



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE
COMUNICAÇÃO E AUTOMAÇÃO**

ÁDLLER DE OLIVEIRA GUIMARÃES

**ALGORITMO GENÉTICO APLICADO NO CONTROLE
DE POSIÇÃO DO ROTOR DE UM MOTOR DE
CORRENTE CONTÍNUA COM REJEIÇÃO A
DISTÚRBIOS POR AÇÃO *FEEDFORWARD***

**MOSSORÓ – RN
2013**

ÁDLLER DE OLIVEIRA GUIMARÃES

**ALGORITMO GENÉTICO APLICADO NO CONTROLE
DE POSIÇÃO DO ROTOR DE UM MOTOR DE
CORRENTE CONTÍNUA COM REJEIÇÃO A
DISTÚRBIOS POR AÇÃO *FEEDFORWARD***

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação – PPGSCA, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Orientador: Prof. Dr. José Patrocínio da Silva –
UFRN

**MOSSORÓ – RN
2013**

ÁDLLER DE OLIVEIRA GUIMARÃES

**ALGORITMO GENÉTICO APLICADO NO CONTROLE
DE POSIÇÃO DO ROTOR DE UM MOTOR DE
CORRENTE CONTÍNUA COM REJEIÇÃO A
DISTÚRBIOS POR AÇÃO *FEEDFORWARD***

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação – PPGSCA, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

APROVADA EM: 27 / 12 / 2013.

BANCA EXAMINADORA



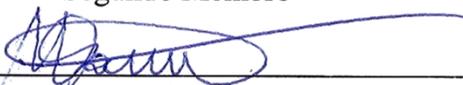
Prof. Dr. José Patrocínio da Silva – UFRN
Presidente



Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior – UFERSA
Primeiro Membro



Prof. Dr. Elmer Rolando Llanos Villarreal – UFERSA
Segundo Membro



Prof. Dr. Moisés Dantas dos Santos – UFPB
Examinador Externo

Mossoró, 27 de dezembro de 2013.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência

G963a Guimarães, Ádller de Oliveira.

Algoritmo genético aplicado no controle de posição do rotor de um motor de corrente contínua com rejeição a distúrbios por ação feedforward . / Ádller de Oliveira Guimarães. -- Mossoró, 2013.

72f.: il.

Orientador: Prof. Dr. José Patrocínio da Silva

Dissertação (Mestrado em Sistemas de Comunicação e Automação) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Pró-Reitoria de Pós-Graduação.

1. Inteligência computacional. 2. Algoritmo genético. 3. Motor de corrente contínua. 4. Controlador PID. I. Título.

RN/UFERSA/BCOT /038-13

CDD: 006.3

Bibliotecária: Vanessa Christiane Alves de Souza Borba
CRB-15/452

DEDICATÓRIA

Aos meus pais José e Gorete, e ao meu
irmão Anderson.

AGRADECIMENTOS

À Deus, o qual sempre me iluminou nos momentos difíceis de todas as etapas do mestrado, proporcionando saúde e força para vencer os desafios nessa nova fase da vida acadêmica.

Aos meus pais José Linhares e Maria Gorete, e ao meu irmão Anderson de Oliveira, sem os quais eu não teria adquirido a educação necessária à base de minha formação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Patrocínio da Silva, pela disponibilidade sempre que solicitado, pela credibilidade depositada ao trabalho e, principalmente, pelos ensinamentos necessários à conclusão do mesmo.

Ao Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior pelos ensinamentos e confiança depositada em meu potencial desde a graduação em Engenharia de Energia. Como também, agradeço à Profa. Dra. Danielle Simone da Silva Casillo pelas sugestões dadas no exame de qualificação, necessários à melhoria da qualidade do trabalho.

À minha namorada Janyne, que sempre se mostrou presente e paciente durante os momentos de glórias e dificuldades vividos ao longo de toda trajetória da minha vida acadêmica.

À minha tia Fátima, em nome da qual eu agradeço a todos os membros da minha família que direta ou indiretamente me ajudaram nesses anos de estudos em Mossoró.

