Seu conselheiro? Ou quem lhe deu primeiro a Ele, para que lhe seja recompensado? Porque dEle e por Ele e para Ele são todas as coisas. Glória, pois, a Ele (Jesus Cristo) eternamente. Amém”*  
(carta de Paulo aos Romanos, cap. 11, versículos 33 a 36)

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer primeiramente a Deus, ao Senhor Jesus Cristo, pela oportunidade que me deu, com bênçãos de vida e saúde para completar esse curso. Se não fosse a graça e misericórdia dEle, não saberia onde estaria.

À minha digníssima e amada esposa, a qual Deus, em Sua infinita sabedoria e grandeza, me deu como benção e para me completar. Sem ela eu não sou nem a metade. Obrigado pela ajuda e apoio em tudo.

Aos meus pais, familiares e amigos, pelo incentivo e apoio.

À minha orientadora, Prof<sup>a</sup>. Jacqueline, e ao meu co-orientador, Prof. Adelson, pela paciência e dedicação ao aceitar o tema, e nas ajudas em momentos difíceis.

Ao Prof<sup>o</sup>. Alexandre, pela grande contribuição prestada ao trabalho, quando efetuou correções pertinentes e que engrandeceram este trabalho.

Ao órgão fomentador (CAPES), agradeço o apoio financeiro destinado a este trabalho.

## RESUMO

À medida que avançam os anos, novas tecnologias são descobertas e usadas nas diversas áreas de controle dos processos industriais, e se destacam por sua capacidade e habilidade de tomar decisões e modelar como pensa o especialista do processo. Contudo, a maioria dos processos industriais, em geral, utiliza a teoria clássica como método de sintonia para controladores PID (Proporcional, Integral, Derivativo), mesmo sendo complexos, não-lineares e multivariáveis. Com os processos cada vez mais complexos, a identificação e controle dos mesmos pela utilização da inteligência computacional têm-se intensificado. Diante da grande necessidade destes estarem bem sintonizados para que haja otimização, este trabalho busca uma alternativa de síntese de controladores PID (encontrar os valores ótimos dos seus parâmetros de acordo sem que haja todos os dados do processo industrial). Propõe-se o uso dos algoritmos genéticos (AG's), uma ferramenta utilizada em pesquisa operacional para solução de problemas de otimização, principalmente quando não se conhece o modelo matemático da planta, para se obter o objetivo deste trabalho, que foi aplicado em um estudo de caso. A progressiva implementação destas técnicas também vem de encontro à crescente necessidade de melhorar a eficiência das plantas industriais, além de outros fatores vinculados ao aprimoramento e tratamento de deficiências de métodos clássicos em sistemas de controle. O AG proposto obteve resultados satisfatórios, frente aos métodos clássicos de sintonia e critérios de desempenho, dada uma métrica de erro proposta para a função objetivo. Utiliza-se o programa MatLab<sup>TM</sup> por possuir um desempenho de simulação considerado bom para o sistema de controle e fornecer meios computacionais de desenvolvimento de controladores através de uma interface gráfica.

## ABSTRACT

As the years advance, new technologies are discovered and used in several areas of control of industrial processes, and are distinguished by their capacity and ability to make decisions and shape the expert thinking process. However, most industrial processes, in general, uses classical theory as a method for tuning PID controllers (Proportional, Integral, Derivative), even it had complexity, non-linear and multivariable. As the processes increase in complexity, their identification and control through the use of computational intelligence has been intensified. Given the increasing need of these processes be well tuned to result in optimization, this paper seeks an alternative tuning of PID controllers (it means, to find the optimal values of its parameters according to the industrial process data). It proposes the use of genetic algorithms (GA's), a tool used in operational research to solve optimization problems, especially when one does not know the mathematical model of the plant, to achieve the goal of this work, that was applied in a case study. The progressive implementation of these techniques also meet the increasing need of improvement of the industrial plants efficiency, plus other factors related to the improvement and treatment of the deficiencies of classical methods in control systems. The proposed GA achieved satisfactory results, if compared to the classical methods of tuning and performance criteria, given an error metric proposed for the fitness function. The MatLab™ program is used for having a performance of simulation considered good for the control system and provides computational means for development of controllers through a graphical interface.

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- AG – Algoritmo Genético
- AG's – Algoritmos Genéticos
- $G_{CR}$  – Ganho crítico
- IAE – Integral do valor absoluto do erro
- ITAE – Integral do produto do tempo pelo valor absoluto do erro
- K – Ganho do processo
- $K_P$  – Parâmetro do controlador proporcional
- $K_I$  – Parâmetro do controlador integral
- $K_D$  – Parâmetro do controlador derivativo
- MatLab™ – *Matrix Laboratory*. Programa utilizado para cálculos e simulação de sistema de controle
- MIMO – *Multiple Input Multiple Output*. Múltiplas entradas e Múltiplas saídas
- MV – Variável manipulada
- pH – Potencial Hidrogeniônico
- P – Controlador proporcional
- PI – Controlador proporcional + integral
- PD – Controlador proporcional + derivativo
- PID – Controlador proporcional + integral + derivativo
- PV – Variável do processo
- $\theta$  – Tempo morto
- Simulink – Programa utilizado para cálculos e simulação de sistema de controle
- SISO – *Single Input Single Output*. Uma entrada e uma única saída
- SP – *set-point*
- T – Constante de tempo
- $T_I$  – Tempo integral
- $T_D$  – Tempo derivativo

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Tela de supervisão para operação e controle do reator antigo R-3201.....  | 8  |
| Figura 2: Diagrama de blocos de um sistema de comando em malha aberta. ....   | 13 |
| Figura 3: Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada. ....   | 14 |
| Figura 4: Diagrama de blocos de um controle PID. Fonte: Adaptado de Ogata (2007).<br>.....  | 15 |
| Figura 5: Resposta típica do sinal de controle de um sistema PID de malha fechada.  |    |
| 22  |    |
| Figura 6: Resposta do processo de primeira ordem em malha aberta ( $r(t)$ = sinal de referência, <i>set-point</i> , $y(t)$ = sinal de saída do processo). Fonte: (Ogata, 2007)..... | 26 |
| Figura 7: Inteligência computacional-Taxonomia. Fonte: (Goldschmidt, 2010). ....  | 31 |
| Figura 8: Modelo genérico de otimização linear (Maximização). Fonte: (Paula Júnior, 2012). ....   | 32 |
| Figura 9: Método da roleta aplicado à população de 5 indivíduos.....  | 35 |
| Figura 10: <i>Crossover</i> de um ponto na representação binária. Fonte (Silva, 2006). ..   | 36 |
| Figura 11: Fluxograma de um AG. Fonte: (Andrade e Souza, 2010) .....  | 37 |
| Figura 12: Diagrama de blocos do processo em questão. Fonte: Adaptado de Ogata (2007).....  | 41 |
| Figura 13: Diagrama de blocos do controlador PID. Fonte: (Guimarães, 2013).....   | 42 |
| Figura 14: Fluxograma do AG proposto. Fonte: (Guimarães, 2013). ....  | 46 |
| Figura 15: Parâmetros do AG de Guimarães (2013) usados como referência para criação de parâmetros próprios. Fonte: (Guimarães, 2013).....   | 48 |
| Figura 16: Representação da ferramenta gatool do programa MatLab. ....  | 49 |
| Figura 17: Função gerada pelo gatool em arquivo “.m”.....   | 50 |
| Figura 18: Função objetivo (fitness), usada pelo AG, em arquivo “.m”.....   | 50 |
| Figura 19: Ajuste das variáveis de decisão do controlador PID através do AG.Fonte: (Nunes <i>et al.</i> , 2003/2004).....   | 52 |
| Figura 20: Diagrama de blocos da simulação no Simulink do processo, contendo função de 1ª ordem com tempo morto e ganho. ....   | 56 |
| Figura 21: Gráfico do AG proposto modificado <i>versus</i> SP. ....   | 57 |
| Figura 22: Gráfico da convergência da primeira simulação da função objetivo do AG proposto .....  | 57 |
| Figura 23: Gráfico do AG proposto novo e usado como parâmetro de comparação <i>versus</i> SP.....   | 58 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 24: Gráfico da sintonia do PID pelo método de Ziegler e Nichols <i>versus</i> SP.                    | 59 |
| Figura 25: Gráfico da sintonia do PID pelo método de Cohen e Coon <i>versus</i> SP.....                     | 61 |
| Figura 26: Gráfico da sintonia do PID pelo método IAE de Lopez <i>et al.</i> (1967) <i>versus</i> SP. ....  | 62 |
| Figura 27: Gráfico da sintonia do PID pelo método ITAE de Lopez <i>et al.</i> (1967) <i>versus</i> SP.....  | 63 |
| Figura 28: Gráfico da sintonia do PID pelo método IAE de Rovira <i>et al.</i> (1969) <i>versus</i> SP. .... | 64 |
| Figura 29: Gráfico da sintonia do PID pelo método ITAE de Rovira <i>et al.</i> (1969) <i>versus</i> SP..... | 65 |
| Figura 30: Gráfico comparativo entre o AG proposto neste trabalho e os métodos de sintonia citados.....     | 67 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1: Problemas típicos encontrados em malhas auditadas .....   | 4  |
| Tabela 2: Efeitos das ações do controlador PID sobre o processo e a função do ganho. ....   | 19 |
| Tabela 3: Legendas da Figura 5.....   | 22 |
| Tabela 4: Índices de desempenho para avaliação do controle em malha fechada ...   | 22 |
| Tabela 5: Método de Ziegler e Nichols em malha fechada.....   | 25 |
| Tabela 6: Fórmulas para o cálculo dos parâmetros PID para o método de Ziegler e Nichols em malha aberta.....                      | 26 |
| Tabela 7: Fórmulas para os cálculos dos parâmetros PID para o método de Cohen-Coon.....   | 27 |
| Tabela 8: Constantes para cálculo da sintonia do PID segundo método da Integral do Erro de Lopez <i>et al.</i> (1967).....        | 28 |
| Tabela 9: Constantes para cálculo da sintonia do PID segundo método da Integral do Erro de Rovira <i>et al.</i> (1969). ....      | 29 |
| Tabela 10: parâmetros de configuração do AG no <i>gatool</i> do MatLab .....  | 51 |
| Tabela 11: Critérios de desempenho do controlador sintonizado pelo AG proposto.   | 58 |
| Tabela 12: Critérios de desempenho do controlador sintonizado pelo método de Ziegler e Nichols.....                               | 60 |
| Tabela 13: Critérios de desempenho do controlador sintonizado pelo método de Cohen e Coon. ....                                   | 61 |
| Tabela 14: Critérios de desempenho do controlador sintonizado pelo método IAE de Lopez <i>et al.</i> (1967). ....                 | 62 |
| Tabela 15: Critérios de desempenho do controlador sintonizado pelo método ITAE de Lopez <i>et al.</i> (1967).....                 | 63 |
| Tabela 16: Critérios de desempenho do controlador sintonizado pelo método IAE de Rovira <i>et al.</i> (1969).....                 | 64 |
| Tabela 17: Critérios de desempenho do controlador sintonizado pelo método ITAE de Rovira <i>et al.</i> (1969).....                | 65 |
| Tabela 18: Comparativo entre os Critérios de desempenho do controlador sintonizado pelos métodos apresentados neste trabalho..... | 66 |

## SUMÁRIO

|   |             |
|---|-------------|
| <b>AGRADECIMENTOS</b> .....   | <b>v</b>    |
| <b>RESUMO</b> .....   | <b>vi</b>   |
| <b>ABSTRACT</b> .....   | <b>vii</b>  |
| <b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b> .....   | <b>viii</b> |
| <b>LISTA DE FIGURAS</b> .....   | <b>ix</b>   |
| <b>LISTA DE TABELAS</b> .....   | <b>xi</b>   |
| <b>CAPÍTULO I</b> .....   | <b>1</b>    |
| <i>INTRODUÇÃO</i> .....   | 1           |
| 1.1- <i>APRESENTAÇÃO</i> .....  | 1           |
| 1.2- <i>MOTIVAÇÃO</i> .....   | 2           |
| 1.3- <i>OBJETIVOS</i> .....   | 4           |
| 1.4- <i>METODOLOGIA</i> .....   | 5           |
| 1.5- <i>ORGANIZAÇÃO</i> .....   | 5           |
| <b>CAPÍTULO II</b> .....  | <b>7</b>    |
| 2.1- <i>UM ESTUDO DE CASO: CONTROLE DE PH NUM REATOR DE UMA INDÚSTRIA QUÍMICA</i> ..... | 7           |
| <b>CAPÍTULO III</b> .....   | <b>10</b>   |
| <i>FERRAMENTAL TEÓRICO</i> .....  | 10          |
| 3.1- <i>BREVE INTRODUÇÃO DE CONTROLE AUTOMÁTICO</i> .....                               | 10          |
| 3.1.1- <i>CONTROLADORES CLÁSSICOS</i> .....   | 11          |
| 3.1.2- <i>CONTROLADORES AVANÇADOS</i> .....   | 12          |
| 3.1.3- <i>SISTEMAS DE CONTROLE</i> .....  | 13          |
| 3.1.3.1- <i>COMANDO EM MALHA ABERTA</i> .....   | 13          |
| 3.1.3.2- <i>CONTROLE EM MALHA FECHADA</i> .....   | 14          |
| 3.2- <i>CONTROLADORES</i> .....   | 14          |
| 3.2.1- <i>CONTROLADOR PROPORCIONAL - INTEGRAL – DERIVATIVO</i> .....                    | 15          |
| 3.2.1.1- <i>AÇÃO PROPORCIONAL</i> .....   | 16          |
| 3.2.1.2- <i>AÇÃO INTEGRAL</i> .....   | 16          |
| 3.2.1.3- <i>AÇÃO DERIVATIVA</i> .....   | 17          |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.2.1.4- CONTROLADOR PROPORCIONAL, INTEGRAL E DERIVATIVO (PID) | 18        |
| 3.3- SÍNTESE DE CONTROLADORES PID                              | 20        |
| 3.3.1- CRITÉRIOS DE DESEMPENHO                                 | 20        |
| 3.3.2- MÉTODOS DE SINTONIA                                     | 23        |
| 3.3.2.1- MÉTODO DE ZIEGLER E NICHOLS                           | 24        |
| 3.3.2.2- MÉTODO DE COHEN E COON                                | 27        |
| 3.3.2.3- MÉTODO DA INTEGRAL DO ERRO                            | 27        |
| 3.4- INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL                                | 30        |
| 3.4.1- CLASSIFICAÇÃO DA IC                                     | 31        |
| 3.4.2- ALGORITMOS GENÉTICOS                                    | 31        |
| 3.4.2.1- CARACTERÍSTICAS DOS AG'S                              | 33        |
| 3.4.2.2- SELEÇÃO PELO MÉTODO DA ROLETA                         | 35        |
| 3.4.2.3- CRUZAMENTO  | 36        |
| 3.5- ESTADO DA ARTE  | 37        |
| <b>CAPÍTULO IV</b>   | <b>40</b> |
| METODOLOGIA  | 40        |
| 4.1- MODELAGEM E CONTROLE DE PROCESSOS                         | 40        |
| 4.2- SINTONIA DO CONTROLADOR PID COM USO DE AG'S               | 40        |
| MODELAGEM DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO                            | 40        |
| 4.2.1- USO DA TRANSFORMADA DE LAPLACE                          | 42        |
| 4.2.2- ESTRUTURAÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO DO PROBLEMA             | 44        |
| 4.2.3- O ALGORITMO GENÉTICO PROPOSTO                           | 45        |
| 4.2.3.1- USO DA FERRAMENTA GATOOL NO MATLAB                    | 48        |
| 4.2.3.2- SIMULAÇÃO EM MALHA FECHADA                            | 51        |
| <b>CAPÍTULO V</b>  | <b>53</b> |
| RESULTADOS   | 53        |
| 5.1- PLANTA COM FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE PRIMEIRA ORDEM      | 53        |
| 5.1.1- ADIÇÃO DE GANHO E TEMPO MORTO                           | 54        |
| 5.2- SINTONIA COM OTIMIZAÇÃO PELO AG PROPOSTO                  | 55        |
| 5.3- SINTONIA PELOS MÉTODOS CLÁSSICOS                          | 59        |
| 5.3.1- MÉTODO DE ZIEGLER E NICHOLS                             | 59        |

|   |           |
|---|-----------|
| 5.3.2- SINTONIA PELO MÉTODO DE COHEN E COON.....              | 60        |
| 5.3.3- SINTONIA PELO MÉTODO IAE DE LOPEZ ET AL. (1967).....   | 61        |
| 5.3.4- SINTONIA PELO MÉTODO ITAE DE LOPEZ ET AL. (1967).....  | 62        |
| 5.3.5- SINTONIA PELO MÉTODO IAE DE ROVIRA ET AL. (1969).....  | 63        |
| 5.3.6- SINTONIA PELO MÉTODO ITAE DE ROVIRA ET AL. (1969)..... | 64        |
| 5.4- COMPARAÇÃO ENTRE O AG E AS DEMAIS SINTONIAS.....         | 66        |
| <b>CAPÍTULO VI.....</b>                                       | <b>68</b> |
| CONCLUSÕES.....   | 68        |
| 6.1- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....                    | 69        |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                        | <b>70</b> |

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1- APRESENTAÇÃO

O problema abordado neste trabalho decorre do uso de otimização ter se tornado chave em tomada de decisões que geram vantagens competitivas nas empresas e processos industriais.

Ela se inicia com a elaboração de um modelo que define o problema e seus parâmetros. Cada situação se representa por uma variável, a ligação entre elas é formulada através de restrições, e, por último, um objetivo é proposto para o problema (por exemplo, a maximização do lucro ou minimização do custo). A modelagem é necessária para, virtualmente, qualquer problema de otimização, pois cada processo possui características particulares e distintas um do outro, como tratado em Edgar *et al.* (2001) e Campos (2007), que tratam de modelagem de processos químicos. O modelo é então processado com o uso de softwares, o tratamento dos dados e análise de possíveis soluções ótimas do problema. Estes modelos, se projetados com confiabilidade, trazem possibilidades de aumento de ganhos para as indústrias, como exemplo aumento da segurança, com a prevenção de situações indesejadas; aumento da confiabilidade, com a redução da variabilidade, já que o sistema opera em sua região ótima de valores; e o aumento da rentabilidade, com a otimização do processo.

Estes sistemas, que são dinâmicos (sistemas cujas variáveis dependem do próprio estado em valores precedentes do atual domínio em questão, que pode ser tempo, espaço, etc.) encontrados na prática são, em última análise, não lineares. É bem verdade que em alguns casos aproximações lineares são suficientes para aplicações práticas, como visto em Carvalho (2008). Eles estão presentes na maioria dos processos de transformação, onde as variáveis que influenciam na qualidade do produto final são contínuas.

A proposta deste trabalho é utilizar a otimização de processos como método alternativo (ou seja, não utilizar os métodos clássicos) para síntese de controladores PID, para modelos de plantas não conhecidas, com função de 1ª ordem e tempo morto. Um exemplo de aplicação, dentre diversos, é um controlador de pH em um

reator de uma empresa química de Campos dos Goytacazes – RJ, o qual foi alvo de estudo de caso. Estima-se que mais de 85% das malhas de controle de uma planta de processo industrial, como as da área petroquímica, utilizam este tipo de controlador, pois o mesmo possui somente três parâmetros a serem ajustados (Campos e Saito, 2004). De acordo com Duarte Filho *et al.* (2013), os objetivos do controlador em questão podem ser os seguintes, dentre outros:

- controlar e operar automaticamente processos complexos, não-lineares e multivariáveis, com desempenho pelo menos equivalente ao dos operadores;
- respeitar as especificações e restrições operacionais;
- ser simples, robusto e operar em tempo real, obedecendo ao Princípio da Parcimônia<sup>1</sup>.

Por isso, o presente trabalho propõe o exposto em seu conteúdo, dado a significância da otimização da sintonia de controladores para a eficiência almejada pelas indústrias de processos.

## 1.2- MOTIVAÇÃO

Pesquisa operacional é o nome dado a um conjunto de modelos e algoritmos destinados a determinar o melhor curso das ações que visam garantir o funcionamento ótimo de sistemas, sob restrições de recursos escassos (Paula Júnior, 2012). Ao se analisar a área de Inteligência Computacional, percebe-se a existência de um grande e crescente interesse de novas aplicações em controle quanto na otimização das aplicações existentes, sempre buscando por respostas rápidas e desempenho ótimo para os sistemas controlados.

Nesse contexto, é importante destacar que este trabalho caracteriza-se, por sua aplicabilidade na otimização dos parâmetros do controlador através do AG, com o diferencial de possibilitar o encontro do valor ótimo da função objetivo, que traz em si os valores ótimos das variáveis de decisão, que são os parâmetros em questão. A expansão das aplicações da IC na área de controle pode ser confirmada a partir de sua crescente utilização em trabalhos acadêmicos, os quais se utilizam das técnicas de lógica *fuzzy*, redes neurais e AG's. Esta última técnica, objeto desta pesquisa, é

---

<sup>1</sup> Princípio filosófico largamente empregado na Ciência (e. g. Gaudio e Zandonade, 2001), proposto por Ockam, filósofo inglês do século XVII, que enuncia que se existe mais de uma explicação para uma dada observação, deve-se adotar aquela mais simples. Extraído de: <http://adi-38.bio.ib.usp.br/sbg2k/prinpar.html>. Acessado em 24/02/13.

um algoritmo de busca e otimização, baseada em conceitos biológicos e na teoria evolutiva descrita por Charles Darwin, o qual busca pelas melhores soluções de um determinado problema através da estratégia de sobrevivência do mais apto (Holland, 1975 *apud* Koza, 1998).

A maioria dos controladores PID utilizados são ajustados em campo, algumas vezes por métodos de tentativa-e-erro, outras por diferentes tipos de regras de sintonia, as quais vêm sendo propostas na literatura. Ogata (2007) diz que a utilidade dos controladores PID está na sua aplicabilidade na maioria dos sistemas de controle. Em particular, quando o modelo matemático da planta não é conhecido e, portanto, métodos de projeto analítico não podem ser utilizados, controles PID se mostram os mais úteis. Na área dos sistemas de controle de processos, sabe-se que os esquemas básicos de controle PID e os controles PID's modificados provaram sua utilidade conferindo um controle satisfatório, embora em muitas situações eles podem não proporcionar um controle ótimo.

Apesar do constante surgimento de outras tecnologias na área de controle de processos, o controlador PID continua sendo o mais utilizado, e, nem por isso, bem sintonizado. Evidencia-se isso através de algumas citações a seguir, encontradas em Andrade e Souza (2010), e é o que sustenta a busca do presente trabalho por uma síntese não-convencional:

Controladores PID são utilizados em grande número em todas as indústrias. Os controladores vêm em muitas formas diferentes, são como pacotes de produtos padrão, e são produzidos em massa. A popularidade dos controladores PID é devido à sua simplicidade funcional e confiança. Eles provêem desempenho robusto e seguro para a maioria dos sistemas se os parâmetros do PID forem determinados ou ajustados para assegurar um desempenho satisfatório em malha fechada (Moradi *et al.*, 2002).

Estima-se que mais de 85% das malhas de controle de uma planta de processo industrial, como as da área petroquímica, utilizam este tipo de controlador, o PID, pois possui somente três parâmetros a serem ajustados (Campos e Saito, 2004).

Um levantamento feito com mais de 11000 controladores utilizados em refinarias, indústrias químicas e indústrias de papel e celulose mostraram que 97% dos controladores regulatórios tinham a estrutura PID. (Åström e Hägglund, 2004).

A Tabela 1 mostra claramente que uma das grandes deficiências do desempenho das malhas de controle, dentre outros fatores, reside em

sintonias inadequadas dos controladores, especialmente os de estrutura PID. Embora os métodos iniciais de sintonia existam há mais de 60 anos a questão é, atualmente, tema contínuo de pesquisas e desenvolvimento, sem perspectivas de se esgotar (Carmo e Gomes, 2008).

Tabela 1: Problemas típicos encontrados em malhas auditadas

| <b>Problemas Típicos das Malhas de Controle</b>       | <b>Percentual da Malhas Auditadas</b> |
|---|---------------------------------------|
| Válvulas de controle com problemas                    | 30%                                   |
| Problemas de sintonia (parâmetros incoerentes)        | 30%                                   |
| Problemas de sintonia (comprometimento do desempenho) | 85%                                   |
| Estratégia de controle inadequada                     | 15%                                   |
| Controlador em manual                                 | 30%                                   |
| Desempenho da malha insatisfatório                    | 85%                                   |
| Malhas com melhor desempenho em automático que manual | 25%                                   |

Fonte: (Carmo e Gomes, 2008)

Portanto, deseja-se, com este estudo, difundir o assunto ou pelo menos ideias para novas pesquisas dentro do estudo dos AG's e suas aplicações em otimizações de processos.

### 1.3- OBJETIVOS

Projetar, sintonizar e verificar um controlador PID, utilizando AG's como instrumento de otimização dos valores ótimos das variáveis de decisão, que são os parâmetros de síntese do controlador, para controle de malhas de processos industriais que se aproximam de uma função de primeira ordem com tempo morto. Utiliza-se, como exemplo, um controlador de pH em um reator, comumente encontrado como misturador em plantas industriais químicas.

Comparação desta sintonia proposta com os métodos clássicos de sintonia de controladores PID.