Aos demais professores e, em especial, à secretária Lívia do PPGSCA, os quais sempre se mostraram atenciosos e disponíveis e ajudar os mestrados em suas dificuldades.

Aos amigos e colegas do GEDEA, por meio dos quais me foi mostrado que através da união conseguimos alcançar todos os objetivos.

Ao apoio estrutural da UFRSA e UFRN, e suporte financeiro da CAPES e FAPERN.

EPÍGRAFE

“Tudo tem o seu tempo determinado, e há
tempo para todo propósito debaixo do céu.”
(Eclesiastes 11, 1-2)

RESUMO

A versatilidade das máquinas de corrente contínua, combinada com a relativa simplicidade dos seus respectivos sistemas de acionamento, assegura a sua contínua utilização numa ampla variedade de aplicações em sistemas elétricos industriais, mais especificamente, em aplicações que exigem uma vasta gama de controle da velocidade e posição do rotor. Neste trabalho, um novo método de sintonia de controladores Proporcional-Integral-Derivativo (PID) com rejeição a distúrbios usando Algoritmo Genético (AG) é proposto. Os ganhos proporcional, integral e derivativo, projetados para controlar a posição do rotor do motor CC, são otimizados utilizando AG em conjunto com a técnica de Ziegler-Nichols, e a rejeição a distúrbios é obtida a partir da implementação no algoritmo do controle por ação *Feedforward*. Resultados preliminares mostram que o AG proposto, apresentou desempenho satisfatório da resposta, tanto em regime transitório quanto no estado estacionário, além de apresentar boa performance na rejeição a distúrbios. Para validar a técnica utilizada, os resultados obtidos foram comparados com outros métodos publicados na literatura.

Palavras-Chave: Inteligência Computacional, Algoritmo Genético, Motor de Corrente Contínua e Controlador PID.

ABSTRACT

The versatility of direct current machines combined with the relative simplicity of their drive systems ensures its continued use in a wide variety of applications in industrial electrical systems, more specifically in applications that requiring a wide range of speed and position control of the rotor. In this work, a new method for tuning Proportional-Integral-Derivative (PID) controllers with disturbance rejection using Genetic Algorithm (GA) is proposed. The proportional, integral and derivative gains, designed to control the rotor position of DC motor are optimized using GA in group with Ziegler - Nichols technique, and the rejection of disturbances is obtained from the implementation of feedforward control in the algorithm. Preliminary results show that the proposed GA gave a satisfactory response, both in transitional regime as at steady state, and shows good performance in disturbance rejection. To validate this technique, the results obtained were compared with other methods in literature.

Keywords: Computational Intelligence, Genetic Algorithm, Direct Current Motor and PID Controller.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xv
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	18
1.1 MOTIVAÇÃO	19
1.2 OBJETIVOS	20
1.3 METODOLOGIA	20
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA	22
2.1.1 Modelagem Matemática	24
2.1.2 Função de Transferência	25
2.2 SISTEMAS DE CONTROLE.....	26
2.2.1 Controle em malha aberta	26
2.2.2 Controle em malha fechada	27
2.2.3 Desempenho de sistemas realimentados (<i>feedback</i>)	28
2.2.3.1 Resposta em regime transitório	28
2.2.3.2 Resposta em regime permanente.....	29
2.2.4 Rejeição a Distúrbios	30
2.3 CONTROLADOR PROPORCIONAL - INTEGRAL - DERIVATIVO.....	34
2.3.1 Ação Proporcional	35
2.3.2 Ação Integral	35
2.3.3 Ação Derivativa	36
2.4 MÉTODOS DE SINTONIA DE ZIEGLER - NICHOLS.....	37
2.4.1 1º Método	37
2.4.2 2º Método	38