Para se chegar a esse objetivo, faz-se necessário também a modelagem da função objetivo do AG, que se aproxime da modelagem real encontrada no processo.

Como objetivo intermediário pode-se destacar o domínio do ferramental teórico que será utilizado (AG's e domínio das ferramentas do MatLab™ para uso com AG's).

## 1.4- METODOLOGIA

Para o alcance dos objetivos estabelecidos para este trabalho, houve necessidade das seguintes realizações:

- Fundamentação nas metodologias utilizadas na construção de AG's aplicados à sintonia de controladores PID, bem como a familiarização com a ferramenta *gatool* do MatLab;
- Utilização dos métodos de sintonia tradicionais para os valores dos parâmetros (variáveis de decisão) do controlador PID, para comparação com a síntese feita por AG.
- Projetar um controlador que possibilite o controle de um processo com função de transferência de 1ª ordem e tempo morto a partir da implementação do método de controle no AG proposto neste trabalho.
- Comparar experimentalmente os resultados obtidos a partir do AG proposto frente aos resultados de outros métodos tradicionais publicados na literatura.

## 1.5- ORGANIZAÇÃO

A dissertação está organizada da seguinte forma:

### *Capítulo I – Introdução*

Esse capítulo apresenta uma introdução a respeito dos assuntos que serão abordados ao longo do texto, descrevendo de forma sucinta os objetivos, a motivação, metodologia e como estão organizados os capítulos.

### *Capítulo II – Um Estudo de Caso*

O segundo capítulo trata de questões relativas ao problema abordado (síntese de controlador PID via AG) em um exemplo prático. Para isso foi feita uma pesquisa *in loco*, sobre um processo de mistura entre um determinado ácido e base em um reator, com controle de pH.

### *Capítulo III – Ferramental Teórico*

No terceiro capítulo, são apresentados conceitos relativos ao controle automático de processos (clássico e avançado); métodos de sintonia tradicionais para o controlador PID e seu parâmetros; e uma fundamentação em Algoritmos Genéticos. Este capítulo contém explanação sobre os pontos mais importantes de tal técnica e também o estado da arte.

#### *Capítulo IV – Metodologia*

A partir do ferramental teórico apresentado nos capítulos anteriores, desenvolve-se neste a metodologia utilizada para aplicação dos dados do problema real. Os artifícios e detalhes técnicos são apresentados e os critérios utilizados nas etapas da metodologia para obtenção da sintonia via AG.

#### *Capítulo V – Resultados Obtidos*

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio da aplicação da metodologia. O desempenho do controlador ajustado será verificado por critérios de desempenho para sintonia de controladores PID, e seus resultados serão listados em tabelas e de forma gráfica, com comparações feitas aos métodos clássicos de sintonia.

#### *Capítulo VI – Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros*

O último capítulo apresenta as conclusões em relação ao desenvolvimento do trabalho. Sugestões de trabalhos futuros também são apresentadas.

## CAPÍTULO II

### 2.1- UM ESTUDO DE CASO: CONTROLE DE PH NUM REATOR DE UMA INDÚSTRIA QUÍMICA

O trabalho estabeleceu contato com uma empresa que produz certo tipo de ácido usado na indústria alimentícia e afim, para exemplificação da aplicação da técnica proposta. Em uma visita realizada à referida empresa, uma fonte primária forneceu alguns dados aproximados de partes de seus processos industriais. Uma das variáveis controladas em toda a planta industrial dessa empresa é o pH (potencial Hidrogeniônico - uma escala logarítmica que mede o grau de acidez, neutralidade ou alcalinidade de uma determinada solução; o mesmo varia de acordo com a temperatura e a composição de cada substância, como concentração de ácidos, metais, sais, etc.). Em um reator se realiza um controle direto do pH, através da adição de determinada base (variável manipulada) à mistura. Há entrada contínua de determinado ácido na mistura, e o controlador destinado à variável pH, o "PHIC", controla a vazão de base no reator. Estas variáveis podem ser contempladas na figura 1 a seguir, onde a fonte primária permitiu que fosse fotografada a tela de supervisão desse processo.

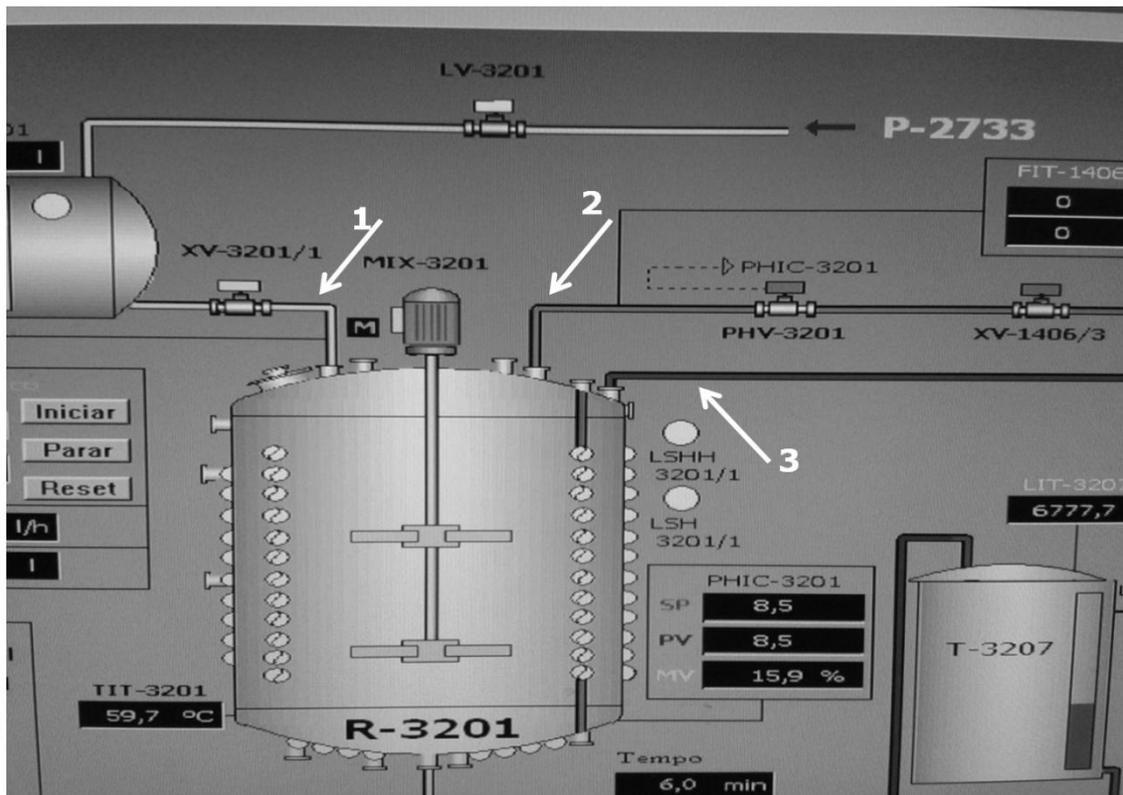


Figura 1: Tela de supervisão para operação e controle do reator antigo R-3201.

Nota-se, pela figura 1, que na parte superior do reator R-3201 há entrada de ácido, caracterizada pela cor amarela (“seta 1”) em sua tubulação; o controlador PHIC-3201 controlando a vazão de base, através da válvula PHV-3201, caracterizada pela cor cinza (“seta 2”) em sua tubulação; e a entrada da realimentação da mistura, caracterizada pela cor marrom (“seta 3”). Este retorno do produto ao reator é usado para não permitir que a mistura fique viscosa demasiadamente e cause distúrbios nos outros objetivos na continuação do processo. Isto foi informado pelo operador, que estava presente na hora da visita.

Este informou alguns dados sobre o processo:  $SP = 8,5$ ;  $PV \cong 9$ ;  $MV \cong 16\%$ ; vazão de saída de mistura = 1000 L/min; e sobre o controlador PID utilizado no PHIC-3201:  $K_P = 1$ ;  $K_I = 6$ ;  $K_D = 0$ . E também disse que a sintonia do controlador PID foi realizada pelo método de tentativa-e-erro. No tempo de visita a sala de controle, o pH (variável do processo - PV) ficava sempre oscilando em torno do *set-point* e não se estabilizava. Os dados do controlador PID expostos acima (SP, PV, MV) também podem ser visualizados na figura 1. Outros dados, como vazões de entrada de ácido, base e mistura; potencial de homogeneização da mistura, etc., importantes ao levantamento da modelagem do processo e do controle não foram obtidos, por

segurança da própria empresa. Por isso o trabalho buscou fazer a síntese do controlador PID via AG – uma técnica heurística, já que o modelo matemático não foi possível (o que permitiria uma solução analítica do problema). Toma-se como base a literatura acadêmica e simulações computacionais feitas no MatLab, o que será mostrado no Capítulo IV.

## **CAPÍTULO III**

Este capítulo irá abordar conceitos fundamentais ao desenvolvimento do presente trabalho. A Seção 3.1 apresenta uma breve introdução de controle automático e as principais características dos sistemas de controle. Na Seção 3.2, definições de controladores são mostradas. Na Seção 3.3 são abordadas as sintonias. Na Seção 3.4 é introduzida a Inteligência Computacional com ênfase na a estrutura de execução dos AG's. Finalmente, na Seção 3.5 é feita uma discussão dos trabalhos mais recentes relacionados à sintonia PID por meio de inteligência computacional com abordagem em AG's.

### **FERRAMENTAL TEÓRICO**

#### **3.1- BREVE INTRODUÇÃO DE CONTROLE AUTOMÁTICO**

A engenharia diz respeito ao conhecimento e ao controle de materiais e forças da natureza para o benefício da humanidade. Os objetivos duplos de conhecimento e controle são complementares, uma vez que o controle efetivo de sistemas requer que os sistemas sejam compreendidos e modelados. Além disso, a engenharia de controle deve considerar muitas vezes o controle de sistemas mal conhecidos, como sistemas de processos químicos. Por isso, a engenharia de controle não está limitada a qualquer um dos ramos da engenharia. Um sistema de controle nada mais é que uma interconexão de componentes formando uma configuração que produzirá uma resposta desejada ao mesmo, o que supõe uma relação de causa e efeito para os seus componentes.

Segundo Ogata (2007), o controle automático desempenha um papel fundamental no avanço da engenharia e da ciência. Além da extrema importância em diversos sistemas (espaciais, robóticos, etc.), o controle automático se tornou importante e parte integrante dos processos industriais modernos e de produção, como por exemplo, ele é essencial em operações industriais como o controle de pressão, de temperatura, de umidade, de vazão e afins. Um trabalho significativo de controle automático foi o regulador centrífugo construído por James Watt para o controle de velocidade de uma máquina a vapor, no século XVIII. Trabalhos importantes no início do desenvolvimento da teoria de controle se devem a autores como Minorsky, Hazen e Nyquist, só para citar alguns. Os métodos de resposta em

frequência e de lugar das raízes, que são essenciais para a teoria clássica de controle, conduziram a sistemas estáveis e que satisfazem determinado conjunto de condições de desempenhos. Esta teoria clássica, que trata somente de sistemas com uma entrada e uma saída, *tornou-se insuficiente para sistemas com múltiplas entradas e saídas* (Ogata, 2007), à medida que os sistemas modernos de processos se tornam mais complexos (várias entradas e saídas).

Como o avanço no controle automático produz meios para otimizar, na teoria e na prática, o desempenho dos sistemas dinâmicos (melhorar a produtividade, aumentar os lucros minimizando os custos, diminuir operações manuais repetitivas, entre outros), ele foi usado como um dos pilares deste presente trabalho, pois os engenheiros devem ter bons conhecimentos nessa área para otimização de processos levando a valores ótimos de sintonia e controle dos mesmos. De acordo com Campos e Teixeira (2006), no atual mercado competitivo, as empresas se vêem na obrigação de melhorar continuamente a produtividade de suas plantas industriais. E uma das áreas tecnológicas fundamentais para se aumentar a rentabilidade é a de controle, automação e otimização de processos.

### **3.1.1- CONTROLADORES CLÁSSICOS**

Os métodos clássicos de controle automático baseados em controladores do tipo PID (e. g. Campos e Saito, 2004; Ogata, 2007) são os mais utilizados em malhas de controle, pois são simples, eficientes e têm uma base teórica bem desenvolvida e consolidada. Entretanto, existe o difícil fato de encontrar esse tipo de controlador bem sintonizado nos processos em que são empregados. Um dos motivos é que a sintonia dos parâmetros do controlador não é de todo simples. Em muitos casos são sintonizados através de métodos heurísticos, e se não forem bem efetuados, geralmente resultam em controladores mal sintonizados (Swiech, 2005a). Outra desvantagem desses controladores é que possuem parâmetros fixos enquanto os sistemas dinâmicos reais apresentam-se, em sua quase totalidade, como sistemas não lineares e com parâmetros variáveis no tempo, segundo Pires (2007). Isto pode implicar na variação do comportamento dinâmico do sistema controlado, podendo inclusive levar o sistema à instabilidade.

### 3.1.2- CONTROLADORES AVANÇADOS

A teoria de inteligência computacional para sintonia de controladores vem sendo amplamente aplicada nos últimos anos. Um dos motivos disto é a abstração do projetista, em muitos casos, de saber as técnicas de sintonia de controladores convencionais devido à capacidade de aprendizado e de adaptação dos mesmos. Assim, diminui-se o esforço humano no desenvolvimento do controlador e em consequência o tempo gasto também é bem menor. As metodologias de sintonia de controladores convencionais apresentam, normalmente, resultados pouco satisfatórios, já que, além de serem trabalhosas, os parâmetros do controlador obtidos no projeto, quando utilizados na prática, apresentam resultados insatisfatórios e isso favorece o emprego de métodos empíricos para a sintonia de seus parâmetros.

Outra vantagem em se utilizar controladores baseados em inteligência computacional está ligada ao fato dos mesmos trabalharem naturalmente com sistemas não-lineares. Além disso, permitem o tratamento de incertezas e informações vagas com mais facilidade (Pires, 2007). O desenvolvimento da inteligência computacional, por pesquisadores das mais diversas áreas do conhecimento, tem levado a promissores resultados quanto à abrangente aplicabilidade das técnicas inteligentes não apenas no meio científico (Coelho e Coelho, 1999). As aplicações industriais, militares e produtos comerciais que empregam com sucesso técnicas, tais como: sistemas nebulosos (*fuzzy*), redes neurais artificiais, redes neurais nebulosas, computação evolutiva, *simulated annealing*, sistemas especialistas, sistemas híbridos inteligentes e teoria do caos, têm motivado crescentes investimentos em pesquisa na área, principalmente por órgãos governamentais e privados dos Estados Unidos, Japão e Europa (Katayama *et al.*, 1993). Na maioria dos processos industriais, o ponto ótimo operacional varia constantemente para atender as exigências de demanda do mercado, as flutuações dos custos e disponibilidade das matérias-primas, produtos e insumos, assim como devido a mudanças na eficiência de equipamentos e aspectos ambientais. O bom desempenho operacional de um processo requer uma integração o mais conciso possível entre a otimização e o controle (Lacerda *et al.*, 2004).

A maior parte das aplicações é empregada sem eliminar o controle regulatório (mantido pelas empresas como forma de garantia em caso de falhas (Maitelli e

Cavalcanti, 2006)), e os sistemas dinâmicos encontrados na prática são, em última análise, não-lineares (Carvalho, 2008). Sistemas dinâmicos estão presentes na maioria dos processos de transformação, onde as variáveis, que influenciam na qualidade do produto final, dependem de seus valores precedentes do atual, no domínio em questão.

### 3.1.3- SISTEMAS DE CONTROLE

Os sistemas de controle possuem como objetivo geral manter um sinal de saída em um comportamento pré-determinado a partir da aplicação de sinais adequados na entrada de controle, e busca a minimização ou eliminação total dos efeitos causados por perturbações sobre o comportamento do sinal de saída. De acordo com a forma em que o sinal de controle é determinado, pode-se classificar a estratégia de controle como em comando em malha aberta ou controle em malha fechada (Ogata, 2007; Phillips e Harbor, 1997).

#### 3.1.3.1- COMANDO EM MALHA ABERTA

O comando em malha aberta ocorre sem que haja uso da informação do processo (informação da variável controlada, por exemplo) para controle do mesmo. É usado geralmente para alarmar, registrar ou indicar o valor da PV. Ou, em outras palavras, a partir da aplicação de um sinal de controle  $u(t)$  predefinido, a variável controlada  $y(t)$  (sinal de saída) apresenta um determinado comportamento ou valor, sem que seja feita medição do sinal de saída, o que pode ser visto na figura 2:

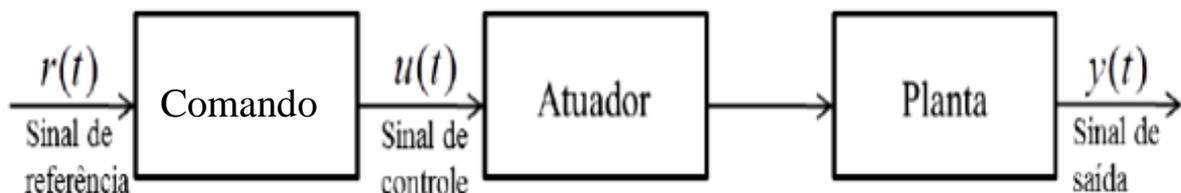


Figura 2: Diagrama de blocos de um sistema de comando em malha aberta.

Fonte: Adaptado de Ogata (2007).

### 3.1.3.2- CONTROLE EM MALHA FECHADA

No controle em malha fechada, contrariamente, utiliza a informação do processo para efetuar o controle do mesmo. Ou seja, o sinal de saída  $y(t)$  é utilizado como base para o sinal de controle  $u(t)$  que deve ser aplicado ao processo a cada instante de tempo, conforme explicitado na figura 3 adiante. O sinal de saída é medido através de um sensor (dispositivo que faz a transdução da grandeza física a ser controlada em um sinal elétrico), e consecutivamente é comparado com um sinal de referência  $r(t)$ . A diferença entre os dois sinais, que é o sinal de erro  $e(t)$ , é o fator utilizado para a definição do sinal de controle que deve ser aplicado para corrigir o desvio entre os sinais  $r(t)$  e  $y(t)$  (Ogata, 2007; Phillips e Harbor, 1997).

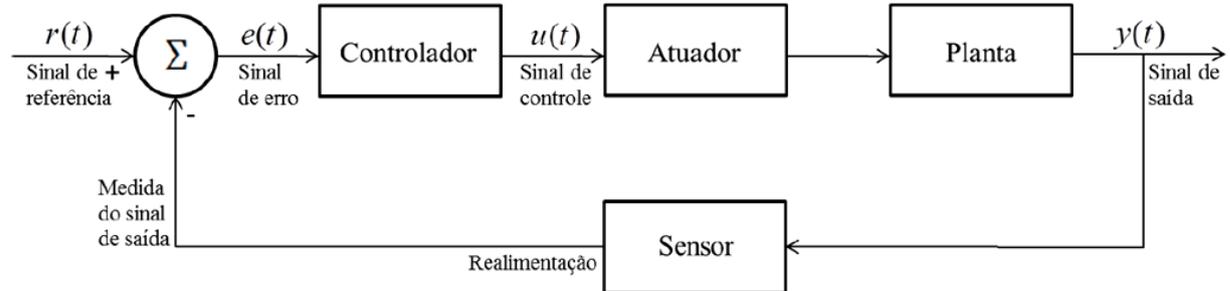


Figura 3: Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada.

Fonte: Adaptado de Ogata (2007).

### 3.2- CONTROLADORES

Os controladores são equipamentos utilizados em processos industriais e têm a função de manter os processos em seus pontos operacionais mais eficientes e econômicos, ou seja, em seus valores ótimos, além de prevenir condições instáveis no processo que podem pôr em risco pessoas e/ou equipamentos.

Para atingir esta finalidade, segundo Andrade e Souza (2010), o controlador automático opera da seguinte forma:

- Mede o valor atual da variável que se quer controlar;
- Compara o valor atual da variável com o valor desejado;
- Determina o erro e gera um sinal de correção;
- Aplica a correção ao sistema a ser controlado de modo a eliminar o desvio, de maneira a reconduzir a variável ao valor desejável. Campos e Teixeira (2006) mencionam que os sistemas de controle devem manter o processo no seu ponto

operacional ótimo, devem ser capazes de eliminar perturbações e fugir das regiões inseguras de operação.

### 3.2.1- CONTROLADOR PROPORCIONAL - INTEGRAL – DERIVATIVO

Com base em Campestrini (2006) o controlador PID é o mais utilizado em sistemas de controle realimentados. Isto se justifica pela sua fácil implementação, além de serem de baixo custo, robustos e versáteis, com a capacidade de fornecer comportamentos transitórios e de regime permanente satisfatórios para uma grande variedade de processos encontrados na indústria, o que conseqüentemente promove a diversidade de aplicações em sistemas de controle, conforme Guimarães (2013).

Uma vantagem apresentada é que quando não se tem possibilidade de uma abordagem analítica (não se conhece o modelo matemático da planta, como é o caso abordado por este estudo), ainda assim é possível a obtenção de sintonia dos parâmetros por meio de abordagens experimentais. São várias as técnicas de sintonia possíveis de serem aplicadas, as quais podem ir desde os métodos tradicionais a técnicas mais recentes, como a utilização de Inteligência Computacional, e mais particularmente, o uso de AG's, como propõem este trabalho.

Sua estrutura apresenta três ações de controle (Proporcional, Integral e Derivativo), ilustradas de acordo com a figura 4 e logo após analisadas de forma detalhada.

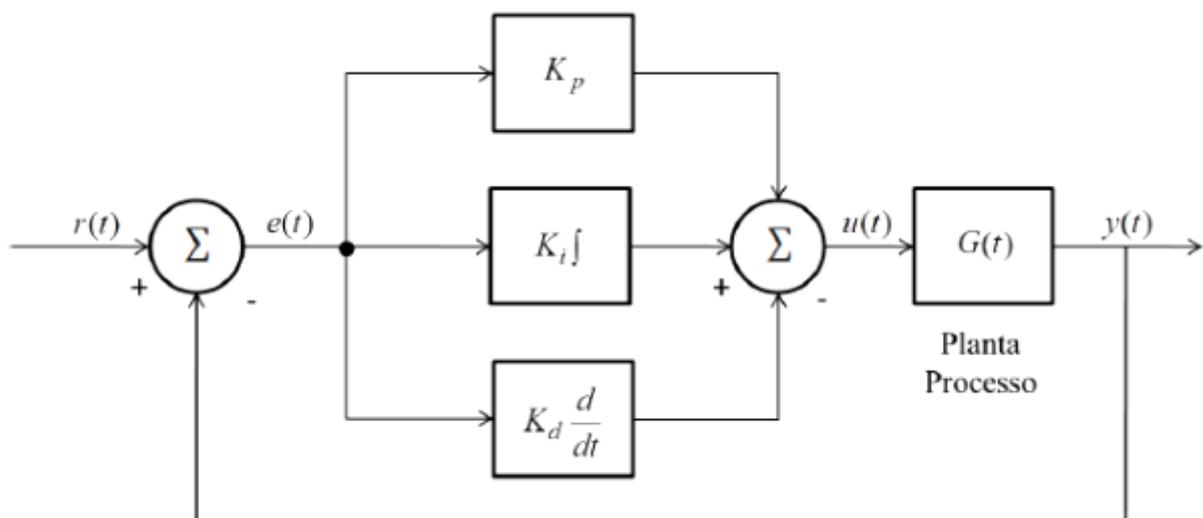


Figura 4: Diagrama de blocos de um controle PID. Fonte: Adaptado de Ogata (2007).

### 3.2.1.1- AÇÃO PROPORCIONAL

“O controlador proporcional (P) gera a sua saída proporcionalmente ao erro ( $e(t)$ ). O fator multiplicativo ( $K_P$ ) é conhecido como ganho do controlador”, como exposto em Campos e Teixeira (2006)

$$u(t) = K_P \cdot e(t) \quad (1)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \quad (2)$$

O comportamento da resposta do sistema submetido a uma ação proporcional apresenta diminuição do tempo de subida; pequena variação do tempo de acomodação; diminuição do erro de regime permanente; aumento do Sobressinal.

A ação de controle proporcional geralmente não é capaz de fazer com que a variável do processo retorne ao SP (valor desejado), o que proporciona um erro em regime permanente. Este diminui com o aumento do ganho proporcional  $K_P$ , mas pode tornar o controlador mais oscilatório.

### 3.2.1.2- AÇÃO INTEGRAL

A ação integral não pode ser empregada separadamente de uma ação proporcional, pois não é considerada uma ação de controle se estiver isolada. A principal característica que a ação integral possui é a eliminação do desvio característico de um controle puramente proporcional, ou seja, elimina o erro em regime permanente. As equações que seguem demonstram a ação (Campos e Saito, 2004; Ogata, 2007; Burns, 2001):

$$u(t) = K_I \cdot \int e(t) dt \quad (3)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_I}{s} \quad (4)$$

Sobre o impacto da ação do controle integral, pode-se inferir que há diminuição do tempo de subida; aumento do tempo de acomodação; eliminação do erro de regime permanente e aumento do Sobressinal. A ação integral tem como único objetivo eliminar o erro em regime permanente, e a adoção de um termo integral excessivamente atuante pode levar o processo à instabilidade, bem como a adoção de um integral pouco atuante pode retardar a estabilização.

O controlador PI gera um sinal de saída proporcional ao erro e à integral do erro. Abaixo segue a equação do controlador PI.

$$u(t) = K_P \cdot e(t) + K_P \cdot \frac{1}{T_I} \cdot \int e(t)dt + u_0 \quad (5)$$

O termo:  $K_P \cdot \frac{1}{T_I}$ , também é encontrado na literatura como ganho integral ( $K_I$ ).

### 3.2.1.3- AÇÃO DERIVATIVA

A ação derivativa, assim como a integral, não pode ser empregada separada de uma ação proporcional. Desta forma, a ação de controle derivativa responde à taxa de variação do sinal de erro, de acordo com as equações abaixo:

$$u(t) = K_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_D \cdot s \quad (7)$$

Os principais efeitos no sistema desta ação são: pequena variação no tempo de subida; diminuição do tempo de estabilização; pequena variação do erro de regime estacionário e diminuição do Sobressinal.

O derivativo só atua quando há variação no erro. Se o processo está em regime permanente, seu efeito é nulo. Durante perturbações ou na partida do processo, quando há variação do erro, o derivativo sempre atua no sentido de atenuá-lo, portanto sua principal função é melhorar o desempenho do processo durante os transitórios. Abaixo segue a equação do controlador PD.

$$u(t) = K_P \cdot e(t) + K_P \cdot T_D \cdot \frac{de}{dt}(t) + u_0 \quad (8)$$

O termo:  $K_P \cdot T_D$ , também é comumente encontrado na literatura como ganho derivativo ( $K_D$ ). A ação de controle derivativa sempre deve ser utilizada com ações P ou PI.

### 3.2.1.4- CONTROLADOR PROPORCIONAL, INTEGRAL E DERIVATIVO (PID)

A reunião destas três ações de controle básicas constituem um dos controladores mais utilizados na indústria que é o controlador PID. No que se refere à sintonia do controlador PID, vale destacar que a mesma consiste no ajuste dos ganhos ( $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$ ) de forma ao atendimento a um conjunto de especificações exigidas para um determinado problema. É a partir daí que se tem a necessidade de buscar técnicas de sintonia, segundo Guimarães (2013), que promovam melhor resposta para o sistema diante da situação-problema, dentre os quais, conforme mencionado podem ir desde métodos tradicionais às técnicas pertencentes à Inteligência Computacional.

O controlador PID é sem dúvida o algoritmo de controle mais comum utilizado nas aplicações de controle de processo. A popularidade do controlador PID pode ser atribuída as suas diferentes características: aplicação em sistemas com realimentação; tem a habilidade de eliminar o erro de regime permanente (*offset*) devido à ação integral; aplicação em plantas de modelos desconhecidos; e pode antecipar o futuro através da ação derivativa (Silva *et al.*, 2005).

Abaixo segue a equação do controlador PID paralelo clássico, onde o ganho proporcional também multiplica o termo integral e derivativo.

$$u(t) = K_P \cdot e(t) + K_P \cdot \frac{1}{T_I} \cdot \int e(t)dt + K_P \cdot T_D \cdot \frac{de}{dt}(t) + u_0 \quad (9)$$

Ressalta-se que os controladores P, PI e PD também podem ser obtidos a partir de um controlador PID. Para isto basta que se alterem os parâmetros  $T_I$  (tempo integral) e/ou  $T_D$  (tempo derivativo).

A tabela 2 mostra os efeitos das ações do controlador PID sobre o processo e a função do ganho.

Tabela 2: Efeitos das ações do controlador PID sobre o processo e a função do ganho.

| <b>Ação</b>  | <b>Função da Ação</b>  | <b>Função do ganho</b>  |
|--------------|--|---|
| Proporcional | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ação de controle imediata e proporcional ao valor do erro corrente.</li> <li>- Aumenta a velocidade de resposta do sistema.</li> <li>- Não corrige erro de regime permanente.</li> <li>- Torna a resposta mais oscilatória à medida que o ganho aumenta.</li> </ul>           | Determinar a amplitude da ação, ou seja, determinar quanto o erro instantâneo deve influenciar na correção da planta. |
| Integral     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ação de controle gradual, proporcional a integral do erro.</li> <li>- Responde ao passado do erro enquanto este for diferente de zero.</li> <li>- Elimina o erro de regime permanente (off-set).</li> <li>- Reduz o tempo de subida.</li> </ul>                               | Determinar a amplitude da ação, ou seja, determinar quanto o acúmulo do erro deve influenciar na correção da planta.  |
| Derivativo   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ação antecipatória, resposta proporcional à derivada do erro.</li> <li>- Provoca amortecimento e permite o aumento do ganho proporcional.</li> <li>- Não corrige o erro de regime permanente.</li> <li>- Melhora o desempenho do processo durante os transitórios.</li> </ul> | Determinar a amplitude da ação, ou seja, determinar quanto à variação do erro deve influenciar na correção da planta. |

Fonte: (Andrade e Souza, 2010).

### 3.3- SÍNTESE DE CONTROLADORES PID

Para se obter a sintonia do controlador PID, pode-se utilizar diversos métodos de síntese. Esses métodos podem ser classificados em empíricos, analíticos ou obtidos através de algum tipo de otimização.

Este problema de desempenho dos controladores PID's vem a ser um problema de otimização, e pode ser solucionado com a utilização de métodos baseados na computação evolutiva (CE), como Algoritmos Genéticos (AG) e diversas aplicações destes métodos estão disponíveis na forma de textos científicos, baseado em Andrade e Souza (2010). Mas é necessário, primeiramente, conhecer os critérios de desempenhos, que seguem na próxima Seção, para avaliação das sintonias realizadas.

#### 3.3.1- CRITÉRIOS DE DESEMPENHO

Geralmente são utilizadas técnicas de avaliação de desempenho para os ajustes dos controladores PID, como as análises sobre os critérios de desempenho (Sobressinal, tempo de subida e estabilização, erro de regime permanente, etc.), que serão vistas neste trabalho. Outras técnicas podem ser utilizadas, como por exemplo, a análise da variabilidade (normalmente definida como o dobro do desvio padrão do erro dividido pela média da variável de processo) (Wilton, 2000). A variabilidade traduz a proximidade da variável de processo (PV) do seu SP, e independe de perturbações aleatórias. É uma medida estatística da dispersão da variável controlada com respeito ao seu valor de referência. Como não se tomou uma leitura da variável pH no reator, dentro de determinado intervalo de tempo, na empresa visitada, fica inviável calcular uma variabilidade para o processo citado da empresa e conferir comentários à sua estabilidade.

O principal critério para ajuste do controle de um processo, e que sempre deve ser perseguido, é a estabilidade do mesmo. Baseado em Campos e Teixeira (2006); Ogata (2007) e em outros autores, como por exemplo Prado (2009); Guimarães (2013); Sá e Amorim (2013), alguns critérios mais utilizados, podem ser definidos como:

- **Tempo morto:** é o tempo de um atraso entre o momento que ocorre uma mudança ou variação da variável de processo e quando essa mudança vem a ser observada;

- **Tempo de primeira ordem:** é o tempo que o processo demora, uma vez iniciada a variação, para chegar aos 63% da variação total final. Esse número, 63%, é proveniente de uma exponencial que aparece na solução analítica da equação diferencial, segundo Silva (2010). Pode-se constatar que  $100 \cdot (1 - e^{-1}) = 63\%$ ;

- **Tempo de subida:** é o tempo que o sistema leva para ir de 10% a 90% do valor do estado estacionário, ou valor final (ou valor de SP);

- **Percentual de Sobressinal (*Overshoot*):** é o valor que a variável de processo ultrapassa o valor final (ou valor de SP) e chega ao seu maior valor, e é expresso como uma porcentagem do valor final. Encontra-se na literatura, como por exemplo, nos artigos de Sharifzadeh e Thornhill (2013), Jeng e Chen (2013) e principalmente em Sharifi *et al.* (2010), que há um *benchmark* para esse percentual de Sobressinal. Ele é considerado bom ou satisfatório quando os sinais são menores ou iguais a 10%, como visto também em Thomasson e Eriksson (2009); Tran *et al.* (2007).

- **Tempo de estabilização:** tempo necessário para que a variável do processo chegue dentro de um patamar de porcentagem (normalmente 5%) do valor final.

- **Erro de regime permanente:** diferença final entre as variáveis do processo e o SP em regime permanente. Note que a definição exata de algumas dessas quantidades varia na indústria.

Outros comportamentos importantes do sistema (além da estabilidade absoluta), segundo Ogata (2007), com os quais é preciso ter consideração especial, são o regime transitório e o erro de regime permanente. Como um sistema físico de controle contém energia armazenada, a saída do sistema (quando este se submete a um sinal de entrada), não segue a entrada de imediato, mas apresenta uma resposta transitória antes que o regime permanente seja alcançado. Por isso deve-se analisar o comportamento na resposta no regime transitório e do erro de regime permanente. Estes critérios podem ser calculados através do acompanhamento da trajetória da variável controlada em relação ao seu valor de referência (*set-point*) desejado ao longo de uma janela de avaliação.

Os mesmos podem ser visualizados na figura 5 a seguir e sua legenda na tabela 3:

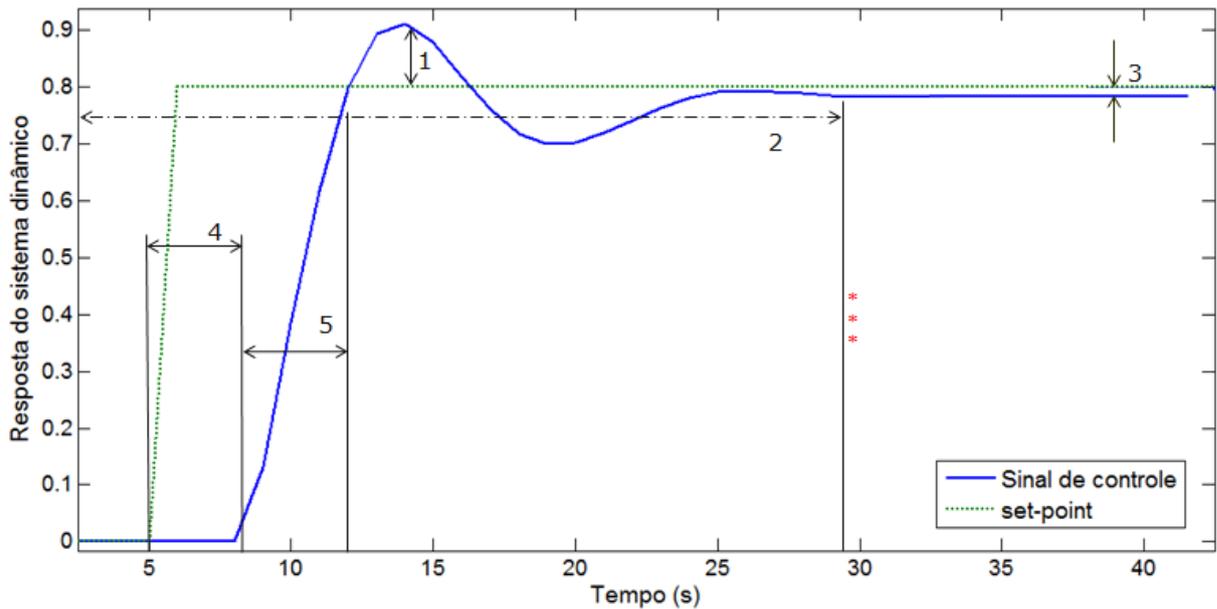


Figura 5: Resposta típica do sinal de controle de um sistema PID de malha fechada.

Tabela 3: Legendas da Figura 5

| número | Significado               |
|--------|---------------------------|
| 1      | Máximo Sobressinal        |
| 2      | Tempo de estabilização    |
| 3      | Erro de regime permanente |
| 4      | Tempo morto               |
| 5      | Tempo de subida           |
| < ***  | Resposta transitória      |
| > ***  | Regime permanente         |

Segundo Campos e Teixeira (2006), alguns índices de desempenho, e suas definições, são listados abaixo:

Tabela 4: Índices de desempenho para avaliação do controle em malha fechada

| Índice de Desempenho | Significado                              | Expressão         |
|----------------------|--|-------------------|
| IAE                  | Integral do módulo do erro               | $\int  e(t)  dt$  |
| ISE                  | Integral dos erros ao quadrado           | $\int e^2(t) dt$  |
| ITAE                 | Integral do módulo do erro vezes o tempo | $\int t e(t)  dt$ |

Fonte: (Campos e Teixeira, 2006)

Nestes índices,  $e(t)$  é a diferença entre o valor medido da variável controlada e o *set-point* em cada instante ( $t$ ) ao longo da janela de avaliação.

Nem todos os critérios de desempenho listados acima podem ser contemplados ao mesmo tempo. Logo, deve-se estabelecer uma métrica de erro para o trabalho em questão, pois o sistema de controle deve possuir mínima sensibilidade às mudanças dos parâmetros do processo, ou seja, deve ser robusto (outra característica desejada para otimização e controle) para as incertezas no modelo utilizado durante a síntese.

O presente texto escolheu utilizar, como métrica de erro para análise de desempenho, a soma da integral do sinal de erro, em módulo, com a integral do sinal de controle ao quadrado, o que será melhor abordado na Seção 4.2.2, que fala da função objetivo. Pode-se notar que essa métrica é uma soma dos índices IAE e ITAE, mas com uma peculiar diferença: os métodos a seguir se preocupam somente com o sinal de erro, se este vai “zerar” no regime permanente, não importando as prováveis oscilações obtidas no regime transitório; a métrica escolhida traça a integral do sinal de controle, ao quadrado, para garantir que o erro não exista tanto no regime transitório quanto no regime permanente.

A seguir, serão apresentados alguns métodos de sintonia de controladores PID, que ao longo do trabalho vêm sendo chamados de “clássicos”. Todos necessitam de certo conhecimento da dinâmica do processo e da definição de um desempenho esperado para o sistema em malha fechada.

### 3.3.2- MÉTODOS DE SINTONIA

Existem numerosos métodos para sintonizar os parâmetros de controladores PID's, dado que a maioria deles é ajustado em campo. Alguns destes métodos são baseados em representar a resposta dinâmica da planta para um sistema de primeira ordem com tempo morto, cuja equação (10) segue exposta a seguir. Geralmente na literatura este modelo é obtido com a aplicação de um degrau na entrada da planta e medindo na saída os três parâmetros: ganho do processo ( $K$ ), constante de tempo ( $\tau$ ) e tempo morto ( $\theta$ ) (Skogestad, 2003; Silva *et al.*, 2005). A variável “s” será melhor explicada na Seção 4.2.1, “Uso da Transformada de Laplace”:

$$G(s) = \frac{K}{\tau \cdot s + 1} \cdot e^{-\theta \cdot s} \quad (10)$$

A seguir, serão detalhados alguns métodos de sintonia aplicados a controladores PID.

### 3.3.2.1- MÉTODO DE ZIEGLER E NICHOLS

Ziegler e Nichols propuseram regras para a sintonia de controladores PID baseadas na resposta experimental a uma excitação em degrau, ou no valor de  $K_p$  que resulta em estabilidade marginal para o controle proporcional apenas. A idéia básica é obter valores para os ganhos a partir de experimentos sobre o processo. As regras são muito utilizadas, sempre que o processo a ser controlado permitir, por fornecerem um ponto de partida para um ajuste mais fino, como dito por Amaral *et al.* (2010).

Ogata (2007) destaca este método como sendo uma técnica que objetiva a determinação dos valores do ganho proporcional  $K_p$ , de tempo integral  $T_i$  e de tempo derivativo  $T_d$ , fundamentadas nas características da resposta temporal de uma dada planta, *A partir da qual se extrai apenas uma estimativa inicial para os parâmetros do controlador, sendo necessário em muitos casos, um ajuste fino dos parâmetros encontrados por parte do projetista* (Guimarães, 2013).

Segundo Faccin (2004) o trabalho elaborado por Ziegler e Nichols foi o primeiro a propor uma metodologia objetiva e simples para a sintonia de controladores PID. Ziegler e Nichols propuseram dois métodos para se obter um modelo da dinâmica de um processo SISO (*Single Input Single Output* – uma entrada e uma saída).

No primeiro método de Ziegler e Nichols, há o cálculo das ações de controle sem a necessidade dos parâmetros do processo; este método é realizado em **malha fechada**.

Para isso fixam-se os valores dos seguintes parâmetros:  $T_I = \infty$  e  $T_D = 0$ , e aumenta-se o ganho proporcional ( $K_p$ ) gradativamente até obter uma resposta oscilatória com amplitude constante. Neste ponto determina-se o ganho crítico ( $K_{CR}$ ) e o período de oscilação ( $T$ ). O ganho crítico ( $G_{CR}$ ) é o ganho do controlador P que gerou uma resposta oscilatória na variável controlada no limite da estabilidade, com um período ( $T$ ). Se o ganho do controlador for maior que ( $G_{CR}$ ), então o sistema será instável.

Com os valores de  $G_{CR}$  e  $T$  obtidos acima, consulta-se a tabela 5 adiante, como em Maitelli *et al.* (2005), para se obter a sintonia do controlador PID, usando como critério de desempenho uma razão de declínio igual a 1/4.

Tabela 5: Método de Ziegler e Nichols em malha fechada

| AÇÕES | MODOS DE REGULAÇÃO |                      |                            |                      |                               |                      |
|-------|--------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------|
|       | P                  | PI Série             | PI Paralelo                | PID Série            | PID Paralelo                  | PID Misto            |
| $K_P$ | $\frac{G_{CR}}{2}$ | $\frac{G_{CR}}{2,2}$ | $\frac{G_{CR}}{2,2}$       | $\frac{G_{CR}}{3,3}$ | $\frac{G_{CR}}{1,7}$          | $\frac{G_{CR}}{1,7}$ |
| $T_I$ | Máximo             | $\frac{T}{1,2}$      | $\frac{2 \cdot T}{G_{CR}}$ | $\frac{T}{4}$        | $\frac{0,85 \cdot T}{G_{CR}}$ | $\frac{T}{2}$        |
| $T_D$ | 0                  | 0                    | 0                          | $\frac{T}{4}$        | $\frac{T \cdot G_{CR}}{13,3}$ | $\frac{T}{8}$        |

Fonte: (Campos e Teixeira, 2006)

Na prática, este teste pode levar o processo a variar fora de uma região segura, não tendo garantia de que a variável controlada estará entre os limites estabelecidos.

O segundo método de sintonia proposto por Ziegler e Nichols é chamado de método da curva de reação e é realizado em **malha aberta**. O procedimento para se encontrar a curva de reação consiste em colocar o controlador em manual e aplicar uma variação em degrau na saída do controlador. Com a resposta do processo a esta perturbação, calcula-se a taxa de variação e o tempo morto.

Depois de aplicado o degrau, a resposta do sistema será um gráfico semelhante ao da figura 6 exposta a seguir, onde se devem extrair os seguintes parâmetros: tempo morto ( $\theta$ ), constante de tempo ( $T$ ) e ganho do processo ( $K$ ). Com isso, consulta-se a tabela 6 a seguir para obtenção dos valores dos parâmetros:

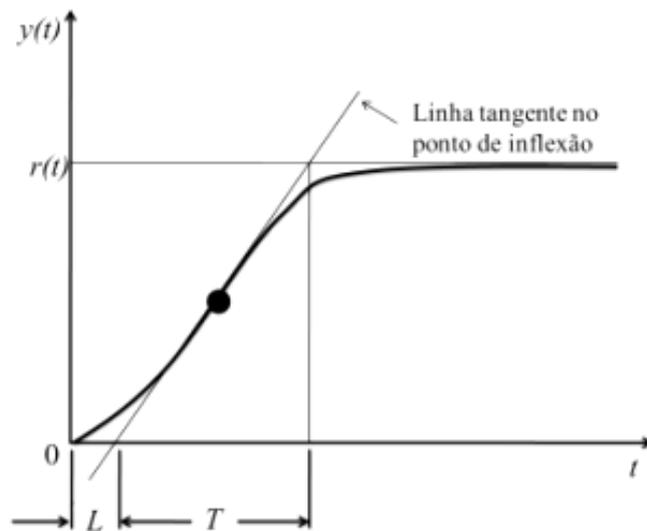


Figura 6: Resposta do processo de primeira ordem em malha aberta ( $r(t)$ = sinal de referência, *set-point*,  $y(t)$ = sinal de saída do processo). Fonte: (Ogata, 2007)

Tabela 6: Fórmulas para o cálculo dos parâmetros PID para o método de Ziegler e Nichols em malha aberta

| Controlador | $K_P$                        | $T_I$                | $T_D$               |
|-------------|------------------------------|----------------------|---------------------|
| P           | $\tau/(K \times \theta)$     | -----                | -----               |
| PI          | $0.9 \tau/(K \times \theta)$ | $3.33 \times \theta$ | -----               |
| PID         | $1.2 \tau/(K \times \theta)$ | $2 \times \theta$    | $0.5 \times \theta$ |

Fonte: (Campos e Teixeira, 2006)

Alguns cuidados são requeridos quanto ao uso desta tabela 6. Ela foi elaborada para os controladores PID existentes na época. Esta sintonia pelo método de Ziegler e Nichols auxilia como referência inicial, mas pode instabilizar algumas malhas por diversas razões, como: erros de modelagem; interação entre malhas de controle devido ao fato de os processos industriais serem geralmente de múltiplas entradas e saídas (MIMO) e não de uma entrada e uma saída (SISO); devido ao de o PID utilizado atualmente ser, geralmente, digital e não analógico. Sugere-se na prática que se diminuam os ganhos propostos pelo método, inicialmente, e aumentá-los de acordo com a observação do comportamento do processo, pois essas fórmulas *não garantem nem um desempenho específico, nem a estabilidade em malha fechada* (Campos e Teixeira, 2006).

### 3.3.2.2- MÉTODO DE COHEN E COON

O método de Cohen e Coon, assim como o proposto por Ziegler e Nichols, também se baseia no critério de razão de decaimento de  $\frac{1}{4}$ , e utiliza para sintonia de controladores PID valores de tempo morto mais elevados.

Segundo Campos e Teixeira (2006) é muito comum no método de Cohen e Coon acontecerem sintonias agressivas, então na prática é sugerido diminuir inicialmente os ganhos propostos pela tabela 7 de sintonia e aumentar posteriormente estes ganhos em função da observação do comportamento do processo. Este método também utiliza um modelo de primeira ordem com tempo morto para a dinâmica do processo.

Tabela 7: Fórmulas para os cálculos dos parâmetros PID para o método de Cohen-Coon.

|     | $K_P$   | $T_I$  | $T_D$  |
|-----|---|--|--|
| P   | $\left(1.03 + 0.35 \cdot \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right) \cdot \frac{\tau}{K \cdot \theta}$ | -----  | -----  |
| PI  | $\left(0.9 + 0.083 \cdot \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right) \cdot \frac{\tau}{K \cdot \theta}$ | $\frac{\left(0.9 + 0.083 \cdot \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right)}{\left(1.27 + 0.6 \cdot \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right)} \cdot \theta$  | -----  |
| PID | $\left(1.35 + 0.25 \cdot \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right) \cdot \frac{\tau}{K \cdot \theta}$ | $\frac{\left(1.35 + 0.25 \cdot \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right)}{\left(0.54 + 0.33 \cdot \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right)} \cdot \theta$ | $\frac{0.5 \cdot \theta}{\left(1.35 + 0.25 \cdot \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right)}$ |

Fonte: (Campos e Teixeira, 2006)

A robustez desse método é ruim para valores de  $(\theta/\tau)$  menores que 2. O objetivo dele era obter regras de sintonia para processos com tempo morto maiores do que o estudado por Ziegler e Nichols. Ele também produz sintonias agressivas, portanto sugere-se, como no método anterior, a diminuição dos ganhos das variáveis de decisão, e aumento delas posteriormente.

### 3.3.2.3- MÉTODO DA INTEGRAL DO ERRO

Este método foi inicialmente proposto no trabalho de Lopez *et al.* (1967) *apud* Campos e Teixeira (2006) para perturbação de carga (problema regulatório) e posteriormente no trabalho de Rovira *et al.* (1969) *apud* Campos e Teixeira (2006)

para degraus no SP. Este método sugere utilizar como critério de desempenho a integral de uma função do erro dentro de uma janela de tempo, suficiente para eliminar o erro em regime permanente. A vantagem deste critério é de considerar toda a curva de resposta do sistema, ao invés de apenas dois pontos como na razão de declínio de  $\frac{1}{4}$  (Campos e Teixeira, 2006).

No método da integral do erro os dois critérios mais utilizados são:

- IAE (integral do valor absoluto do erro:  $\int |e(t)|. dt$ );
- ITAE (integral do produto do tempo pelo valor absoluto do erro:  $\int t. |e(t)|. dt$ ).

O ITAE é mais vantajoso, pois apresenta menor sensibilidade aos erros que acontecem logo após a perturbação.