2.5 INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL	40
2.5.1 Classificação da IC.....	41
2.5.2 Algoritmos Genéticos.....	42
2.5.2.1 Representação das soluções.....	45
2.5.2.2 Inicialização e Tamanho da População	45
2.5.2.3 Função de Avaliação	46
2.5.2.4 Operadores Genéticos de Seleção	47
2.5.2.5 Operador de Cruzamento.....	49
2.5.2.6 Operador de Mutação	51
2.6 TRABALHOS RELACIONADOS.....	51
CAPÍTULO 3 - ALGORITMO PROPOSTO	53
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	53
3.2 ALGORITMO GENÉTICO PROPOSTO	56
3.3 DEFINIÇÃO DO INTERVALO DE BUSCA PARA OS GANHOS DOS CONTROLADORES	59
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros do controlador PID referente ao 1º Método de Ziegler-Nichols	38
Tabela 2 - Parâmetros do controlador PID referente ao 2º Método de Ziegler-Nichols	39
Tabela 3 - Analogia entre os vocabulários do AG com um problema computacional ...	44
Tabela 4 - Parâmetros do motor CC	55
Tabela 5 - Parâmetros do Algoritmo Genético proposto	58
Tabela 6 - Critério de estabilidade de Routh	60
Tabela 7 - Comparação entre os resultados	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo do circuito elétrico do motor CC	23
Figura 2 - Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha aberta	27
Figura 3 - Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada.....	27
Figura 4 - Desempenho dos sistemas realimentados	28
Figura 5 - Diagrama de blocos simplificado de um sistema de malha fechada.....	29
Figura 6 - Sistema realimentado (controle <i>feedback</i>).....	30
Figura 7 - Comportamento da resposta do sistema com rejeição parcial da perturbação	31
Figura 8 - Comportamento da resposta do sistema com rejeição assintótica à perturbação	31
Figura 9 - Esquema de ação de controle <i>feedforward</i>	32
Figura 10 - Esquema de ação de controle <i>feedforward</i> em conjunto com controle <i>feedback</i>	33
Figura 11 - Diagrama de blocos de um controle PID	34
Figura 12 - Resposta do sistema em malha aberta.....	37
Figura 13 - Sistema a malha fechada com controlador proporcional	38
Figura 14 - Oscilação mantida com período crítico P_{cr}	39
Figura 15 - Inteligência computacional-Taxonomia	41
Figura 16 - Esboço básico de execução dos algoritmos genéticos	44
Figura 17 - Representação das soluções em (a) números binários e (b) números inteiros	45
Figura 18 - Gráfico de probabilidade de seleção por meio da roleta proporcional	48
Figura 19 - Gráfico de probabilidade de seleção por meio da roleta ponderada	48
Figura 20 - Cruzamento com ponto de corte único	50
Figura 21 - Cruzamento com ponto de corte duplo	50
Figura 22 - Cruzamento com pontos aleatórios.....	50
Figura 23 - Mutação em (a) apenas um ponto do cromossomo (b) cromossomo completo	51
Figura 24 - Diagrama de blocos do sistema proposto para este trabalho	54
Figura 25 - Representação do sistema de controle a ser projetado.....	55
Figura 26 - Fluxograma do Algoritmo Genético proposto neste trabalho.....	56

Figura 27 - Resposta do sistema à entrada ao degrau unitário sem controlador	59
Figura 28 - Diagrama de blocos do sistema com controle proporcional	60
Figura 29 - Resposta à entrada degrau unitário (V_r) do sistema controlado pelo PID ajustado através da técnica de Ziegler-Nichols	63
Figura 30 - Resposta à entrada degrau unitário (V_r) do sistema controlado pelo PID ajustado através da técnica do Algoritmo Genético proposto	63
Figura 31 - Resposta à entrada ao degrau unitário (D) referente ao Distúrbio.....	65
Figura 32 - Resposta às entradas ao degrau unitário (V_r+D) a partir dos ajustes obtidos do AG proposto neste trabalho	65
Figura 33 - Resposta às entradas ao degrau unitário (V_r+D) a partir dos ajustes obtidos do AG proposto por Bindu <i>et al</i> (2012).....	66
Figura 34 - Resposta às entradas ao degrau unitário (V_r+D) a partir dos ajustes obtidos do AG proposto por Neenu e Pongodi (2009).....	66