A seguir, podem-se visualizar as equações de sintonia e a tabela 8 com as constantes e critério desejado obtidas por Lopez *et al.* (1967) *apud* Campos e Teixeira (2006).

$$K_P = \frac{1}{K} \cdot \left( A \cdot \left( \frac{\theta}{\tau} \right)^B \right) \quad (11)$$

$$T_I = \frac{\tau}{\left( C \cdot \left( \frac{\theta}{\tau} \right)^D \right)} \quad (12)$$

$$T_D = \tau \cdot \left( E \cdot \left( \frac{\theta}{\tau} \right)^F \right) \quad (13)$$

Tabela 8: Constantes para cálculo da sintonia do PID segundo método da Integral do Erro de Lopez *et al.* (1967).

| Controlador | Critério | A     | B      | C     | D      | E     | F     |
|-------------|----------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|
| PI          | IAE      | 0.984 | -0.986 | 0.608 | -0.707 | ----  | ----  |
| PI          | ITAE     | 0.859 | -0.977 | 0.674 | -0.68  | ----  | ----  |
| PID         | IAE      | 1.435 | -0.921 | 0.878 | -0.749 | 0.482 | 1.137 |
| PID         | ITAE     | 1.357 | -0.947 | 0.842 | -0.738 | 0.381 | 0.995 |

Fonte: (Campos e Teixeira, 2006)

A seguir têm-se as equações de sintonia e a tabela 9 com as constantes e critério desejado obtidas por Rovira *et al.* (1969) *apud* Campos e Teixeira (2006).

$$K_P = \frac{1}{K} \cdot \left( A \cdot \left( \frac{\theta}{\tau} \right)^B \right) \quad (14)$$

$$T_I = \frac{\tau}{\left( C + D \cdot \left( \frac{\theta}{\tau} \right) \right)} \quad (15)$$

$$T_D = \tau \cdot \left( E \cdot \left( \frac{\theta}{\tau} \right)^F \right) \quad (16)$$

Tabela 9: Constantes para cálculo da sintonia do PID segundo método da Integral do Erro de Rovira *et al.* (1969).

| Controlador | Critério | A     | B      | C     | D      | E     | F     |
|-------------|----------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|
| PI          | IAE      | 0.758 | -0.861 | 1.02  | -0.323 | ----  | ----  |
| PI          | ITAE     | 0.586 | -0.916 | 1.03  | -0.165 | ----  | ----  |
| PID         | IAE      | 1.086 | -0.896 | 0.740 | -0.130 | 0.348 | 0.914 |
| PID         | ITAE     | 0.965 | -0.850 | 0.796 | -0.147 | 0.308 | 0.929 |

Fonte: (Campos e Teixeira, 2006)

(Lopez *et al.*, 1967 *apud* Campos e Teixeira, 2006) consideram uma perturbação na carga, por isso tem como objetivo de controle a rejeição às perturbações (problema regulatório). Já (Rovira *et al.*, 1969 *apud* Campos e Teixeira, 2006) consideram uma perturbação no *set-point* (problema servo).

Na maioria dos casos de sintonia, deve-se buscar uma robustez (rejeição a distúrbios) na prática, portanto para aquelas obtidas por aplicação de uma entrada em degrau no *set-point*.

No trabalho de Tavakoli e Tavakoli (2003), executa-se uma análise dimensional para reduzir as variáveis do sistema, e buscar a síntese ótima do PID, semelhante ao proposto por este trabalho. Eles utilizaram o PID paralelo clássico, e uma função de primeira ordem com tempo morto para o modelo da planta do processo, e um AG para a busca dos valores ótimos dos parâmetros de decisão. Como função objetivo para o AG usou-se as integrais ISE, IAE e ITAE, após um degrau no *set-point*.

Mas, como dito anteriormente, esses métodos só contemplam o sinal de erro. Este trabalho utiliza a integral do erro (IAE) mais a integral do sinal de controle ao quadrado como métrica de erro para verificar o desempenho do modelo proposto.

Com a discussão feita sobre as principais características dos sistemas de controle, a próxima Seção (3.4) irá abordar os conceitos de Inteligência Computacional com destaque para os Algoritmos Genéticos.

### **3.4- INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL**

Com base em Goldschmidt (2010) e Guimarães (2013), a Inteligência Computacional (IC) teve origem no ano de 1943, momento do reconhecimento do primeiro trabalho proposto por Warren McCulloch e Walter Pitts pertencente à área da Inteligência Artificial (IA), o qual propôs um simples modelo de neurônios artificiais de dois estados (ligado ou desligado), além de sugerir que redes de neurônios artificiais seriam capazes de aprender. Este modelo ficou mundialmente conhecido como modelo de McCulloch e Pitts.

Desde o final da década de 80, pesquisadores começaram a utilizar a expressão Inteligência Computacional como uma extensão à Inteligência Artificial (Goldschmidt, 2010). Analogamente, o mesmo autor analisa as definições de IC e conclui ser uma ciência multidisciplinar que pesquisa o desenvolvimento e aplicação de técnicas computacionais que simulem o comportamento humano diante de várias situações. A partir da análise dessas definições, segundo Guimarães (2013) observa-se a semelhança entre os dois ideais e conclui-se que as diferenças são meramente práticas, tendo em vista que a pesquisa na IA envolve técnicas que trabalham em nível simbólico (comumente modelagem baseada em agentes utilizando lógica), enquanto que a IC trabalha com técnicas e algoritmos subsimbólicos (redes neurais, algoritmos evolucionários, entre outros). *Vale salientar que, embora a comunidade tenha se dividido logicamente nestas duas linhas, as mesmas se complementam tecnicamente no que diz respeito a abordagens híbridas, tendência cada vez mais freqüente em pesquisas do ramo acadêmico* (Guimarães, 2013).

### 3.4.1- CLASSIFICAÇÃO DA IC

De acordo com Goldschmidt (2010), a IC apresenta ramificações que envolvem estudos de técnicas e aplicações baseados na natureza. Na figura 7, visualiza-se uma representação da taxonomia, e o destaque para AG, que é objeto de uso deste estudo.

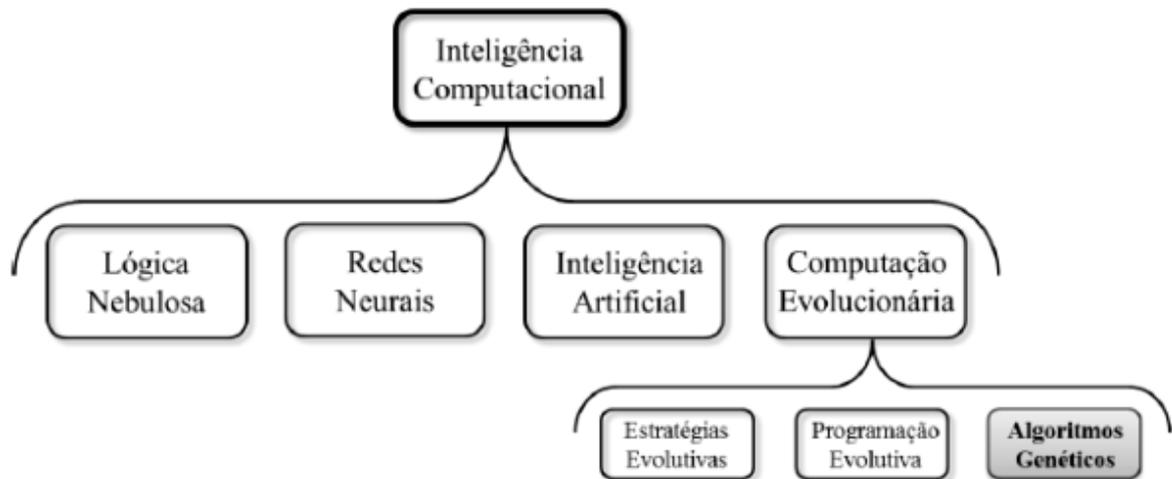


Figura 7: Inteligência computacional-Taxonomia. Fonte: (Goldschmidt, 2010).

### 3.4.2- ALGORITMOS GENÉTICOS

Os Algoritmos Genéticos (AG's) são fundamentados através do processo de seleção proposto por Charles Darwin em 1859. Os Algoritmos Genéticos foram desenvolvidos por John Holland (Holland, 1975 *apud* Koza, 1998) e posteriormente aperfeiçoados por seus alunos e colegas da Universidade de Michigan em 1960 e 1970 (Mitchell, 1999); desenvolvidos também por A.S. Fraser, H.J. Bremermann, J. Reed e J.H. Holland, entre a década de 50 e 70, com refinamentos posteriores por D. Whitley, D.E. Goldberg, K. De Jong e J. Grefenstette (Coelho e Coelho, 1999).

O Objetivo principal de Holland não era projetar algoritmos para resolver problemas específicos, mas sim estudar formalmente como o fenômeno da adaptação ocorre na natureza e desenvolver maneiras em que os mecanismos de adaptação natural possam ser importados para sistemas de computador (Izquierdo, 2013).

De forma geral, pode-se dizer que, por meio de um mecanismo iterativo de busca (técnicas computacionais inteligentes), os AG's objetivam encontrar as

melhores soluções para problemas de otimização. Partindo de uma população inicial, o AG promove em um primeiro momento a combinação dos melhores indivíduos; desta combinação, gera uma nova população que substituirá a população anterior, e assim sucessivamente. Deste processo, resulta que uma nova população é gerada a cada iteração realizada. Desta forma, o AG apresenta as novas e melhores soluções para o problema de otimização que está sendo analisado. O processo estará concluído quando o algoritmo converge (Izquierdo, 2013).

As variáveis de um modelo de otimização podem se relacionar, por exemplo, com as variáveis do processo a ser controlado, como o exemplo da figura 8:

### O modelo de otimização linear

$$\begin{aligned}
 & \text{maximizar} \quad \ell_1 x_1 + \ell_2 x_2 + \cdots + \ell_n x_n \\
 & \text{sujeito a} \quad a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \cdots + a_{1n} x_n \leq b_1 \\
 & \quad \quad \quad a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + \cdots + a_{2n} x_n \leq b_2 \\
 & \quad \quad \quad \vdots \\
 & \quad \quad \quad a_{m1} x_1 + a_{m2} x_2 + \cdots + a_{mn} x_n \leq b_m \\
 & \quad \quad \quad x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n
 \end{aligned}$$

Figura 8: Modelo genérico de otimização linear (Maximização). Fonte: (Paula Júnior, 2012).

Na figura 8, pode se relacionar os componentes do modelo genérico de otimização linear com o controle de processos, conforme se segue:

- Função Objetivo = modelo da planta de processo;
- ' $\ell_n$ ' = variáveis do processo (*set-point*, variável manipulada);
- Restrições ' $a_{mn}$ ' = retiradas do processo, controle de produção, custos, vendas, parâmetros de sintonia de controladores, etc.

Os problemas de otimização são problemas de maximização ou minimização de função de uma ou mais variáveis num determinado domínio, sendo que, geralmente, existe um conjunto de restrições nas variáveis, segundo Holtz (2005). Os AG's são robustos e eficientes em espaços de procura irregulares, multidimensionais e complexos, e caracterizam-se por (Goldberg, 1994):

- operarem em uma população de pontos;
- não requererem derivadas;

- trabalhem com a codificação de seu conjunto de parâmetros, não com os próprios parâmetros (representação binária);
- realizarem transições probabilísticas, não regras determinísticas;
- necessitem apenas de informação sobre o valor de uma função objetivo para cada integrante da população de indivíduos.

Segundo Izquierdo (2013), embora os Algoritmos Genéticos sejam simples de descrever e programar, o seu comportamento pode ser complicado, pois existem muitas questões indefinidas sobre o seu funcionamento e sobre a que tipos de problemas são mais aplicáveis. Diversos trabalhos abordam os fundamentos teóricos dos AG's, entre eles, Holland, 1975; Goldberg, 1989; Rawlins, 1991; Whitley, 1993; Whitley e Vose, 1995, citados por Mitchell (1999), e Cortes (2003).

### **3.4.2.1- CARACTERÍSTICAS DOS AG'S**

Rao (2009) afirma que os AG's baseiam-se em princípios da genética e seleção natural. Os elementos básicos, como reprodução, cruzamento e mutação, são utilizados no procedimento de pesquisa genética.

De acordo com Goldberg e Holland (1988), os AG's estão relacionados aos fenômenos da biologia e à teoria da evolução. Estas definições propostas pelo autor, são encontradas em Izquierdo (2013) de forma resumida, e as principais expostas a seguir:

**Cromossomos:** está relacionado com a estrutura de dados que codifica uma solução para um determinado problema, ou seja, um cromossomo representa um ponto no espaço de busca.

**Indivíduo:** trata-se de um simples membro da população, onde o indivíduo é formado pelo cromossomo e sua aptidão. Logo, um indivíduo é um conjunto de valores  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$  para as variáveis de projeto que definem um ponto no qual se pode avaliar a função objetivo.

**Geração:** consiste no número de iterações que o Algoritmo Genético executa. As gerações representam a evolução das populações ao longo do tempo, em função da aplicação dos operadores genéticos de Reprodução, Recombinação e Mutação.

**Pais e filhos:** em cada geração, o Algoritmo Genético cria populações. Uma população é chamada de pais quando é utilizada para gerar os indivíduos da próxima geração, que são chamados de filhos.

População: é o conjunto de cromossomos ou soluções. A população consiste na quantidade de indivíduos constituintes de um passo de procura dos AG's.

Recombinação (*Crossover*): forma pela qual, através da reprodução, o material genético do indivíduo é misturado, a fim de produzir filhos com características mistas de ambos os pais.

Mutação: é responsável pela introdução e manutenção da diversidade genética nas populações. O operador altera a forma aleatória do funcionamento do gene de alguns indivíduos, fornecendo meios para introdução de novos indivíduos na população.

Seleção: caracteriza-se pelos indivíduos de uma população que são selecionados conforme seu grau de adaptação ao meio.

Espaço de Busca ou Região Viável: é o espaço ou região que compreende as soluções possíveis ou viáveis do problema a ser otimizado. Deve ser caracterizado pelas funções de restrições, que definem as soluções de forma viável ao problema a ser resolvido.

Função Objetivo ou de Avaliação: é a função que se deseja otimizar. Através dela é possível obter a informação numérica do desempenho de cada cromossomo na população. Também é possível representar as características do problema que o AG necessita para cumprir seus objetivos, sendo expresso na forma  $F = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , onde  $x_1, x_2, \dots, x_n$  são variáveis cujo valores o algoritmo procura determinar para otimizar F. A função objetivo é a princípio, calculada para cada conjunto de cromossomos de um indivíduo da população e para toda a população.

Ponto Ótimo: é o ponto caracterizado pelo vetor  $x' = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ , formado pelas variáveis de projeto que minimizam a função objetivo e satisfazem as restrições do problema.

Valor Ótimo: é o valor da função objetivo  $f(x')$  no ponto ótimo. (Izquierdo, 2013).

De acordo com Borges (2011), antes de utilizar os AG's, deve-se analisar a possibilidade de representar as seguintes características, para a resolução de alguns problemas: o espaço de busca de possíveis soluções para o problema deve ser delimitado a um determinado intervalo de valores; uma função objetivo, que indique o quanto uma determinada resposta é boa ou ruim; as soluções, possibilitando a codificação na forma computacional.

### 3.4.2.2- SELEÇÃO PELO MÉTODO DA ROLETA

Há na literatura várias técnicas de seleção, e a utilizada no algoritmo clássico, sugerido por Holland, é conhecida como método da roleta (Michalewicz, 1996).

Nesta técnica é atribuída a cada indivíduo uma probabilidade de passar para a próxima geração. Essa probabilidade é proporcional à sua adaptação ao ambiente, em relação à somatória da adaptação de todos os indivíduos, sendo maior a probabilidade dos indivíduos mais adaptados serem sorteados (Zuben, 2000).

Ela emprega o princípio da probabilidade de sobrevivência do melhor adaptado, ou seja, a probabilidade  $p_i$  de  $i$ -ésimo indivíduo da população que vier a ser selecionado para a reprodução é o cálculo proporcional à sua probabilidade de seleção.  $f_i = f(x_i)$ , conforme equação (Izquierdo, 2013):

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^N f_i} \quad (17)$$

Onde  $f_i$  é a função objetivo do elemento  $i$  da população e  $N$  é o tamanho da população.

A figura 9 representa visualmente, o método da roleta, sendo aplicado para uma pequena população de cinco indivíduos.

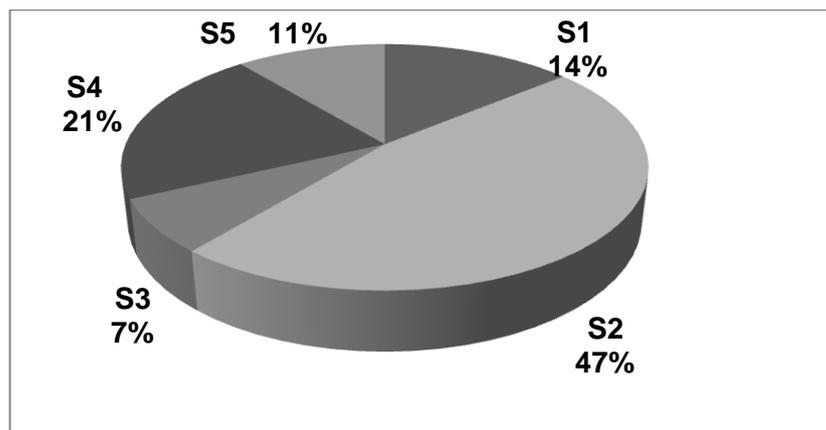


Figura 9: Método da roleta aplicado à população de 5 indivíduos.

Segundo Andrade e Souza (2010), durante o processo de seleção pode-se perder um indivíduo com um alto grau de adaptação. Para evitar este problema usa-se um conceito conhecido como elitismo, onde o melhor indivíduo é mantido na

próxima população. Desta forma, garante-se que o seu material genético fará parte do processo na próxima geração (Zuben, 2000).

### 3.4.2.3- CRUZAMENTO

Os operadores de cruzamento (*Crossover*) relacionam-se com os mecanismos de reprodução natural, onde trocam-se partes do material genético de dois indivíduos, denominados pais, e combina-se as informações de maneira que exista uma razoável probabilidade dos novos indivíduos produzidos serem melhores que seus antecedentes (Souza, 2008). Este método consiste em misturar os materiais genéticos para gerar os filhos. Assim, pode-se realizar a recombinação de todos os indivíduos aos pares para criar os filhos através da recombinação em um ponto ou mais de um ponto (Silva, 2006).

Segundo Borges (2011) e Izquierdo (2013), um exemplo de cruzamento de um ponto consiste em selecionar um ponto de corte aleatoriamente entre os genes do indivíduo. Logo, a partir deste ponto, as informações genéticas dos pais são trocadas de forma que as informações anteriores ao ponto escolhido em um dos pais são ligadas às informações posteriores a este ponto no outro pai, como visto na figura 10:

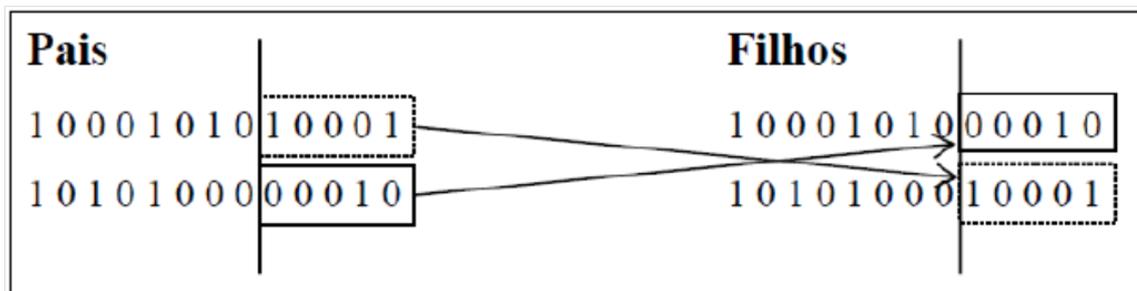


Figura 10: *Crossover* de um ponto na representação binária. Fonte (Silva, 2006).

Segundo Coelho e Coelho (1999), a literatura menciona que as configurações adotadas em AG's utilizam usualmente o tamanho da população entre 30 e 200, probabilidade de recombinação entre 0.5 e 1.0 e probabilidade de mutação entre 0.001 e 0.05 (Chambers, 2001; Srinivas e Patnaik, 1994).

Após o processo de mutação, realiza-se uma nova avaliação para checar se os indivíduos presentes na nova população possuem potencial para a solução ótima do problema. Um fluxograma simplificado de um AG é visto a seguir, na figura 11:

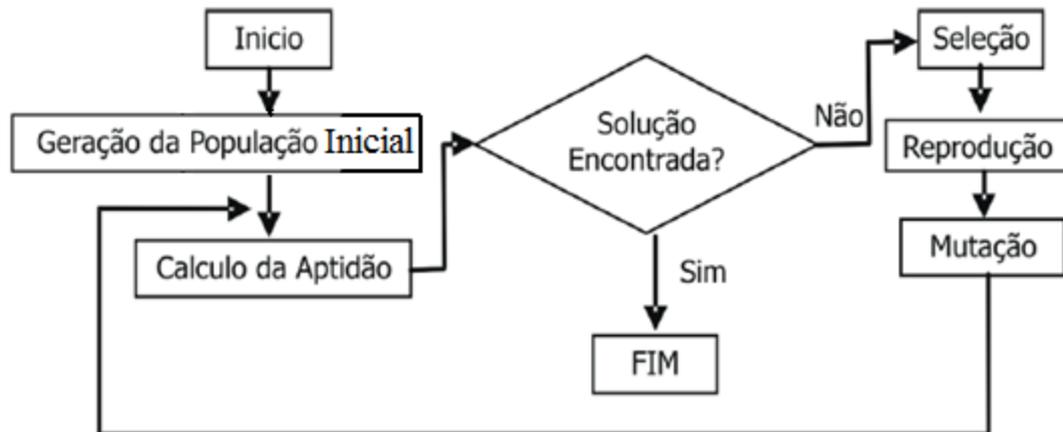


Figura 11: Fluxograma de um AG. Fonte: Adaptado de Andrade e Souza (2010)

### 3.5- ESTADO DA ARTE

Nesta seção discutem-se os principais trabalhos diretamente relacionados com a aplicação de técnicas inteligentes, ou seja, uso de AG's no projeto do controlador clássico PID para diferentes aplicações industriais, além da utilização dos métodos de sintonia de controladores tradicionais baseados em técnicas heurísticas (AG's) para efeitos de comparação dos resultados.

No trabalho de Guimarães (2013) é proposto um novo método de sintonia de controladores PID com rejeição a distúrbios usando AG. Os parâmetros do controlador projetados para controlar a posição do rotor do motor CC, são otimizados utilizando AG em conjunto com a técnica de Ziegler-Nichols. Resultados preliminares mostram que o AG proposto, apresentou desempenho satisfatório da resposta, tanto em regime transitório quanto no estado estacionário, além de apresentar bom desempenho na rejeição a distúrbios. Da mesma maneira, o trabalho publicado por Adhikari *et al.* (2012) utiliza a técnica inteligente de Algoritmos Genéticos para buscar os parâmetros ótimos do controlador PID, aplicado para o controle de posição do eixo de um motor de corrente contínua. O trabalho de Mejía *et al.* (2011) também busca a sintonia ótima de controladores PID através de otimização com AG. Swiech (2005a) apresenta AG's para sintonia simultânea de múltiplos controladores em processos de refino, e Swiech *et al.* (2005b) apresentam uma proposta de sintonia conjunta de diversos controladores desacoplados aplicados em sistemas multivariáveis através do uso de algoritmos genéticos.

Em Silva (2013), buscou-se analisar a Coordenação Hidrotérmica, através das técnicas de AG's somada a Cooperação Coevolutiva. O problema de

Coordenação Hidrotérmica foi formulado através de uma minimização de custos. Para análise desse problema utilizou-se um ‘Sistemas Teste’ de alta complexidade composto de 14 usinas. Oliveira *et al.* (2010) apresenta plantas de produção em plataformas de petróleo que utilizam tanques cilíndricos horizontais (chamados separadores, para retirar o gás do óleo) com o controle do nível desses separadores feito por PID e sintonizado por Controle *Fuzzy* por Bandas, sintonizado via AG’s, com o objetivo de estabilizar a planta e aumentar a confiabilidade operacional.

No trabalho de Izquierdo (2013) é abordado o projeto de layout do tipo celular, uma modalidade de arranjo utilizado na engenharia industrial que permite atender diversidade de produção compatível com certa flexibilidade operacional. Dentre as diversas técnicas e abordagens aplicadas para a formação de células de manufatura, adota-se especificamente uma aplicação de Algoritmo Genético, implementada através de uma interface em *Matlab*, onde são abordados tópicos como: a geração da população inicial, a codificação do cromossomo, a função objetivo, as restrições do problema, os operadores de cruzamento e mutação e a confiabilidade do algoritmo proposto. Tópicos esses também abordados por Andrade e Souza (2010), que buscam uma alternativa não convencional de sintonia de controladores PID com uso de AG’s e comparam-na com os métodos convencionais, assim como em Gomez *et al.* (2008) e Pires (2007). Dantas (2013) também faz o mesmo uso de AG’s com a ferramenta *gatool* do MatLab, como os autores anteriormente citados, e no desenvolvimento de uma nova ferramenta (*Toolbox*) computacional. Dos resultados obtidos por Izquierdo (2013), constata-se que os Algoritmos Genéticos são ferramentas confiáveis para a otimização de sistemas de fabricação, obtendo-se respostas que cumprem os requisitos básicos de projeto de uma célula.