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AG	Algoritmo Genético
AGs	Algoritmos Genéticos
B	Coefficiente de Amortecimento
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
DC	Corrente Contínua, do inglês <i>Direct Current</i>
EE	Estratégias Evolutivas
e_a	Força Contra-Eletromotriz
$e(t)$	Sinal de Erro
f_i	Valor de <i>fitness</i>
GACTION	<i>Genetic Algorithm Control Tool</i>
$G_c(s)$	Função de Transferência do Controlador <i>Feedback</i>
$G_{c1}(s)$	Função de Transferência do Controlador <i>Feedback</i>
$G_{c2}(s)$	Função de Transferência do Controlador <i>Feedforward</i>
$G_d(s)$	Função de Transferência do Distúrbio
$G_f(s)$	Função de Transferência do Controlador <i>Feedforward</i>
$G_p(s)$	Função de Transferência da Planta
$H(s)$	Função de Transferência de Realimentação
IA	Inteligência Artificial
i_a	Corrente de Armadura
IAE	Integral do Erro Absoluto, do inglês <i>Integral of Absolute Error</i>
IC	Inteligência Computacional
i_e	Corrente de Excitação
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ISE	Integral do Erro ao Quadrado, do inglês <i>Integral of Squared Error</i>
ITAE	Integral do Erro Absoluto ponderado no Tempo, do inglês <i>Integral of Time multiply Absolute Error</i>
ITSE	Integral do Erro ao Quadrado vezes o Tempo, do inglês <i>Integral of Time Multiply Squared Error</i>
J_m	Momento de Inércia

k	Número de Bits
K_b	Constante da Força Eletromotriz
K_{cr}	Ganho Crítico
K_d	Ganho Derivativo
K_i	Ganho Integral
K_p	Ganho Proporcional
K_1	Constante de Proporcionalidade Eletromecânica
K_2	Constante de Proporcionalidade Eletromecânica
L	Atraso de Transporte
L_a	Indutância de Armadura
L_e	Indutância de Excitação
MATLAB	<i>MATrix LABoratory</i>
M_s	Máximo sobressinal
N	Número de indivíduos
N_{pop}	Número de Populações
P_c	Probabilidade de Cruzamento
P_{cr}	Período Crítico
PE	Programação Evolutiva
P_i	Probabilidade de um Indivíduo ser Selecionado
P_m	Probabilidade de Mutação
PID	Proporcional Integral e Derivativo
PPGSCA	Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação
r_a	Resistência Elétrica de armadura
r_e	Resistência Elétrica de excitação
$r(t)$	Sinal de Referência
T	Constante de Tempo
T_e	Torque Eletromagnético
T_s	Tempo de Subida
T_a	Tempo de Acomodação
T_c	Torque da Carga
T_d	Tempo Derivativo
T_i	Tempo Integrativo

UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
$u(t)$	Sinal de Controle
v_a	Tensão de Armadura
v_e	Tensão de Excitação
V_r	Valor de tensão de referência
X_c	Número Inteiro Correspondente ao Binário
X_{inf}	Valor mínimo do Intervalo de Busca
X_{Real}	Valor Real Decodificado
X_{sup}	Valor máximo do Intervalo de Busca
$y(t)$	Sinal de Saída
$y(\infty)$	Sinal de Referência
ZN	Ziegler-Nichols
λ_a	Fluxo de Armadura
λ_e	Fluxo de Excitação
θ	Posição do Rotor do Motor
ω	Frequência de Oscilação Sustentada
ω_r	Velocidade Angular

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A busca por novos modelos de sistemas controláveis para aplicações em máquinas de corrente contínua (CC), tem atraído o interesse de um grande número de pesquisadores da área de sistemas inteligentes nos últimos anos, sobretudo em aplicações que requerem o controle ajustável da velocidade e posição do rotor para estes tipos de máquinas elétricas (NEENU e POONGODI, 2009). Nesse contexto, novas aplicações tecnológicas têm sido utilizadas em sistemas de acionamento em corrente alternada buscando, de maneira suficiente, a substituição das máquinas de corrente contínua em algumas aplicações específicas. Entretanto, a versatilidade das máquinas CC, combinada com a relativa simplicidade dos seus sistemas de acionamento, assegura a sua contínua utilização numa ampla variedade de aplicações (FITZGERALD *et al*, 2006).

Dentre os vários tipos de controladores aplicados aos motores CC, destaca-se o Proporcional-Integral-Derivativo (PID), o qual é amplamente utilizado como tecnologia da base de controle industrial (DORF e BISHOP, 2009; MELOTTI *et al*, 2008). Tal afirmação é justificada pela facilidade de execução e versatilidade tanto do ponto de vista analógico quanto digital, proporcionando resultados satisfatórios, mesmo para variações consideráveis nas características do processo (MELOTTI *et al*, 2008). No entanto, o principal desafio relacionado aos controladores PID na indústria é a sintonia adequada de seus ganhos necessários para produzir uma resposta satisfatória do sistema, sobretudo no que se refere à garantia de rejeição de distúrbios (ou perturbações) que possa vir a ser submetido o sistema controlado. Este último merece destaque tendo em vista que, se não controlado, tanto pode levar um equipamento ao funcionamento inadequado (por meio de perda de sincronismo, perda de torque etc.) quanto danificá-lo, afetando a produção industrial e a qualidade do produto (PIMENTA, 2010).

Os métodos de sintonia tradicionais, os quais são baseados em técnicas heurísticas, tais como: Diagramas de resposta em frequência, lugar das raízes e Ziegler-Nichols (ZN), geralmente não atingem níveis desejados de eficiência e são dependentes do conhecimento do processo por parte do projetista para um posterior ajuste fino dos ganhos (BINDU *et al*, 2012; NETO e GOMES, 2010). Dessa forma, a busca por procedimentos mais elaborados tem conduzido, continuamente, à ascensão da

Inteligência Computacional (IC), a qual como o próprio nome sugere, utiliza técnicas computacionais de forma inteligente visando simular o comportamento humano.

A expansão das aplicações da IC na área de controle pode ser confirmada a partir de sua utilização em recentes trabalhos acadêmicos, os quais se utilizam das técnicas de lógica nebulosa, redes neurais e principalmente algoritmos genéticos (AGs) (LI *et al*, 2010; SANTOS, *et al*, 2011). Esta última, técnica objeto deste estudo, é um algoritmo de busca e otimização, inspirado 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). Recentemente os AGs têm sido aplicados em diversos segmentos da Engenharia Elétrica, dentre os quais vale destacar aplicações em robótica (especificamente no planejamento de caminhos) e em máquinas elétricas (no controle de posição de motores CC) (PEREIRA, 2012; ADHIKARI *et al*, 2012; NEENU e PONGODI, 2010).

Neste último grupo de aplicações dos AGs, cuja ênfase está no controle de posição do rotor de motores de corrente contínua, a ideia principal desta proposta de dissertação é criar um Algoritmo Genético (AG) que projete um controlador PID para otimizar os parâmetros de resposta (como máximo sobressinal e tempo de acomodação), e consecutivamente projete um compensador que possibilite a rejeição de distúrbios (ou perturbações).

1.1 MOTIVAÇÃO

Dentro da área de Inteligência Computacional, existe um grande interesse tanto na análise de novas aplicações em controle quanto na otimização das aplicações existentes, sempre buscando por respostas rápidas e com sobressinais reduzidos para os sistemas controlados. Nesse contexto, é importante destacar que este trabalho caracteriza-se, por sua aplicabilidade na otimização dos parâmetros de resposta através do AG, com o diferencial de possibilitar a compensação de distúrbios que poderiam vir a comprometer o funcionamento da máquina CC e, conseqüentemente, a produção industrial e a qualidade do produto.

O desenvolvimento de aplicações deste porte, tendo em vista o uso dessa importante área da inteligência computacional, representa uma etapa imprescindível

para o desenvolvimento de novas tecnologias na região, podendo resultar a médio e longo prazo em aplicações experimentais de alto nível para o meio industrial, além de servir como base para futuras pesquisas na área de Qualidade de energia. Por fim, espera-se, com este trabalho, abrir portas ou pelo menos ideias para novas pesquisas dentro do estudo dos AGs e suas aplicações no PPGSCA/UFERSA.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é aplicar a técnica de inteligência computacional baseada em AG para obter os ganhos proporcional, integral e derivativo de controladores para o controle de posição do rotor de um motor de corrente contínua, visando à busca por tempos de reposta e sobressinal mínimos.