Com vistas ao estudo apresentado por Martínez e Behar (2012), encontra-se uma estratégia híbrida baseada em AG Adaptativo e método Simplex para estimativa de parâmetros de modelos dinâmicos em malha aberta. A proposta é confrontada com as técnicas convencionais de melhor desempenho na tarefa, assim como mostrado neste trabalho. Já Silva (2008) produz uma pesquisa que consiste em aplicar métodos de otimização global para o cálculo do equilíbrio químico e de fases combinados para misturas com gás de síntese, o qual possui grande interesse industrial pelas inúmeras possibilidades de produção de diversos compostos químicos.

Teles e Gomes (2010) têm como objetivo a comparação do Algoritmo Genético, utilizado como método de otimização paramétrica de estruturas de engenharia, com a solução da literatura e com o método de Programação Quadrática Seqüencial (*Sequential Quadratic Programming* - SQP) para determinados casos utilizados como *benchmarks* para otimização de problemas de engenharia. Já o trabalho de Tizzo e Lopes (2009) apresenta uma técnica de sintonia de controladores preditivos utilizando um método de otimização multiobjetivo baseado em AG, assim como Arruda *et al.* (2008), que trabalha com os mesmos métodos e AG's, e Maitelli e Cavalcanti (2006). A aplicação da metodologia de Tizzo e Lopes (2009) é realizada com sucesso em simulações do controle MPC de temperatura e nível de um reator CSTR.

O uso de AG's é largamente encontrado na literatura, não só para sintonia de controladores para processos industriais, mas em outras aplicações da indústria. Dois exemplos para consolidar o exposto são o trabalho de Rodríguez e Martínez (2014), os quais afirmam que os AG's tornaram-se uma alternativa inovadora para resolver eficazmente os problemas de diferentes tipos de antenas e utilizam o software MatLab como ferramenta de simulação e validação para os dados encontrados; e o trabalho de Nishida *et al.* (2013), que trata de identificação dos níveis de potência sonora irradiados pelos equipamentos em ambientes de trabalho através do desenvolvimento de um programa com o uso de AG's.

## CAPÍTULO IV

### METODOLOGIA

#### 4.1- MODELAGEM E CONTROLE DE PROCESSOS

Neste processo de busca pelo “ótimo”, segundo Carvalho (2008), a pesquisa operacional passa a ser um método com duas etapas bem distintas, a modelagem do sistema como um problema e otimização ou modelo de programação matemática, e a resolução deste modelo através de algum algoritmo. A modelagem dos sistemas ou processos que serão otimizados é um misto de arte e ciência; sua fundamentação é matemática, mas a visão do sistema varia de modelador para modelador, em suma, pode-se obter modelagens diferentes para o mesmo problema, e ambas estarem corretas.

Os modelos de otimização agregados à sintonia de controladores dos processos podem se tornar ferramentas para aumento da produtividade, com objetivos claros, como: - maximização do lucro; - minimização dos custos; - melhoria da qualidade; - aumento da segurança operacional; - diversificação da produção; - aumento da produção; - minimização do impacto ambiental negativo; - maximização da eco-eficiência. A otimização de processos tem aplicabilidade em várias áreas, tais como otimização *off-line*, projeto de equipamentos, síntese de processos, ampliação de processos, integração (*retrofit*) de processos, ajuste/identificação de modelos estáticos ou dinâmicos, reconciliação de dados, otimização em linha (*on-line*), identificação de modelos estáticos e/ou dinâmicos, controle adaptativo, controle ótimo, pontos operacionais ótimos.

#### 4.2- SINTONIA DO CONTROLADOR PID COM USO DE AG'S MODELAGEM DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Para tratar do levantamento do problema de otimização para fins de simulação, o trabalho se valeu da ajuda que a literatura acadêmica proporciona. O processo em questão é uma malha fechada, ou seja, a informação do processo (PV – a variável que se quer controlar: pH) é utilizada para realimentá-lo e controlá-lo, isto é, que o sinal de erro (diferença entre o sinal de entrada – SP – e o sinal de realimentação) deve ser minimizado e a saída do sistema chegue ao valor desejado.

Foi elaborado um diagrama de blocos do sistema (figura 12), que serve para descrever o comportamento dinâmico de cada componente.

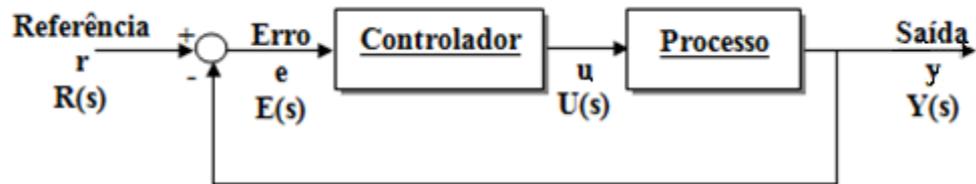


Figura 12: Diagrama de blocos do processo em questão. Fonte: Adaptado de Ogata (2007)

Para a sintonia do controlador o desejável é minimizar ou eliminar a variável erro (diferença entre o valor da variável a ser controlada e o real), como foi dito. A equação do erro, segundo a lógica de diagrama de blocos, vem a ser:

$$E(s) = R(s) - Y(s) \quad (18)$$

Onde  $R(s)$  é a referência de medição, ou o valor desejável (*set-point*), e  $Y(s)$  é a equação que envolve a equação do controlador (relacionando os parâmetros do controlador PID) vezes a do processo, ou seja,  $U(s)G(s)$ . Por questão de simulações computacionais, utilizando o programa MatLab, as tentativas realizadas com finalidade de obtenção da função objetivo foram feitas no domínio da frequência. Este domínio é representado pela letra “s”, que é uma variável complexa (que será melhor explicada na Seção 4.2.1).

O uso dos AG's como ferramenta de otimização tem como pré-requisito a modelagem de uma função objetivo. Essa função é responsável por conter todas as informações necessárias para que o algoritmo genético processe os dados e ofereça uma solução ótima para o problema. Como o problema em questão é a sintonia de controladores PID, os parâmetros que devem estar ajustados para uma solução ótima são o ganho proporcional ( $K_P$ ), o ganho integral ( $K_I$ ) e o ganho derivativo ( $K_D$ ).

A função de transferência do controlador PID, usada para obtenção da função objetivo, e que é encontrada, dentre outros autores, em Ogata (2007); Phillips e Harbor (1997); Burns (2001), é a que vem a seguir:

$$C_{PID} = K_P + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (19)$$

Após ser transformada do domínio do tempo para o domínio da frequência, em termos da variável complexa “s”, chega-se na seguinte equação, a qual será utilizada doravante nas modelagens e simulações:

$$C_{PID}(s) = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s} \quad (20)$$

Esta equação é proveniente de algebrismos feitos a partir da estrutura do controlador PID e suas 3 ações de controle, que pode ser vista na figura 13:

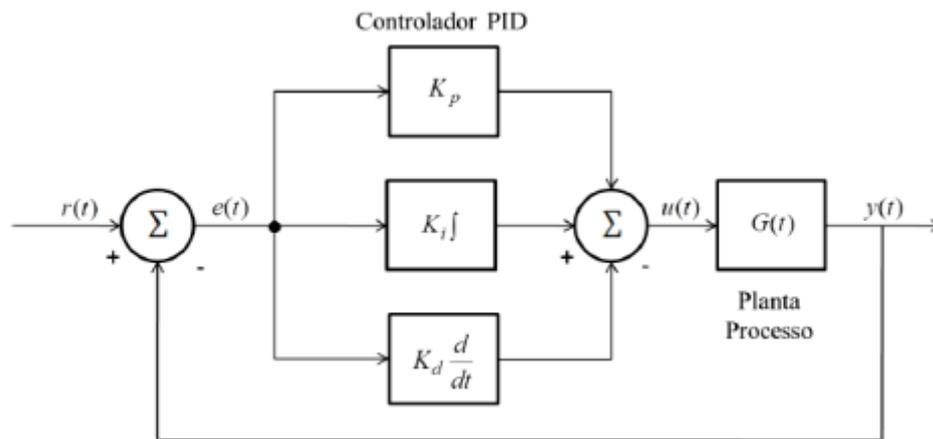


Figura 13: Diagrama de blocos do controlador PID. Fonte: (Guimarães, 2013)

#### 4.2.1- USO DA TRANSFORMADA DE LAPLACE

A forma no qual um sistema dinâmico responde a uma entrada, expresso como uma função de tempo, é chamado tempo de resposta. A avaliação teórica desta resposta é dita ser realizada no domínio do tempo, e é referida como análise no domínio do tempo (Burns, 2001).

Para isso, fez-se uso da Transformada de Laplace, que é usada para transformar equações do domínio do tempo para o domínio da frequência e vice-versa. Segundo Ogata (2007), a transformada de Laplace é um método operacional que pode ser usado de maneira proveitosa para solucionar equações diferenciais lineares. Por meio dela, pode-se converter muitas funções comuns, como funções senoidais, funções senoidais amortecidas e funções exponenciais, em funções

algébricas de uma variável complexa  $s$ . Operações como diferenciação e integração podem ser substituídas por operações algébricas no plano complexo (Ogata, 2007).

Há uma série de técnicas analíticas e numéricas disponíveis para fazer isso, mas o preferido pelos engenheiros de controle é a utilização da Transformada de Laplace. Esta técnica transforma o problema do tempo (ou  $t$ ) para o domínio da frequência (ou  $s$ ). A vantagem em fazer isso é que as equações diferenciais no domínio do tempo tornam-se complexas equações algébricas, e no domínio  $s$  se tornam relativamente simples. Quando uma solução adequada é alcançada, é transformada inversamente de volta para o domínio do tempo.

Com base principalmente em Ogata (2007), dentre outros, segue a definição da Transformada de Laplace:

$f(t)$  = uma função de tempo em que  $f(t) = 0$  para  $t < 0$ ;

$s$  = uma variável complexa;

$\mathcal{L}$  = um símbolo operacional que indica que a grandeza a que ele antecede vai ser transformada por meio da integral de Laplace  $\int_0^{\infty} e^{-st} dt$ ;

$F(s)$  = transformada de Laplace de  $f(t)$ .

Então, a transformada de Laplace de  $f(t)$  é dada por:

$$\mathcal{L}[f(t)] = F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dt [f(t)] = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$$

A transformada inversa de Laplace, processo inverso de determinação da função de tempo  $f(t)$  a partir da transformada de Laplace  $F(s)$ , é dada por  $\mathcal{L}^{-1}$  com o auxílio da seguinte integral de inversão:

$$\mathcal{L}^{-1} F(s) = f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} F(s)e^{st} ds, \text{ para } t > 0.$$

Portanto, uma equação diferencial linear pode ser transformada em uma algébrica de uma variável complexa  $s$ . Se a equação algébrica em ' $s$ ' for solucionada em termos da variável dependente, então a solução da equação diferencial poderá ser obtida pela transformada inversa de Laplace.

Alguns ajustes foram necessários para finalizar esta etapa. Somente com a função de transferência do controlador PID, não era possível ainda obter a função erro relacionando os parâmetros  $K_P$ ,  $K_I$  e  $K_D$ . Tomando como base alguns autores referenciados, (Burns, 2001; Philips e Harbor, 1997; Ogata, 2007; Andrade e Souza, 2010; Martinez e Behar, 2012), e exemplos de processos industriais químicos com controle de vazão e pH em reatores em Ferreira Filho (2006), controle de vazão em Campos e Teixeira (2006), e controle de pH em Silva (2010), utilizou-se a equação

do processo como uma função de transferência de primeira ordem genérica com adição de tempo morto:

$$\frac{k.e^{-\theta.s}}{\tau.s+1} \quad (21)$$

Onde  $\tau$  = constante de tempo;  $k$  = ganho;  $\theta$  = tempo morto. Esta equação, de acordo com Campos e Teixeira (2006) é bastante utilizada na prática para representar tanto a dinâmica de processos quanto servir de base para sintonia de controladores PID.

#### 4.2.2- ESTRUTURAÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO DO PROBLEMA

A função objetivo (do inglês *fitness*) é o parâmetro que determina a qualidade de um cromossomo, o qual permite a obtenção de melhores respostas para o sistema. A função *fitness* necessita ser bem elaborada de forma a representar fielmente as condições do problema em questão, objetivando soluções que possam levar o AG para o resultado ótimo.

Em sistemas de controle, deseja-se obter respostas que se aproximem ao máximo da referência estabelecida, além de minimizar o tempo de acomodação e Sobressinal da curva de resposta. Sendo assim, segundo Guimarães (2013) e Campos e Teixeira (2006), são utilizadas comumente em sistemas de controle funções *fitness* que minimizem os seguintes índices de desempenho: IAE, ITAE, ISE (como visto na Tabela 4, Seção 3.3.1); e Integral do erro ao quadrado vezes o tempo (ITSE – do inglês *Integral of Time Multiply Squared Error*:  $\int t \cdot e^2(t)dt$ ).

Pode-se salientar que, de forma alternativa às funções tradicionalmente utilizadas, que visam minimizar o sinal de erro, utilizou-se a seguinte função *fitness* para que os critérios de desempenho (máximo Sobressinal, tempo de acomodação, etc., conforme Figura 5) como sejam minimizados pela função:

$$J = \int |e|dt + \int |u|^2dt \quad (22)$$

Onde esses valores do sinal de erro e do sinal de controle vão ser inseridos na função *fitness* a cada geração efetuada pelo AG, sempre com a tomada de

valores finais de cada sinal. Podem-se escrever as seguintes restrições para as variáveis de decisão, e que mantêm sua não-negatividade como propriedade:  $0 \leq K_P, K_I$  e  $K_D \leq 100$ . Escolheu-se somar a integral do sinal de controle ao quadrado à métrica de erro IAE, para que o AG forneça garantias de que ao se chegar a um valor ótimo para a função *fitness*, o sinal de erro não esteja somente passando pelo zero (isto é, erro de regime permanente = 0), porém vindo de uma oscilação. Esta adição (de  $\int |u|^2 dt$ ) proporciona uma segurança de que no instante final de simulação (última geração feita pelo AG) o erro de regime permanente vai ser zero, no caso do AG proposto neste trabalho, sem obter oscilações do sinal de controle. Os resultados serão melhor vistos no Capítulo 5 de Resultados.

#### **4.2.3- O ALGORITMO GENÉTICO PROPOSTO**

O Algoritmo genético proposto, tem por objetivo a obtenção dos ganhos proporcional, integral e derivativos de controladores que otimizem os parâmetros de resposta, tais como máximo Sobressinal, tempo de subida e tempo de acomodação, no controle da variável pH do processo do reator. O fluxograma mostrado na figura 14 a seguir apresenta a forma de execução do AG proposto neste trabalho

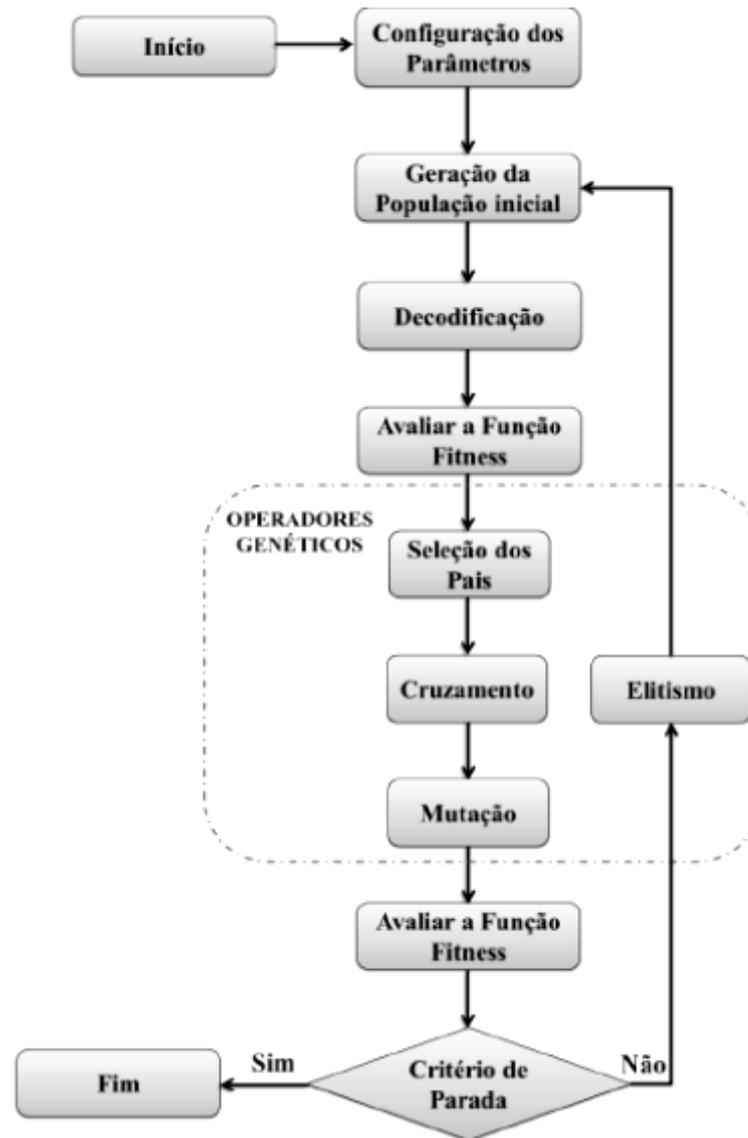


Figura 14: Fluxograma do AG proposto. Fonte: (Guimarães, 2013).

O procedimento básico de otimização por AG's, seja este com representação canônica ou real, utiliza-se de três operadores básicos: seleção, recombinação e mutação. De acordo com o fluxograma da figura 14, cria-se inicialmente uma população aleatória em forma binária, constituída por valores dos ganhos do controlador ( $K_P$ ,  $K_I$  e  $K_D$ ), os quais serão avaliados e depois submetidos a todos os operadores genéticos até atingir o número de gerações desejadas.

Porém, antes que as possíveis respostas sejam avaliadas através do cálculo da função de *fitness*, é aplicada a decodificação do número binário em número real.

De acordo com Guimarães (2013), cabe o destaque de que a expressão matemática que é utilizada para converter o número binário em um número real (decodificação) dentre uma gama de valores é representada pela equação a seguir:

$$X_{\text{Real}} = X_{\text{inf}} + \frac{|X_{\text{inf}} - X_{\text{sup}}|}{2^{k-1}} \cdot X_c \quad (23)$$

Onde  $X_{\text{Real}}$  representa o valor real a ser obtido dentro do intervalo  $[X_{\text{inf}}, X_{\text{sup}}]$ ,  $X_c$  é o número inteiro correspondente ao binário e  $k$  é o número de bits do indivíduo, conforme Linden (2008). No AG proposto,  $X_{\text{inf}}$  e  $X_{\text{sup}}$  representam, respectivamente, os valores mínimos e máximos de cada um dos ganhos ( $K_P$ ,  $K_I$  e  $K_D$ ).

A função *fitness* ou objetivo é a responsável pelo cálculo da aptidão de cada indivíduo e é de suma importância para que o processo tenha convergência, pois é a chave para a utilização do AG, tendo responsabilidade no desempenho da dinâmica da planta de processo que será controlado. Desta forma, a função *fitness* utilizada neste trabalho é caracterizada pela equação (22), que segue novamente:

$$J = \int |e| dt + \int |u|^2 dt$$

Também é necessário multiplicar as duas integrais acima por respectivos pesos, como forma de penalizar o que se deseja: a diminuição do sinal de erro ou do sinal de controle. Esses pesos foram simulados e serão mostrados no Capítulo 5 de Resultados.

Depois da avaliação da função *fitness*, selecionam-se as populações atuais pelo método da roleta proporcional, as quais são organizadas em uma matriz onde as linhas correspondem ao número de populações ( $N_{\text{pop}}$ ) e as colunas representam valores de  $K_P$ ,  $K_I$  e  $K_D$  e *Fitness*.

Na etapa de cruzamento, que vem a ser outro operador genético, selecionam-se dois pais, a partir do primeiro indivíduo, indo até  $N_{\text{pop}}$ , e combina 50% de cromossomos de cada pai, originando dois novos indivíduos. Este procedimento de cruzamento é feito de acordo com uma probabilidade  $P_c$  que varia de  $0,5 \leq P_c \leq 1$ , segundo Guimarães (2013).

De acordo com Czarkowski (2002), após o cruzamento, o operador de mutação poderá ser aplicado segundo uma baixa probabilidade  $P_m$  variando em um intervalo de  $0,001 \leq P_m \leq 0,01$ .

Tomando como base somente alguns critérios e parâmetros utilizados no AG do trabalho de Guimarães (2013), que segue na Figura 15, foram feitas alterações

próprias na síntese do controlador deste trabalho, e serão mais amplamente comentadas na próxima seção.

|                                   |                    |
|-----------------------------------|--------------------|
| Número de Indivíduos da População | 100                |
| Número de Gerações                | 50                 |
| Genitores                         | 2                  |
| Número de Filhos por Geração      | 2                  |
| Pontos de Corte                   | 1                  |
| Probabilidade de Cruzamento (%)   | 80                 |
| Probabilidade de Mutação (%)      | 1                  |
| Probabilidade de Elitismo (%)     | 75                 |
| Critério de Parada                | Número de Gerações |

Figura 15: Parâmetros do AG de Guimarães (2013) usados como referência para criação de parâmetros próprios. Fonte: (Guimarães, 2013)

Segundo o trabalho de Guimarães (2013), ao término da primeira geração de descendentes, a função *fitness* terá uma nova avaliação e, caso o critério de parada não tenha sido atingido, os  $n$  indivíduos mais aptos da atual população poderão ser integrados a uma nova que será gerada aleatoriamente (processo de elitismo). Terminada a etapa de elitismo, o processo se repete até que seja atingido o critério de parada escolhido (número de gerações). Convém ressaltar que, por não existir uma teoria geral que se aplique no auxílio da sintonia dos parâmetros dos AG's, faz-se necessária a verificação da convergência das respostas no algoritmo.

#### 4.2.3.1- USO DA FERRAMENTA *GATool* NO MATLAB

A *toolbox*, ou ferramenta, que utiliza os algoritmos genéticos no MatLab, é o *gatool*, e não fica aquém das etapas descritas na seção anterior. Nessa *toolbox* existem maneiras de se declarar o número de variáveis, a função objetivo, alterar taxa de mutação, etc. Além disso, existem campos de entrada de parâmetros para que se possa dar entrada com algumas condições ou restrições.

Uma restrição importante, segundo Andrade e Souza (2010), para que a solução encontrada satisfaça as condições de sintonia de um controlador PID é que o universo de busca da população inicial englobe apenas valores positivos, como foi feito.

Podem-se reparar na figura 16, que é a representação da ferramenta *gatool*, os campos de declaração dos parâmetros para que a ferramenta processe as informações e forneça a solução ótima. Primeiramente, na metade esquerda da figura 16, pode-se observar o campo destinado a declaração da função objetivo (*Fitness Function*); o campo de declaração do número de variáveis (*Number of variables*); após o campo *Bounds*, onde se é declarado os limites do universo de busca para a solução do problema. Nos campos seguintes, na metade direita da figura 16, têm-se opções de visualizações de outros atributos que não seja a solução do problema como: melhor indivíduo, a distância entre os indivíduos da população, dados sobre a seleção dos indivíduos, critério de parada, melhor função, entre outras.

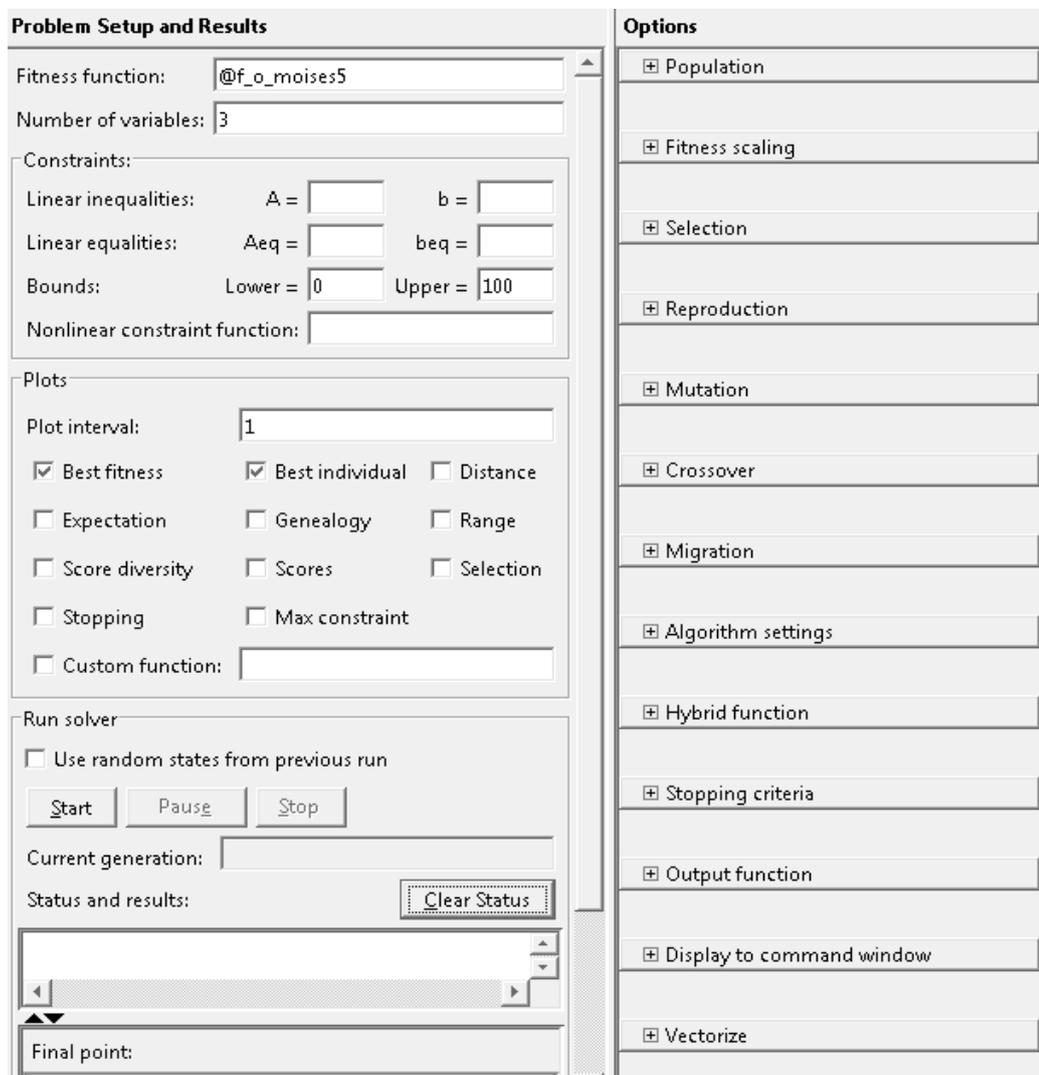


Figura 16: Representação da ferramenta *gatool* do programa MatLab.