Dentro desta perspectiva, os objetivos específicos deste trabalho são:

- Desenvolver um AG que busque ganhos proporcional, integral e derivativo aplicado a uma planta de um motor CC.
- Obter intervalos de busca para os ganhos que possam otimizar a performance do Algoritmo Genético.
- Propor a implementação no AG de uma configuração para o sistema de controle que possibilite a rejeição de distúrbios.

1.3 METODOLOGIA

Para o alcance dos objetivos específicos estabelecidos para este trabalho, as seguintes atividades foram realizadas:

- Familiarização com as metodologias utilizadas na construção de AGs aplicados à sintonia de controladores PID.
- Utilizar os métodos de sintonia tradicionais de Ziegler-Nichols (ZN) para a obtenção do intervalo de busca inicial a ser utilizado para os ganhos do controlador PID.

- Projetar um compensador que possibilite a rejeição de distúrbios, a partir da implementação do método de controle com ação à frente (do inglês *Feedforward*) no AG proposto.
- Trabalhar com uma nova função de aptidão (do inglês *fitness*) que permita a convergência do AG para valores ótimos de resposta, com ou sem a presença de distúrbios.
- Validar teoricamente os resultados obtidos a partir do AG proposto neste trabalho, frente aos resultados de outros métodos publicados na literatura.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 1 deste trabalho é descrita de forma introdutória a caracterização do problema a ser explorado pelo trabalho e os métodos propostos para solução do mesmo. No Capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos e definições da aplicação em motores CC e dos métodos de controle clássico, com ênfase na utilização de Algoritmos Genéticos na sintonia de controlador PID. No Capítulo 3 é apresentado o detalhamento do AG proposto e a execução dos métodos tradicionais de controle utilizando Ziegler-Nichols. No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados das simulações. Por fim, no Capítulo 5 são levantadas as considerações finais sobre a pesquisa e os resultados encontrados, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo abordará conceitos fundamentais ao desenvolvimento do trabalho. A Seção 2.1 apresenta a descrição e modelagem matemática do motor de corrente contínua. Na Seção 2.2 são mostradas as principais características dos sistemas de controle. Na Seção 2.3 são discutidos os conceitos e formulação básica para o controlador PID. Na Seção 2.4 é abordado o método tradicional de sintonia PID de ZN. Na Seção 2.5 é introduzida e classificada a Inteligência Computacional com ênfase na a estrutura de execução dos AGs. Finalmente, na Seção 2.6 é feita uma discussão dos trabalhos mais recentes relacionados à sintonia PID por meio de inteligência computacional com abordagem em AGs.

2.1 MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA

A máquina CC é um conversor de energia eletromecânica que recebe eletricidade na forma de corrente contínua e, posteriormente converte em energia mecânica de rotação. Esse tipo de máquina é basicamente constituída pelas seguintes partes (FITZGERALD *et al*, 2006):

- Armadura ou Rotor: É o elemento rotativo da máquina CC, cujas bobinas são alimentadas por corrente contínua e produzem o campo magnético que irá reagir com o campo magnético do estator, criando torque e movimento.
- Estator: É o nome atribuído à parte fixa do motor, que pode conter um ou mais enrolamentos por pólo, alimentados por corrente contínua e fornecendo campo magnético fixo.
- Comutador: Situado sobre o eixo do rotor, o comutador tem como função inverter o sentido da corrente na armadura, para produzir um torque que a mantenha girando em um sentido constante.
- Escovas: São responsáveis pelo contato elétrico da parte fixa do motor com a parte rotativa (armadura). Ou seja, a energia fornecida para a armadura por uma fonte de tensão CC externa é levada aos segmentos do comutador através

das escovas. Vale salientar que existem máquinas que dispensam o uso de escovas (do inglês *Brushless*).