Quando se utiliza esta ferramenta, após a entrada dos parâmetros necessários, existe a possibilidade de se gerar linhas de código em arquivo do MatLab (arquivo “.m”) sobre a forma de função, a qual foram utilizadas por este trabalho para elaboração da função objetivo (“J”, vide equação 22), que será inserida no AG, como nas figuras 17 e 18:

```
clear
clc
load_system('SimModel');
%%
fitnessFunction = @OptFile_M;
%%Number of Variables
nvars = 3 ;
%Linear inequality constraints
Aineq = [];
Bineq = [];
%Linear equality constraints
Aeq = [];
Beq = [];
%Bounds
lb = 0 ;
ub = 100;
%Nonlinear constraints
nonlconFunction = [];
%Start with default options
options = gaoptimset;
%%Modify some parameters
options = gaoptimset(options,'PopulationSize',100);%100
options = gaoptimset(options,'CrossoverFraction',1 );
options = gaoptimset(options,'Generations',50);%50
options = gaoptimset(options,'SelectionFcn',@selectionroulette);
options = gaoptimset(options,'MutationFcn',{ @mutationadaptfeasible 1 1 });
options = gaoptimset(options,'Display','off');
options = gaoptimset(options,'PlotFcns',{ @gaplotbestf @gaplotbestindiv });
%%Run GA
[x,fval,exitflag,output,population,score] = ga(@OptFile_M,nvars,[],[],[],[],[1 1 1]*lb,[1 1 1]*ub,[],options);
```

Figura 17: Função gerada pelo gatool em arquivo “.m”.

```
function J = OptFile_M(x)

set_param('SimModel/PID','P',num2str(x(1)));
set_param('SimModel/PID','I',num2str(x(2)));
set_param('SimModel/PID','D',num2str(x(3)));

simOut = sim('SimModel','AbsTol','1e-5',...
'SaveState','on','StateSaveName','xoutNew',...
'SaveOutput','on','OutputSaveName','youtNew');
%simOutVars = simOut.who;
J = simOut.find('youtNew');

% J=J(end,1)+J(end,2);
J = 50*J.signals(1).values(end) + (0.5)*J.signals(2).values(end); %100*iae + intu
```

Figura 18: Função objetivo (fitness), usada pelo AG, em arquivo “.m”

A utilização de um algoritmo genético é também considerada um problema de otimização devido à grande quantidade de parâmetros possíveis de serem alterados

e capazes de gerarem resultados diferentes. Podem-se verificar na metade direita da figura 16 estes parâmetros. Nos primeiros testes, estes parâmetros foram alterados heurísticamente, e verificadas as possíveis alterações na sintonia do controlador PID. Em um segundo momento, após algumas alterações feitas convenientemente, chegou-se nos seguintes parâmetros, listados na tabela 10:

Tabela 10: parâmetros de configuração do AG no *gatool* do MatLab

| <b>Parâmetros do AG no <i>gatool</i></b> | <b>Valores</b>  |
|--|---|
| Bounds – Lower                           | 0   |
| Bounds – Upper                           | 100   |
| Plot Interval                            | "marcar" best fitness e best interval   |
| Population type                          | Double vector   |
| Population size                          | 100   |
| Creation function                        | Uniform   |
| Fitness scalling                         | Scaling function = rank   |
| Selection function                       | Roulette  |
| Reproduction                             | Elite count = 2; crossover fraction = 1.0   |
| Mutation function                        | Adaptative feasible; scale = 1; shrink = 1  |
| Crossover                                | Crossover function: scattered   |
| Migration                                | Direction: forward; fraction = 0.2; interval = 20   |
| Algorithm settings                       | Initial penalty = 10; penalty factor = 100  |
| Hybrid function                          | None  |
| Stopping criteria                        | Generations = 50; time limit: inf;<br>Fitness limit: - inf; stall generation = 50;<br>Stall time limit = 20; function tolerance<br>e nonlinear constraint tolerance= 1e-006 |
| (parâmetros restantes)                   | Não alterados   |

#### 4.2.3.2- SIMULAÇÃO EM MALHA FECHADA

Assim que os pré-requisitos fossem previamente atendidos, para que a execução do AG fosse estabelecida, segue-se a identificação de que forma os resultados gerados podem ser analisados e como o AG está relacionado com o modelo de simulação.

Não se trata necessariamente de um modelo de simulação de malha fechada, pois o AG é executado em um plano, onde busca os melhores valores para os parâmetros do controlador PID, e os valores gerados por ele são utilizados em um segundo momento, na parametrização do controlador. Um diagrama de blocos que representa esta interação do AG com o modelo de simulação segue na figura 19:

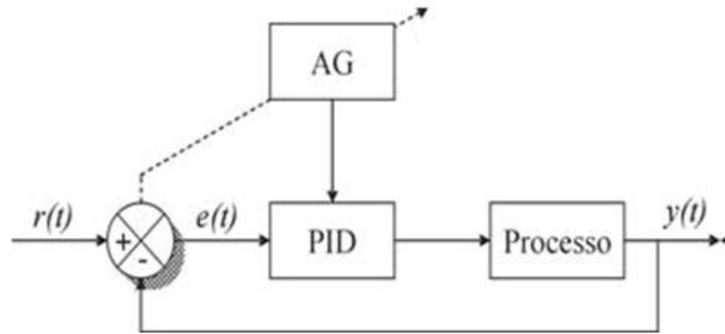


Figura 19: Ajuste das variáveis de decisão do controlador PID através do AG. Fonte: (Nunes *et al.*, 2003/2004)

## CAPÍTULO V

### RESULTADOS

Neste Capítulo apresentam-se os resultados de testes aplicando o Algoritmo Genético proposto. Para validação da técnica utilizada serão apresentadas comparações com métodos de sintonia clássicos de controladores PID. As simulações foram implementadas nos softwares MatLab 7.4.0.287 (R2007a), em um processador Intel Core i3 (M 350 - 2,27 GHz) e 4GB de memória RAM; e MatLab 8.1.0.604 (R2013a), processador Intel Celeron (1000M – 1,80GHz) e 6 GB de memória RAM.

Em todas as simulações foram aplicadas para seleção os métodos de configuração descritos em detalhes na Seção 4.2.3.1 do Capítulo 4. Estes valores foram obtidos após resultados de simulações que mostraram que o aumento do número de gerações e população além do proposto na tabela 10 não apresentou ganho significativo no que se refere à convergência do algoritmo, nem à melhora da função objetivo.

#### 5.1- PLANTA COM FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE PRIMEIRA ORDEM

Os primeiros testes realizados tiveram como prioridade verificar a eficiência do AG para busca dos melhores valores da função objetivo e valores das variáveis de decisão, e com isso obter a resolução de problemas de sintonia de controladores PID.

Estas análises foram de grande valia para demonstrar a agilidade de sintonizar um controlador para um determinado processo, quando se conhece a dinâmica deste para obtenção da função objetivo.

Nos métodos de sintonia clássicos, para cada planta é necessária uma série de testes com o processo, o que pode ser não conveniente, pois sugere parada do processo, e posteriormente cálculos para obtenção dos valores dos parâmetros ideais de sintonia. Contudo, muitas vezes após executado esses métodos, a planta ainda não se encontra controlada de acordo com os parâmetros de especificação de desempenho, como tempo de subida, máximo Sobressinal e tempo de acomodação, necessitando de uma sintonia fina, que é realizada de forma heurística.

A sintonia proveniente de otimização com AG's também pode fazer uso de uma sintonia fina, porém, a obtenção de seus primeiros parâmetros é muito mais

rápida uma vez que se conhece a dinâmica do processo e da obtenção da função objetivo.

Para que o presente trabalho pudesse se aproximar do exemplo obtido no processo real do controlador de pH da empresa, estabeleceram-se simulações com um processo de primeira ordem com tempo morto, o que é mais comum de se encontrar no meio industrial (Morales *et al.*, 2013), uma vez que existem diversos processos físicos com tempo morto. Por exemplo, quase todos os processos químicos envolvem algum atraso de tempo (Ferreira Filho, 2006). A maneira mais comum de se lidar com este tipo de problema é a utilização de aproximações do tempo morto por algum método e análise do resultado do sistema.

Outra possibilidade que a utilização de uma planta de processo com tempo morto trouxe, é que o seu desempenho poderá ser comparado com o desempenho de uma sintonia realizada pelos métodos clássicos contemplados neste trabalho (Ziegler & Nichols, Cohen e Coon, ITAE, IAE).

### **5.1.1- ADIÇÃO DE GANHO E TEMPO MORTO**

Também houve a necessidade de se estabelecer um ganho na saída do processo, para o estudo de caso, que proveu alguns dados para simulação. O ganho é a relação de sensibilidade entre a variação de pH e a variação da vazão de base na entrada do reator, ou seja, o ganho do processo expressa quanto se altera a variável de saída para cada unidade de variação da variável de entrada.

A pesquisa necessitou de uma investigação para encontrar esses valores. Duas pessoas da área química (Rangel e Rangel, 2014) foram entrevistadas. Segundo os entrevistados, considerando a mistura no reator homogênea, isto é, não há diferença do valor de pH se lidos do lado da entrada de ácido ou do lado da entrada de base, o pH começa a variar a partir do seu ponto neutro, ou seja, 7.

Se o reator começa a misturar com ácido já colocado nele e tendo a adição de base, o pH vai variar de 0 até o seu SP de 8,5. Esta ideia foi utilizada para estabelecer o valor do ganho inserido, já que se tem ciência de que a base (MV) tem uma variação entre 15% e 16%.

Considerando que o ácido utilizado no processo é mais fraco que a base utilizada, segundo Fiorucci *et al.* (2001), Rangel e Rangel (2014), Aleixo (2014), e cálculos efetuados, encontra-se o valor de ganho:

$$K = \frac{\Delta \text{saída}}{\Delta \text{entrada}} = \frac{\Delta \text{pH}}{\Delta \text{Vz base}} = \frac{8,5}{15} = 0,56 \quad (24)$$

O tempo de abertura da válvula da MV, que foi informado, é de 2 segundos. Segundo os entrevistados (Rangel e Rangel, 2014), este é um tempo pertinente para a variável pH mudar de valor quando se tem adição de base na mistura do reator, sem que o sensor que faz a sua leitura perceba sua variação. Então este valor foi estabelecido como o tempo morto inserido nas simulações.

## 5.2- SINTONIA COM OTIMIZAÇÃO PELO AG PROPOSTO

A primeira simulação estabelecida no Simulink/MatLab utilizou uma adição de tempo morto de  $T = 2$  segundos, em uma função de transferência de 1ª ordem, ganho de 0,56 (considera-se a mistura ácida inicialmente, do estudo de caso, partindo do  $\text{pH} = 0$ ) e constante de tempo = 1 segundo. No Simulink, fez-se necessário a inserção de um bloco de ganho e outro de atraso de tempo (*transport delay* – neste bloco é necessária a inserção de uma ordem elevada de aproximação de Padé: 15, para evitar oscilações). As modificações ficaram da seguinte forma, na figura 20. Na mesma também se percebe a leitura da integral do sinal de erro e a leitura da integral do sinal de controle ao quadrado, que são repassadas para o arquivo “.m” da função objetivo “J”:

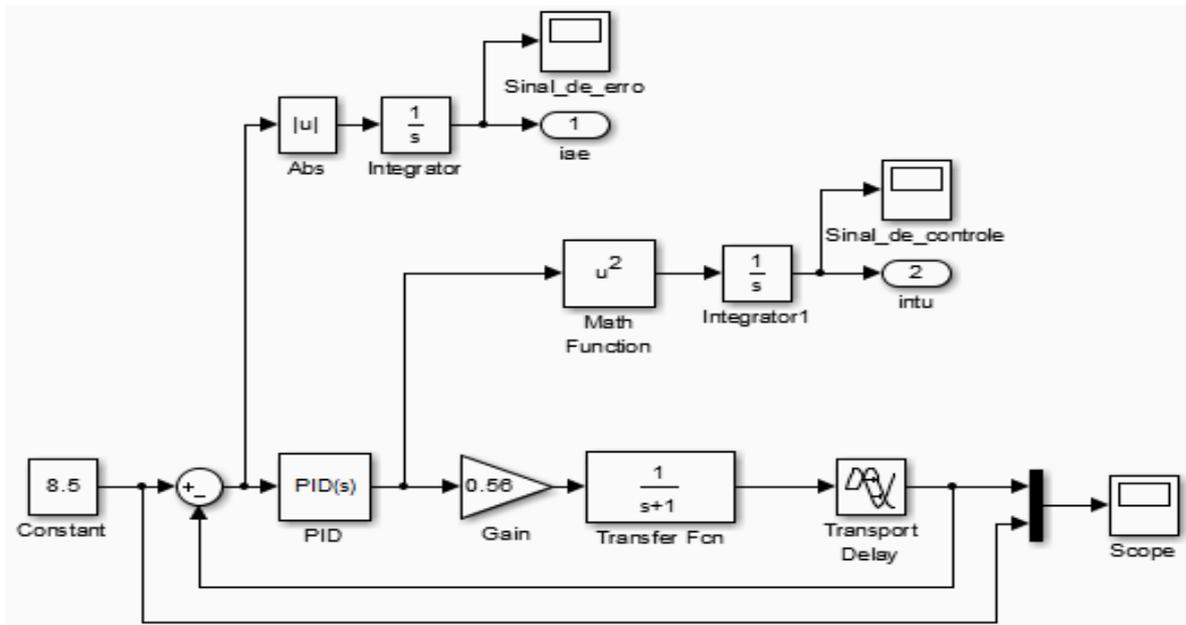


Figura 20: Diagrama de blocos da simulação no Simulink do processo, contendo função de 1ª ordem com tempo morto e ganho.

O AG forneceu os seguintes valores para as variáveis de decisão:

$$K_P = 0.50465;$$

$$K_I = 0.34075;$$

$$K_D = 0.$$

Com uma população de 20; 10 gerações; peso = 100 para o sinal de erro e 1 para o sinal de controle na *fitness function*; e mesmos parâmetros da Tabela 10. O resultado pode ser visto na figura 21, a seguir:

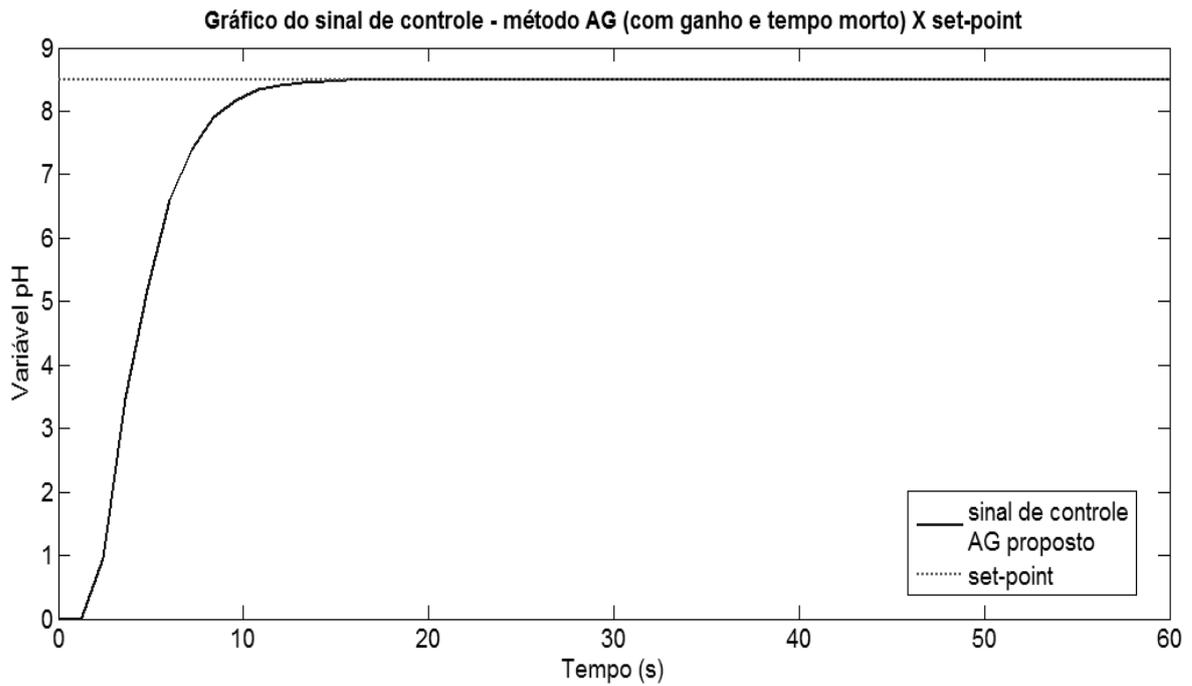


Figura 21: Gráfico do AG proposto modificado *versus* SP.

Esta primeira simulação só foi realizada para verificar a aplicabilidade do AG para a síntese de controle. O gráfico de convergência da função *fitness* (opção que pode ser escolhida como plotagem na ferramenta *gatoool* do MatLab) segue na figura 22:

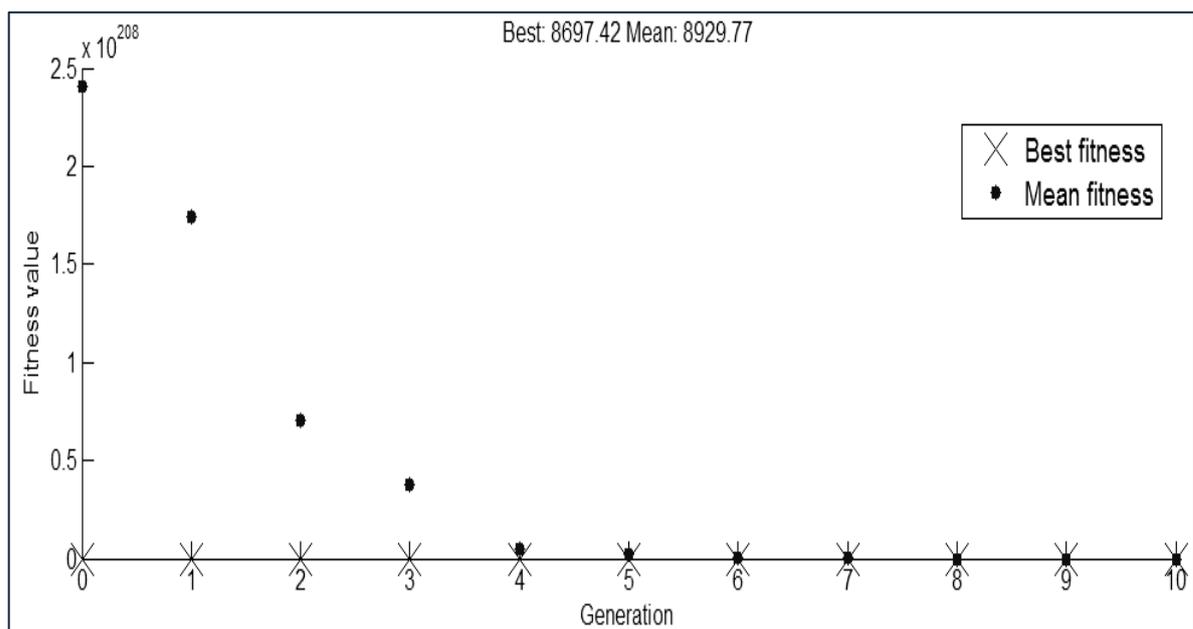


Figura 22: Gráfico da convergência da primeira simulação da função objetivo do AG proposto

Após esta, estabeleceu-se outra simulação, com os seguintes dados: pesos = 50 para o sinal de erro e 0.5 para o sinal de controle na *fitness function* e mesmos parâmetros da Tabela 10. O AG forneceu os seguintes novos valores para as variáveis de decisão:

$$K_P = 0.9419;$$

$$K_I = 0.44599;$$

$$K_D = 0.$$

O resultado pode ser visto na figura 23:

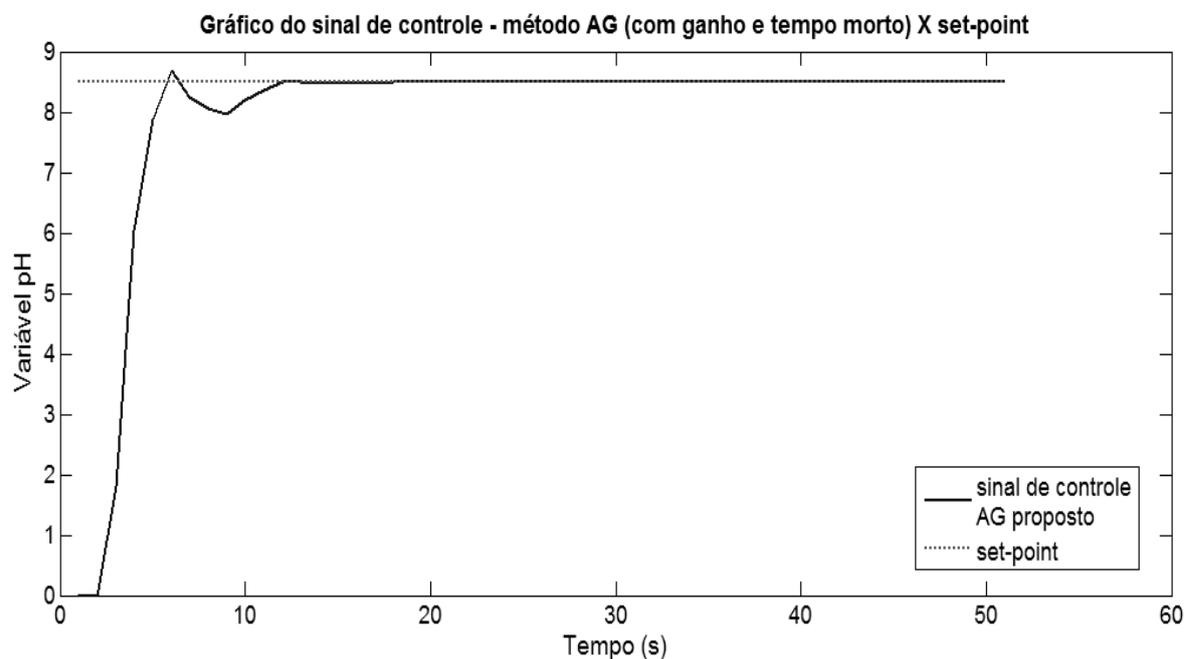


Figura 23: Gráfico do AG proposto novo e usado como parâmetro de comparação *versus* SP.

Este controlador foi o escolhido pelo trabalho como parâmetro para as comparações com os outros métodos. Seus requisitos de desempenhos foram bem satisfatórios, inclusive com erro máximo de Sobressinal de 2,22%, portanto dentro do intervalo do *benchmark* ( $\text{overshoot} \leq 10\%$ ) citado na Seção 3.3.1 do Capítulo 3:

Tabela 11: Critérios de desempenho do controlador sintonizado pelo AG proposto.

| Método de Sintonia | Tempo de subida | Sobressinal | Erro de regime permanente |
|--------------------|-----------------|-------------|---------------------------|
| AG proposto        | 4,5 s           | 2,22%       | 0                         |

A utilidade dos controladores PID's está na sua aplicabilidade geral à maioria dos sistemas de controle. Em particular, quando o modelo matemático da planta não

é conhecido e, portanto, métodos de projeto analítico não podem ser utilizados. Em sistemas de controle de processos, os controladores PID's provaram sua utilidade conferindo um controle satisfatório, embora em várias situações eles podem não conferir um controle ótimo. Por isso a busca da otimização dos mesmos com uso de AG's pelo presente trabalho.

As próximas simulações foram feitas com os métodos clássicos mais encontrados na literatura acadêmica e expostos aqui neste trabalho na Seção 3.3.2 do Capítulo 3.

### 5.3- SINTONIA PELOS MÉTODOS CLÁSSICOS

#### 5.3.1- MÉTODO DE ZIEGLER E NICHOLS

A simulação feita a seguir foi realizada com os valores dos parâmetros do controlador PID obtidos pelo método de Ziegler e Nichols em malha aberta, segundo a tabela 6 da mesma seção supracitada. Os valores das variáveis de decisão são  $K_P = 1,07143$ ;  $K_I = 0,25$  e  $K_D = 1$ ; com o uso dos mesmos valores de ganho e tempo morto. Os dados obtidos ficaram como o expresso no gráfico da figura 24:

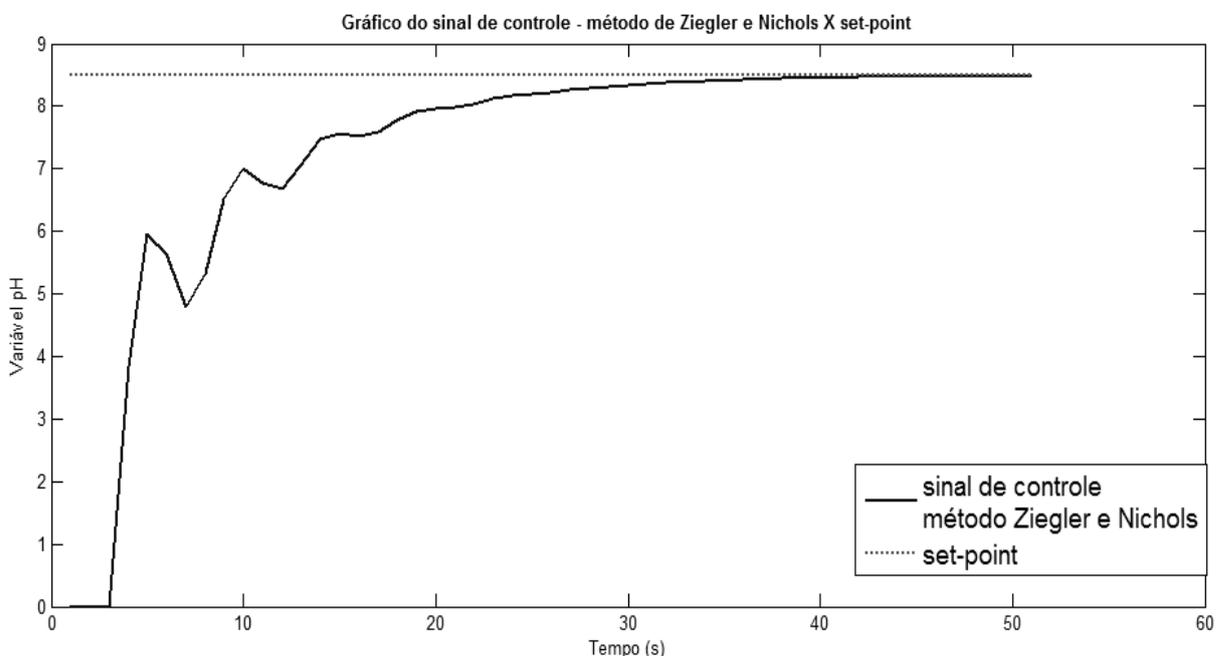


Figura 24: Gráfico da sintonia do PID pelo método de Ziegler e Nichols *versus* SP.

O controlador PID sintonizado pelo método de Ziegler e Nichols também possui requisitos de desempenho não satisfatórios, feita a comparação com o AG proposto, expostos na tabela 12.

Tabela 12: Critérios de desempenho do controlador sintonizado pelo método de Ziegler e Nichols.

| <b>Método de Sintonia</b> | <b>Tempo de subida</b> | <b>Sobressinal</b> | <b>Erro de regime permanente</b> |
|---------------------------|------------------------|--------------------|----------------------------------|
| Ziegler e Nichols         | 20 seg.                | 0%                 | 0,137%                           |

Como foi exposto na Seção 3.3.1 (“Critérios de desempenho”) os métodos clássicos, como Ziegler e Nichols, Cohen e Coon, etc., fazem suas sintonias com o objetivo de minimizar o sinal de erro. Após isso, verificam-se os critérios de desempenho, se são satisfatórios ou não. Por isso, escolheu-se uma métrica alternativa, a utilizada na função objetivo do AG, para contemplar o sinal de controle, o qual não se faz uso nos métodos aqui nomeados clássicos.

### 5.3.2- SINTONIA PELO MÉTODO DE COHEN E COON

A próxima simulação no ambiente do MatLab e do Simulink foi realizada com os valores dos parâmetros do controlador PID obtidos pelo método de Cohen e Coon, segundo a tabela 7 da seção 3.3.2, Capítulo 3. Os valores das variáveis de decisão são  $K_P = 1,65178$ ,  $K_I = 0,324324$  e  $K_D = 0,540540$ ; com o uso dos mesmos valores de ganho e tempo morto. Os dados obtidos podem ser vistos no gráfico da figura 25:

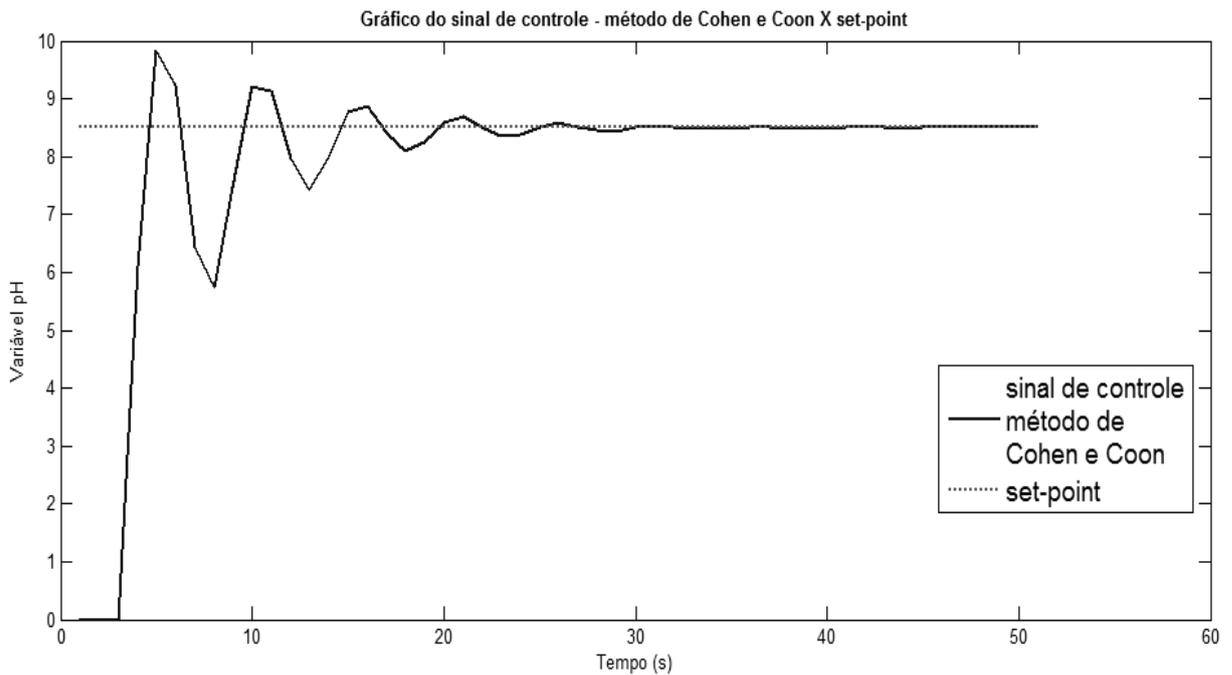


Figura 25: Gráfico da sintonia do PID pelo método de Cohen e Coon versus SP.

O controlador PID com sintonia obtida pelo método de Cohen e Coon também possui requisitos de desempenho não satisfatórios, feita a comparação com o AG proposto, como pode ser visto na tabela 13. Apesar de ter um tempo de subida rápido, fornece em contra partida um erro de Sobressinal alto, 15,55%, fugindo do *benchmark* encontrado na indústria e na literatura ( $overshoot \leq 10\%$ ).

Tabela 13: Critérios de desempenho do controlador sintonizado pelo método de Cohen e Coon.

| Método de Sintonia | Tempo de subida | Sobressinal | Erro de regime permanente |
|--------------------|-----------------|-------------|---------------------------|
| Cohen e Coon       | 14 s            | 15,55%      | Aprox. 0                  |

### 5.3.3- SINTONIA PELO MÉTODO IAE DE LOPEZ *ET AL.* (1967)

Esta simulação foi realizada com os valores dos parâmetros do controlador PID obtidos pelo método IAE de Lopez *et al.* (1967) *apud* Campos e Teixeira (2006), segundo a tabela 8. Os valores das variáveis de decisão do controlador são  $K_P = 1,35336$ ,  $K_I = 0,52242$  e  $K_D = 1,06$ ; com o uso dos mesmos valores de ganho e tempo morto. Os dados obtidos podem ser vistos no gráfico da figura 26:

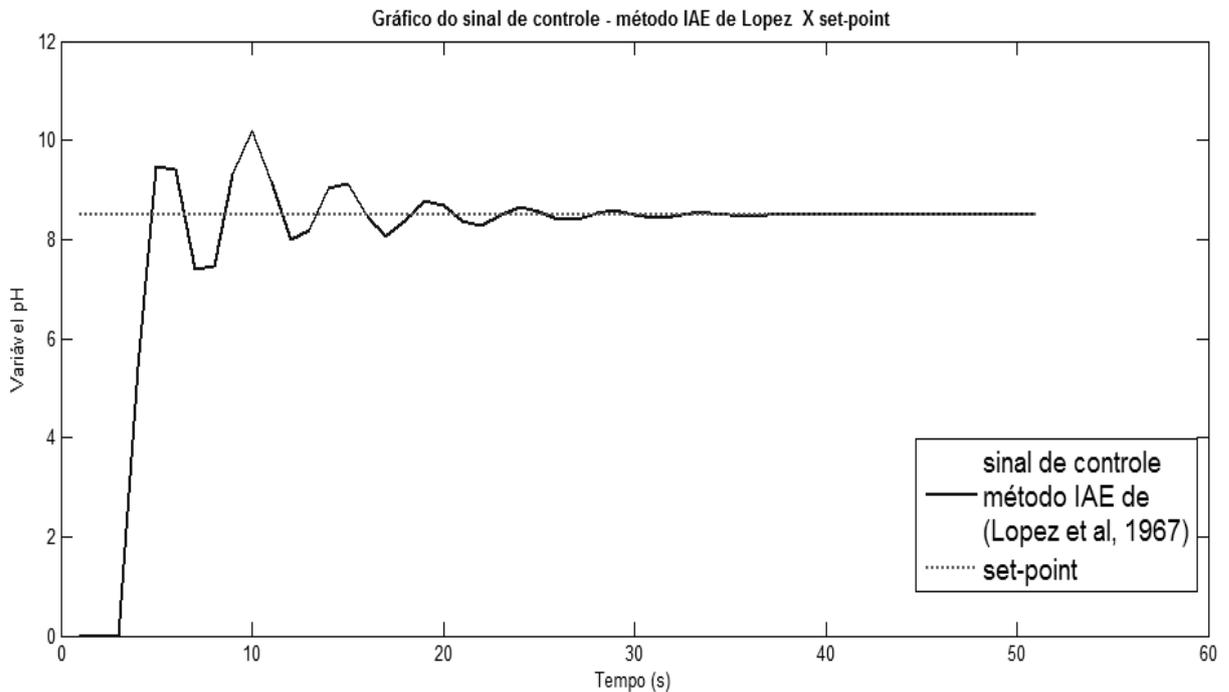


Figura 26: Gráfico da sintonia do PID pelo método IAE de Lopez *et al.* (1967) versus SP.

O controlador PID com sintonia obtida pelo método IAE de Lopez *et al.* (1967) possui requisitos de desempenho não satisfatórios se feita a comparação com o AG proposto, como pode ser visto na tabela 14. Apesar de também ter um tempo de subida rápido, como o método anterior de Cohen e Coon, fornece em contra partida um erro de Sobressinal alto, de 20%, e ultrapassando o valor de *benchmark* encontrado nas sintonias de controladores PID nas indústrias e na literatura ( $overshoot \leq 10\%$ ).

Tabela 14: Critérios de desempenho do controlador sintonizado pelo método IAE de Lopez *et al.* (1967).

| Método de Sintonia                | Tempo de subida | Sobressinal | Erro de regime permanente |
|-----------------------------------|-----------------|-------------|---------------------------|
| IAE de Lopez <i>et al.</i> (1967) | 12 s            | 20%         | Aprox. 0                  |

#### 5.3.4- SINTONIA PELO MÉTODO ITAE DE LOPEZ ET AL. (1967)

Esta simulação foi realizada com os valores dos parâmetros do controlador PID obtidos pelo método ITAE de Lopez *et al.* (1967) *apud* Campos e Teixeira (2006), segundo a tabela 8. Os valores das variáveis de decisão do controlador são

$K_P = 1,25694$ ,  $K_I = 0,50483$  e  $K_D = 0,75936$ ; com o uso dos mesmos valores de ganho e tempo morto. Os dados obtidos podem ser vistos no gráfico da figura 27:

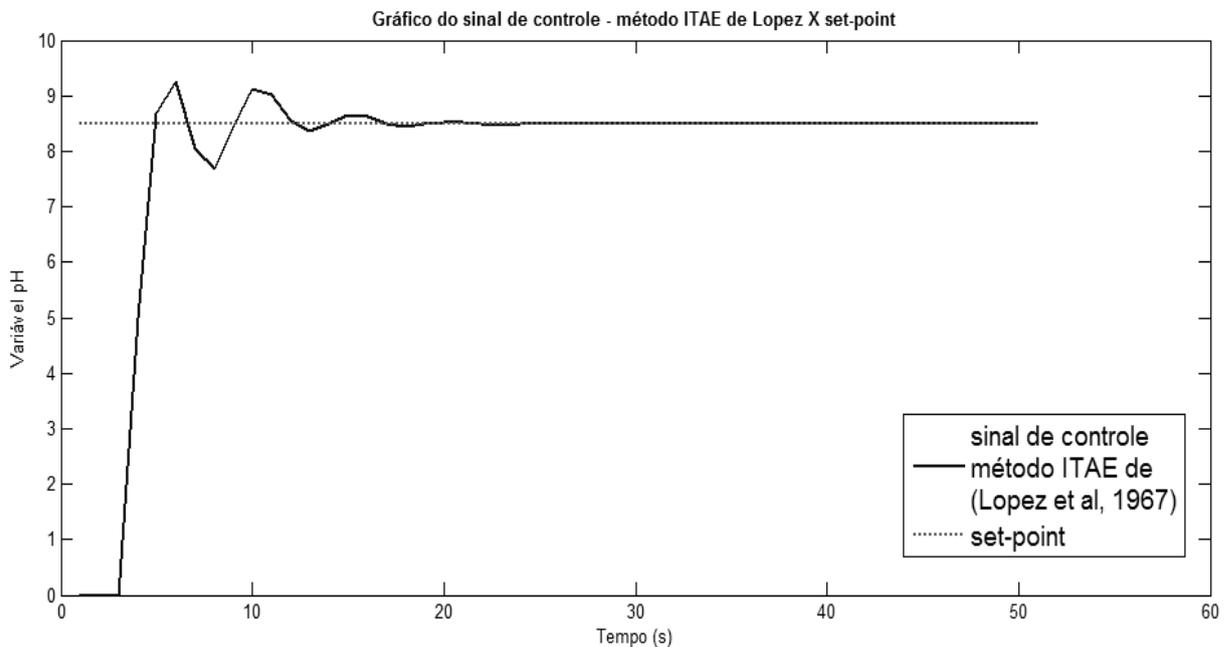


Figura 27: Gráfico da sintonia do PID pelo método ITAE de Lopez *et al.* (1967) versus SP.

O controlador PID com sintonia obtida pelo método ITAE de Lopez *et al.* (1967) possui requisitos de desempenho satisfatórios se feita a comparação com o AG proposto, como pode ser visto na tabela 15. Este apresenta um tempo de subida rápido, como o método anterior de Cohen e Coon e ITAE, e fornece em um erro de Sobressinal de 8,94%, portanto dentro do valor de *benchmark*.

Tabela 15: Critérios de desempenho do controlador sintonizado pelo método ITAE de Lopez *et al.* (1967).

| Método de Sintonia                 | Tempo de subida | Sobressinal | Erro de regime permanente |
|------------------------------------|-----------------|-------------|---------------------------|
| ITAE de Lopez <i>et al.</i> (1967) | 8 seg.          | 8,94%       | 0                         |

### 5.3.5- SINTONIA PELO MÉTODO IAE DE ROVIRA ET AL. (1969)

Esta simulação foi realizada com os valores dos parâmetros do controlador PID obtidos pelo método IAE de Rovira *et al.* (1969) *apud* Campos e Teixeira (2006), segundo a tabela 9. Os valores das variáveis de decisão do controlador são  $K_P =$

1,04212,  $K_I = 0,48$  e  $K_D = 0,65572$ ; com o uso dos mesmos valores de ganho e tempo morto. Os dados obtidos podem ser vistos no gráfico da figura 28:

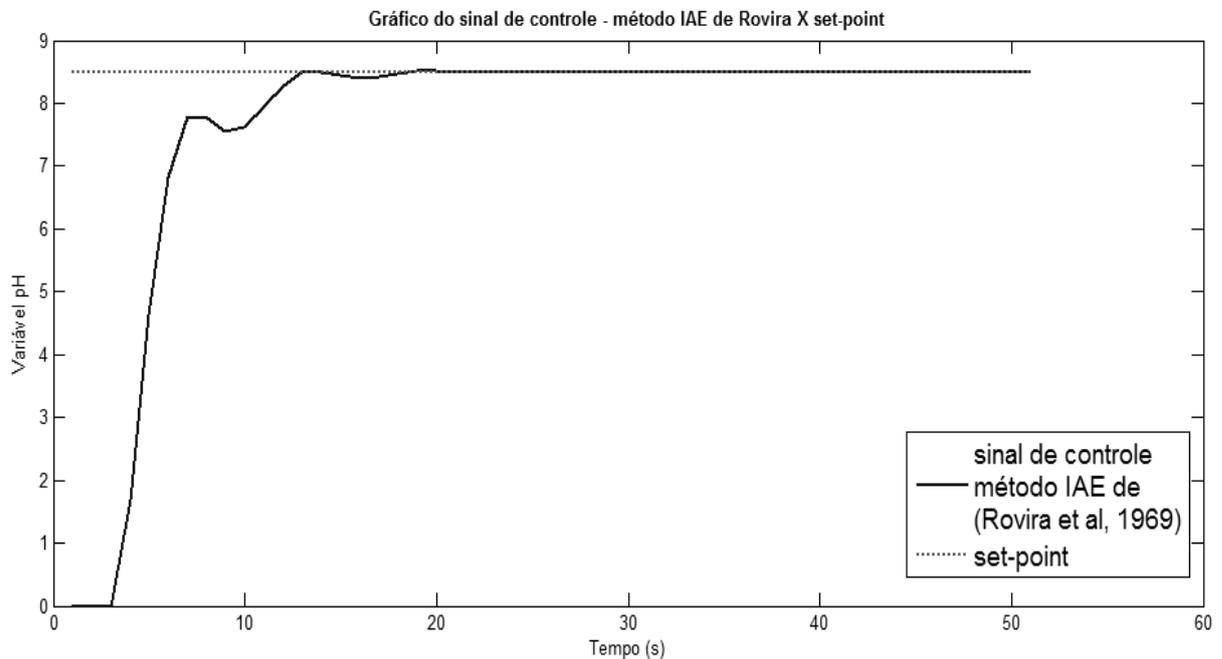


Figura 28: Gráfico da sintonia do PID pelo método IAE de Rovira *et al.* (1969) versus SP.

O controlador PID com sintonia obtida pelo método IAE de Rovira *et al.* (1969) possui requisitos de desempenho satisfatórios se feita a comparação com o AG proposto, como pode ser visto na tabela 16. Este apresenta um tempo de subida rápido, como o método anterior de IAE e ITAE de Lopez *et al.* (1967), e fornece um erro de Sobressinal de aproximadamente 0%, como o do AG proposto e dentro do intervalo do valor de *benchmark*.

Tabela 16: Critérios de desempenho do controlador sintonizado pelo método IAE de Rovira *et al.* (1969).

| Método de Sintonia                 | Tempo de subida | Sobressinal | Erro de regime permanente |
|------------------------------------|-----------------|-------------|---------------------------|
| IAE de Rovira <i>et al.</i> (1969) | 9 s             | Aprox. 0%   | 0                         |

### 5.3.6- SINTONIA PELO MÉTODO ITAE DE ROVIRA ET AL. (1969)

Esta última simulação para comparação com a do AG proposto foi realizada com os valores dos parâmetros do controlador PID obtidos pelo método ITAE de

Rovira *et al.* (1969), segundo a tabela 9. Os valores das variáveis de decisão do controlador são  $K_P = 0,9560$ ,  $K_I = 0,502$  e  $K_D = 0,58642$ ; com o uso dos mesmos valores de ganho e tempo morto. Os dados obtidos podem ser vistos no gráfico da figura 29:

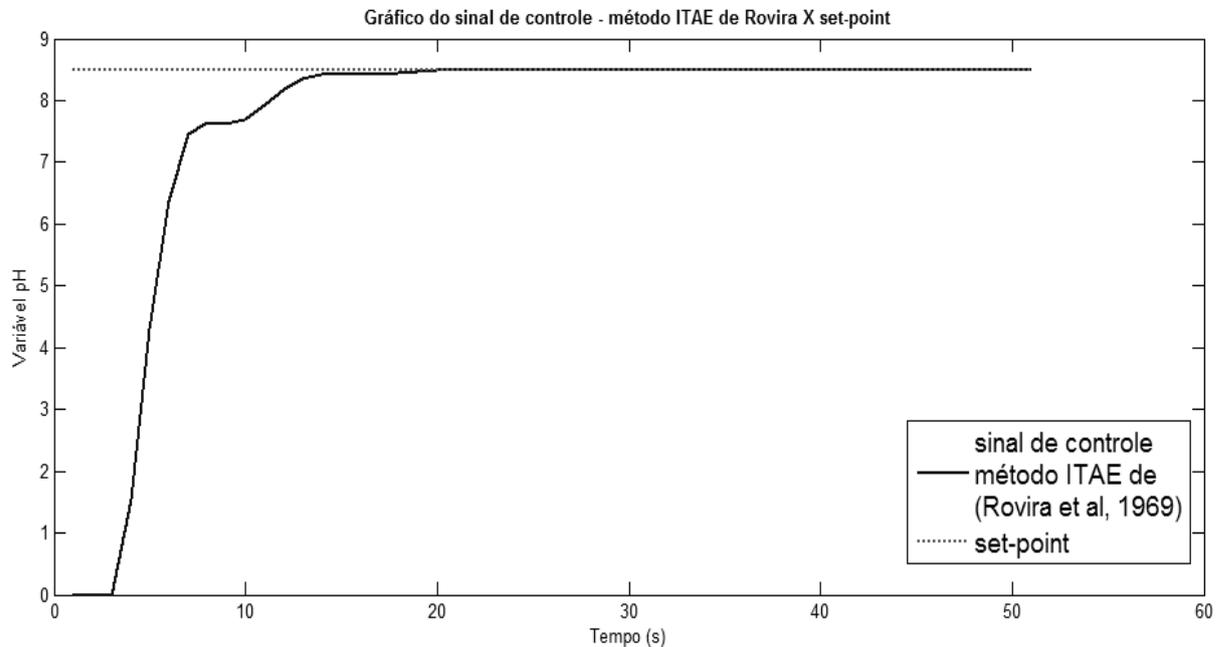


Figura 29: Gráfico da sintonia do PID pelo método ITAE de Rovira *et al.* (1969) versus SP.

O controlador PID com sintonia obtida pelo método ITAE de Rovira *et al.* (1969) possui requisitos de desempenho satisfatórios se feita a comparação com o AG proposto, como pode ser visto na tabela 17. Este apresenta um tempo de subida rápido, como o método anterior de IAE do próprio autor citado, e fornece em um erro de Sobressinal de 0%, como o do AG proposto e dentro do intervalo do valor de *benchmark*.

Tabela 17: Critérios de desempenho do controlador sintonizado pelo método ITAE de Rovira *et al.* (1969)

| Método de Sintonia                     | Tempo de subida | Sobressinal | Erro de regime permanente |
|--|-----------------|-------------|---------------------------|
| ITAE de<br>Rovira <i>et al.</i> (1969) | 8 seg.          | 0%          | 0                         |

Observa-se, segundo Campos e Teixeira, (2006), que a sintonia feita pelo método imposto por Rovira *et al.* (1969) é mais robusto (isto é, mais suave) que o colocado por Lopez *et al.* (1967), porque originam ganhos proporcionais menores e tempos integrais maiores. Já este quando comparado com o AG proposto apresenta

dados semelhantes quanto aos critérios de desempenho, porém com a necessidade de conhecimento da equação da planta para os cálculos.

O AG, quando se trata de tempo e simulação é de mais fácil elaboração e rápida simulação frente aos demais métodos expostos, segundo também a função objetivo escolhida.

#### 5.4- COMPARAÇÃO ENTRE O AG E AS DEMAIS SINTONIAS

A seguir, na figura 30, o gráfico comparativo entre o AG proposto por este trabalho e os métodos contemplados pelo mesmo. Nota-se que o AG se sobressai frente à maioria dos métodos, utilizando os requisitos de desempenho para a sintonia de controladores PID, que podem ser verificados na tabela 18. Cabe ressaltar novamente que o AG proposto trabalhou como uma técnica heurística de otimização, para os casos de não conhecimento do modelo matemático da planta. E com este fim, ele mostrou-se com bom desempenho, de acordo também com a função objetivo escolhida.

Tabela 18: Comparativo entre os Critérios de desempenho do controlador sintonizado pelos métodos apresentados neste trabalho.

| <b>Método de Sintonia</b>           | <b>Tempo de subida</b> | <b>Sobressinal</b> | <b>Erro de regime permanente</b> | <b>Tempo de Estabilização</b> |
|-------------------------------------|------------------------|--------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| AG proposto novo                    | 4,5 s                  | 2,22%              | 0                                | 9,7 s                         |
| Ziegler e Nichols                   | 20 s                   | 0%                 | 0,137%                           | 22 s                          |
| Cohen e Coon                        | 14 s                   | 15,55%             | Aprox. 0                         | 18 s                          |
| IAE de Lopez <i>et al.</i> (1967)   | 12 s                   | 20%                | Aprox. 0                         | 17 s                          |
| ITAE de Lopez <i>et al.</i> (1967)  | 8 s                    | 8,94%              | 0                                | 9 s                           |
| IAE de Rovira <i>et al.</i> (1969)  | 9 s                    | 0%                 | 0                                | 11 s                          |
| ITAE de Rovira <i>et al.</i> (1969) | 8 s                    | 0%                 | 0                                | 12 s                          |

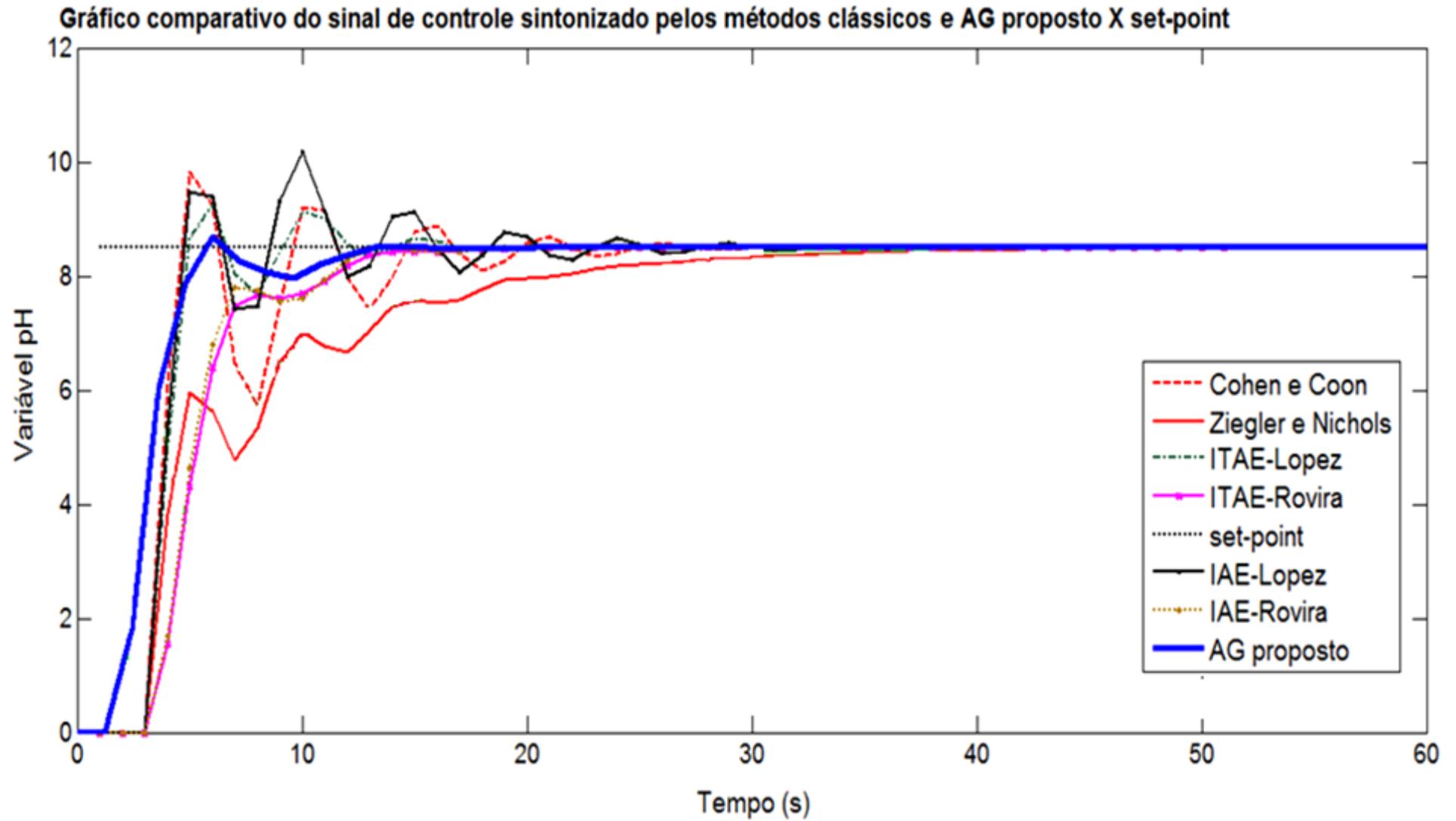


Figura 30: Gráfico comparativo entre o AG proposto neste trabalho e os métodos de sintonia citados.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSÕES

No início deste trabalho foram propostos os seguintes objetivos aqui expostos novamente de forma sucinta:

- Projetar, sintonizar e verificar um controlador PID, utilizando AG's como instrumento de otimização dos valores ótimos das variáveis de decisão, que são os parâmetros de sintonia do controlador, e comparação com os métodos clássicos de sintonia;

- Faz-se necessário também a modelagem da função objetivo do AG, que se aproxime da modelagem real encontrada no processo e transmita uma satisfação quanto aos índices de desempenho;

- Como objetivo intermediário pode-se destacar o domínio do ferramental teórico que será utilizado (AG's e domínio das ferramentas do MatLab™ para uso com AG's).

O presente trabalho de pesquisa conseguiu realizar a síntese em simulação de um controlador PID, para uma função de transferência de 1ª ordem e tempo morto, baseado em AG para otimização dos parâmetros de sintonia. Após isso, comparou-o com os métodos clássicos largamente encontrados na literatura e na indústria, isso quando ela não utiliza seus controladores sintonizados por tentativa-e-erro. A aplicação do AG utilizou um estudo de caso como exemplo, o controle de pH de um reator, que mistura determinado ácido e base, em uma empresa visitada. O estudo cumpriu de maneira satisfatória o que foi proposto.

De acordo com os resultados obtidos, o método de síntese do controlador PID usando AG como otimização, mostrou melhores desempenhos quando comparado com os métodos tradicionais (Ziegler-Nichols, Cohen e Coon, IAE e ITAE de Lopez *et al.* (1967) e Rovira *et al.* (1969)). O gráfico da figura 25 do AG proposto e os resultados da tabela 11 (do mesmo AG) apresentaram resultados satisfatórios da resposta do sistema quando comparados com os métodos clássicos apresentados, quando analisados os critérios de desempenho para controladores PID, de acordo também com o índice de desempenho, ou métrica de erro, traçada para a função objetivo.

A principal contribuição da técnica utilizada pode ser contemplada no regime permanente da resposta do sistema. O AG proposto permite uma rejeição assintótica (total) à perturbação, não obtendo erro de regime permanente, e com máximo de Sobressinal dentro do valor de *benchmark* encontrado na literatura e na indústria. Critérios esses que são sempre almejados pelas indústrias visando suas otimizações de processo, com melhorias nos ganhos e produtividade.

A validação experimental da técnica utilizada é possível a partir da comparação dos resultados com os de outros métodos clássicos, publicados na literatura, apresentando, na maior parte das comparações, melhores valores dos tempos de subida e de estabilização, Sobressinal e erro de regime permanente analisados.

## **6.1- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como trabalhos futuros propõe-se visita a empresas com controle de processos industriais que utilizam controladores PID, para estudo e análise destes controladores, e sintonizá-los com o uso de métodos de otimização, como os AG's.

A aplicação de um Algoritmo Genético Adaptativo (AGA) para a obtenção das variáveis de decisão (parâmetros ou ganhos) do controlador PID para plantas químicas, como exemplo processos com reatores, para uma posterior comparação com os resultados fornecidos pelo AG proposto neste trabalho.

A aplicação de outros métodos heurísticos de otimização para sintonia de controladores PID, como por exemplo, controladores baseados na lógica *Fuzzy*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adhikari, N. P.; Choubey, M.; Singh, R. (2012) Dc Motor Control Using Ziegler Nichols and Genetic Algorithm Technique. *International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering*. v. 1. 33-36.
- Aleixo, G. C. (2014) *Efeito dos óleos essenciais e compostos majoritários sobre endósporos de clostridium botulinum inoculados em mortadela*. Tese (Mestrado em Microbiologia Agrícola) Lavras – MG, Universidade Federal de Lavras. 60p.
- Amaral, J. F. M.; Pacheco, M. A. C.; Tanscheit, R. (2010) Sintonia de Controladores PID Utilizando Algoritmos Genéticos. Rio de Janeiro – RJ. *Revista ICA nº 8*. 12p.
- Andrade, A. L., Souza, L. C. (2010) *Sintonia de controladores PID utilizando algoritmos genéticos*. (Monografia do curso de Engenharia de Controle e Automação), Campos dos Goytacazes – RJ, IFF Campos Campus-Centro. 62p.
- Arruda, L. V. R., Neves-Jr., F., Swiech, M. C. S., Delgado, M. R. (2008) Um método evolucionário para sintonia de controladores PI/PID em processos multivariáveis. *Revista Controle & Automação*. Vol.19, no.1. 17p.
- Åström, K. J., Hägglund, T. (2004) Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control. *Journal of Process Control - Elsevier*. Volume 14, Issue 6: 635-650.
- Borges, S. K. (2011) *Resolução de Timetabling utilizando Algoritmos Genéticos e Evolução Cooperativa*., Tese (Mestrado), Curitiba – PR, UFPR. 104p.
- Burns, R. S. (2001) *Advanced Control Engineering*. 1ª ed. Woburn, MA - EUA: Butterworth-Heinemann. 464p.
- Campestrini, L. (2006) *Sintonia de controladores PID descentralizados baseada no método do ponto crítico*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica). Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 98p.

- Campos, M. C. M. M., Teixeira, H. C. G. (2006) *Controles típicos de equipamentos e processos industriais*. 1ª ed. São Paulo: Edgard Blücher. 415p.
- Campos, R. C. C. (2007) *Projeto e construção de planta piloto de neutralização de pH e proposta de metodologia para incorporação de informações auxiliares na identificação NARX racional*. Tese (Mestrado em Engenharia Industrial) - Cel Fabriciano – MG, Centro Universitário do Leste de Minas Gerais – UnilesteMG. 160p.
- Campos, M. M.; Saito, K. (2004) *Sistemas inteligentes em controle e automação de processos*. 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda. 247p.
- Carvalho, A. S. (2008) *Modelagem de Colunas de Destilação Através de Modelos Auto-Regressivos*. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) - Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, 120p.
- Carmo, M. J., Gomes, F. J. (2008) Avaliação de Desempenho em Malhas Industriais de Controle: uma Necessidade de Inserção nos Currículos e Meios Industriais. *Anais do XI Encontro de Modelagem Computacional*. Volta Redonda - RJ.
- Coelho, L. S., Coelho, A. A. R. (1999) Algoritmos Evolutivos em Identificação e Controle de Processos: Uma Visão Integrada e Perspectivas. *SBA Controle & Automação*. Campinas – SP, Vol. 10 no. 01: 13-30.
- Cortes, J. M. R. (2003). *Um algoritmo genético para solução do problema de localização de atividades econômicas*. Tese (Doutorado em Ciências de Engenharia) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF.
- Chambers, L. D. (ed.) (2001) *The Practical Handbook of Genetic Algorithms*. Boca Raton - Florida, USA: Chapman & Hall/CRC. 2<sup>nd</sup> ed. 521p.

- Czarkowski, D. (2002) *Identification and Optimization PID parameters using MATLAB*. Cork Institute of Technology, Gdynia Maritime University. Poland. 67p.
- Dantas, E. R. M. (2013) *Desenvolvimento de uma toolbox para aplicação de inteligência computacional em sistemas de controle clássico*. Tese (Mestrado em Sistemas de Comunicação e Automação). Mossoró – RN, UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO. 73p.
- Edgar, T. F., Himmelblau, D. M., Lasdon, L. S. (2001) *Optimization of chemical processes*. New York – USA: McGraw-Hill. 2<sup>nd</sup> ed. 667p.
- Faccin, F. (2004) *Abordagem Inovadora no Projeto de Controladores PID*. Tese (Mestrado em Engenharia, área Pesquisa e Desenvolvimento de Processos) Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 145p.
- Duarte Filho, M., Jesus, H. G. C. F. M. de, Cortes, J. M. R., Carvalho, A. S., Paula Júnior, G. G. de. (2013) Controle *Fuzzy* para posicionamento de um pêndulo invertido. *Anais do X Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia – SEGeT*. Resende – RJ: AEDB.
- Ferreira Filho, S. S. (2006) *Processos Físico-Químicos II – PHD 5746 (Aula I: Reatores Homogêneos e Heterogêneos)*. Notas de aula. ESCOLA POLITÉCNICA DA USP, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Disponível em [http://200.144.189.97/phd/default.aspx?id=84&link\\_uc=disciplina](http://200.144.189.97/phd/default.aspx?id=84&link_uc=disciplina). Acessado em 12/03/14.
- Fiorucci, A. R., Soares, M. H. F. B., Cavalheiro, E. T. G. (2001) O Conceito de Solução Tampão. *Revista Conceitos Científicos em Destaque. Química Nova Interativa*. Sociedade Brasileira de Química. Disponível em <http://qnint.sbq.org.br/qni/visualizarConceito.php?idConceito=27>. Acessado em 20/03/14.

- Gaudio, A. C., Zandonade, E. (2001) Proposição, validação e análise dos modelos que correlacionam estrutura química e atividade biológica. *Quim. Nova*, Vol. 24, No. 5: 658-671.
- Goldberg, D. E., Holland, J. H. (1988) Genetic Algorithms and Machine Learning, *Machine Learning* Vol 3, Issue 2-3: 95-99.
- Goldberg, D. E. (1994) Genetic and Evolutionary Algorithms Come of Age. *Communications of the ACM*, vol. 37, no. 3: 113-119.
- Goldschmidt, R. R. (2010) *Uma Introdução à Inteligência Computacional: fundamentos, ferramentas e aplicações*. 1ª. ed. Rio de Janeiro - RJ: IST-Rio. 142p.
- Gomez, A. A., Londoño, M. H., Mejía, A. E. (2008) Uso de algoritmos genéticos en la sintonización de ganancias de un controlador difuso PID. *Scientia Et Technica*. Vol. XIV, núm. 40. 7-12.
- Guimarães, A. O. (2013) *Algoritmo genético aplicado no controle de posição do rotor de um motor de corrente contínua com rejeição a distúrbios por ação feedforward*. Tese (Mestrado em Sistemas de Comunicação e Automação) – Mossoró – RN, UFRN. 72p.
- Holtz, G. C. C. (2005) *Traçado automático de envoltórias de esforços em estruturas planas utilizando um algoritmo evolucionário*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) Rio de Janeiro – RJ, PUC/RJ. 123p.
- Izquierdo, R. C. (2013) *Projeto de formação de células de manufatura através da utilização de algoritmos genéticos*. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica), Porto Alegre – RS, UFRGS. 93p.
- Jeng, J. C., Chen, W. C. (2013) Control strategies for thermal budget and temperature uniformity in spike rapid thermal processing systems. *Computers and Chemical Engineering*. 10p.

- Katayama, R. Kajitani, Y., Kuwata, K., Nishida, Y. (1993) Developing Tools and Methods for Applications Incorporating Neuro, *Fuzzy* and Chaos Technology. *Computers ind. Engng.* Pergamon Press Ltd. Great Britain. Vol. 24, No. 4: 579-592.
- Koza, J. R. (1998) *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. Sixth printing. London, England. A Bradford Book. The MIT Press Cambridge. 609p.
- Lacerda, A. I., Araújo, O. F. Q., Medeiros, José Luiz de. (2004) Estratégia para o controle e otimização Integrada de processos químicos. *Bol. téc. Petrobras*, Rio de Janeiro - RJ, 47 (2/4): 166–192.
- Linden, R. (2008) *Algoritmos Genéticos: Uma Importante Ferramenta da Inteligência Computacional*. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Brasport. 402p.
- Maitelli, A. L., Cavalcanti, A. L. O. (2006) Sintonia de controladores preditivos baseada em algoritmos genéticos Multi-objetivos. *XII CLCA*: 116-120.
- Maitelli, A. L., Fernandes Júnior, F. C., Araújo, F. M., Lopes, J. S. B., Oliveira, L. A. H. G. De. (2005) Implementação de controladores PID utilizando Lógica *fuzzy* e instrumentação industrial. *VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*. São Luís – MA.
- Martínez, R. F. T., Behar, A. A. (2012) Estrategia híbrida AGA-Simplex para la estimación de parámetros de modelos dinámicos a partir de la respuesta al escalón. *Revista Investigacion Operacional*. VOL.33 , NO. 3: 193-209.
- Mejía, J. F. G., Mejía, J. A. G., Estrada, C. Y. G. (2011) Sintonización de controladores PID: Una comparación entre dos algoritmos evolutivos. *M.A. Cruz-Chávez (Ed): CICos*. 5-15.

- Michalewicz, Z. (1996) *Genetic algorithm + data structures = evolution programs*. 3<sup>o</sup> ed. New York – USA, Springer-Verlag. 388p.
- Mitchell, M. (1999) *An Introduction to Genetic Algorithms*. Fifth printing. Cambridge, Massachusetts – England. A Bradford book. 162p.
- Moradi, M. H.; Katebi, M. R.; Johnson, M. A. (2002) MIMO Predictive PID Controls. In: 15<sup>th</sup> *Triennial IFAC World Congress*. Barcelona – Espanha. 6p.
- Morales, C., Lourenço, L., Garcia, C. (2013) Controle preditivo aplicado a uma planta piloto de neutralização de pH. *Anais do X SBAI*. Fortaleza – CE.
- Nishida, P. P. R., Filho, R. H. O., Neto, P. B. F., Marques, V. A. S. Duarte, M. A. V. (2013) Identificação de Fontes Sonoras Via Algoritmos Genéticos. *ACÚSTICA E VIBRAÇÕES No. 45, REVISTA DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA (SOBRAC)*. 45-50.
- Nunes, L. E. N. P.; Rosado, V. O. G.; Grandinetti, F. J. (2003/2004) Ajuste dos parâmetros de um controlador proporcional, integral e derivativo através de algoritmos genéticos. *Revista Ciências Exatas*, Taubaté – SP. vol. 9/10, nº 1-2: 47-52.
- Ogata, K. (2007) *Engenharia de Controle Moderno*. 4. ed, 3<sup>a</sup> reimpressão. São Paulo: Pearson Prentice Hall. 798p.
- Oliveira, S. A. N., Junior, J. D. S., Trindade, M. R. P. (2010) Controle de nível em tanques separadores através de técnica não-lineares: controle *fuzzy* sintonizado via algoritmo genético. *XVIII Congresso Brasileiro de Automática*. Bonito – MS. 2391-2397.
- Paula Júnior, G. G de. (2012) *Otimização Linear I*. Campos dos Goytacazes – RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF. Notas de aula (23/05/12). Mestrado em Engenharia de Produção, UENF/CCT/LEPROD.

- Phillips, C. L., Harbor, R. D. (1997) *Sistemas de Controle e Realimentação*. 1º ed., São Paulo: Makron Books, 574p.
- Pires, A. V. (2007) *Controladores baseados em técnicas de inteligência computacional: Análise, projeto e aplicações*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – UFMG. 139p.
- Prado, T. A. (2009) *Implementação de um controlador PID embarcado para o controle em malha fechada de um estimulador neuromuscular funcional*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica, área Automação). Ilha Solteira – SP, UNESP. 77p.
- Rangel<sup>1</sup>, A. P. O., Rangel<sup>2</sup>, M. P. F. (2014) *Perguntas sobre ganho e tempo morto do reator da empresa visitada por este trabalho*. Entrevista concedida a Moisés Duarte Filho em 23/03/14. (<sup>1</sup>Técnico de Química, Engenheiro de Produção, Especialista em fluidos de Perfuração e Completação em poços de petróleo. Coordenador de Operações, Baker Hugues (Drilling and Completion Fluids); <sup>2</sup>Técnica de Química, Licenciatura em Química, Bacharelado em Farmácia. Técnica de Química de Petróleo Pleno, Transpetro – Petrobrás Transporte S/A)
- Rao, S.S. (2009) *Engineering Optimization: Theory and Practice*. 4ª ed. Hoboken, New Jersey – USA. John Wiley and Sons. 830p.
- Rodríguez, C. S.; Martínez, A. T. A. (2014) Algoritmos Genéticos: una solución para la optimización del Reflector Parabólico. *RIELAC, Vol. XXXV 1*. 1-15.
- Sá, L. L. de, Amorim, R. C. M., (2013) *Identificação e projeto de controladores aplicados em um motor CC*. Monografia (Engenharia Eletrônica). Brasília – DF, UNB. 99p.
- Sharifi, A., Zhao, H., Kandemir, M. (2010) Feedback control for providing QoS in NoC based multicores. Pennsylvania State University, USA. *EDAA*. 978-3-9810801-6-2/DATE10. 1384-1389.

- Sharifzadeh, M., Thornhill, N. F. (2013) Integrated design and control using a dynamic inversely controlled process model. *Computers and Chemical Engineering* 48. 121–134.
- Silva, A. C. R. H. (2013) *Algoritmo genético aplicado ao problema de coordenação hidrotérmica*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica). Rio de Janeiro – RJ, UFRJ-COPPE. 101p.
- Silva, C. C. G. (2008) Aplicação de métodos de otimização para o cálculo do equilíbrio químico e de fases combinados para processos com gás de síntese. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Campinas – SP, UNICAMP. 166p.
- Silva, G. J., Datta, A., Bhattacharyya, S. P. (2005) *PID Controllers for Time-Delay Systems*. Boston - USA: Birkhäuser. 342p.
- Silva, G. S. (2010) *Controle de pH em máquina de produção de Cartão Multicamada*. Tese (Mestrado em Engenharia Química). Curitiba – PR, UFPR. 59p.
- Silva, N. R. S. (2006) *Detecção de dano estrutural por algoritmos genéticos e sensibilidade modal*. Tese (Mestrado em Engenharia). Porto Alegre – RS, UFRGS. 154p.
- Silva, J. C. T. R. (2010) *Estudo de um sistema de resfriamento com ar forçado com monitoramento do consumo de energia elétrica*. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola). Campinas – SP, UNICAMP. 99p.
- Skogestad, S. (2003) Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. *Journal of Process Control* 13. 291–309.
- Souza, S. A. (2008) *Algoritmos Genéticos Aplicados à Proteção e Estimação de Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). São Carlos – SP, USP. 259p.

- Srinivas, M., Patnaik, L. M. (1994) Genetic Algorithms: A Survey. *IEEE Computer*, vol. 27, no. 6: 17-26.
- Swiech, M. C. S. (2005a) *Algoritmos Genéticos para sintonia simultânea de múltiplos controladores em processos de refino*. Tese (Mestrado em Ciência, área Informática Industrial). Curitiba – PR, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 153p.
- Swiech, M. C. S., Oroski, E., Arruda, L. V. R. (2005b) Sintonia de controladores PID em colunas de destilação através de algoritmos genéticos. *3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, IBP*. Salvador – BA.
- Tavakoli, S., Tavakoli, M. (2003) Optimal tuning of PID controllers for first order plus time delay model using dimensional analysis. *The Fourth Int. Conf. on Control and Automation, ICCA*, 10-12 June, Montreal.
- Thomasson, A., Eriksson, L. (2009) Model-Based Throttle Control using Static Compensators and IMC based PID-Design. *IFAC Workshop on Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling*. Paris – France. 7p.
- Teles, M. L., Gomes, H. M. (2010) Comparação de algoritmos genéticos e programação quadrática seqüencial para otimização de problemas em engenharia. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*. n.15: 29-39.
- Tizzo, L. M.; Lopes, L. C. O. (2009) Otimização com multiobjetivos aplicada à sintonia de Controladores preditivos. *VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica*. Uberlândia - MG. 7p.
- Tran, T. H., Ha, Q. P., Nguyen, H. T. (2007) Cascade Sliding Mode-PID Controller for Non-overshoot Time Responses. *NSW*. Austrália. 27-33.
- Wilton, S. R. (2000) Control valves and process variability. *ISA Transactions* 39: 265-271.

Zuben, F.J. V. (2000) *Computação evolutiva: uma abordagem pragmática*. Tutorial: Notas de aula da disciplina IA707, DCA/FEEC/Unicamp. 21p.