O modelo do motor CC foi desenvolvido a partir da análise de: um circuito magnético estacionário (estator ou campo) alimentado por uma fonte de tensão CC de potência desprezível, e um circuito magnético rotativo (rotor ou induzido) alimentado por uma fonte de tensão CC (DORF e BISHOP, 2009). A Figura 1 ilustra o modelo do circuito elétrico equivalente para o motor CC analisado nesse trabalho.

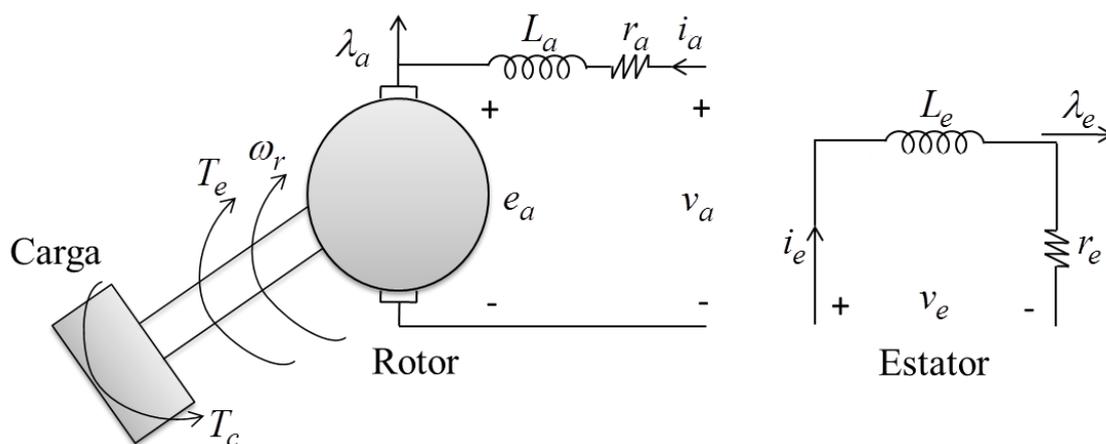


Figura 1 - Modelo do circuito elétrico do motor CC

Fonte: Adaptado de Dorf e Birshop (2009).

Onde:

i_a/i_e : Corrente de Armadura [A] / Excitação [A]

v_a/v_e : Tensão de Armadura [V] / Excitação [V]

r_a/r_e : Resistência de Armadura [Ω] / Excitação [Ω]

L_a/L_e : Indutância de Armadura [H] / Excitação [H]

e_a : Força Contra-eletromotriz [V]

λ_a/λ_e : Fluxo de Armadura [Wb] / Excitação [Wb]

T_e/T_c : Torque Eletromagnético [Nm] / Carga [Nm]

ω_r : Velocidade Angular [rad/s]

A tensão de entrada v_e é aplicada ao enrolamento de campo (estator), o qual possui uma resistência r_e e indutância L_e . A corrente de armadura i_a fornecida é mantida constante e, portanto, o eixo do motor é controlado pela tensão de entrada. Dessa forma,

a corrente do campo i_e produz um fluxo na máquina que, por sua vez, introduz um binário no eixo do motor.

2.1.1 Modelagem Matemática

Conforme descrito por Ogata (1997), o modelo matemático do motor de corrente contínua tem como ponto de partida a aplicação da lei das malhas de Kirchhoff ao circuito de armadura da Figura 1.

$$v_a = r_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (1)$$

A Equação para o movimento do motor pode ser assim descrita:

$$T = J_m \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r \quad (2)$$

Onde J_m é o momento de inércia do rotor [Kg-m²/rad]; e B é o coeficiente de amortecimento [N-m/rad/s].

As relações eletromecânicas estabelecidas para um motor CC são as seguintes:

$$T_e = K_1 i_a \quad (3)$$

$$e_a = K_2 \omega_r \quad (4)$$

Onde T_e é o torque eletromagnético [Nm], K_1 e K_2 representam constantes de proporcionalidade eletromecânicas, e ω_r é a velocidade angular do eixo [rad/s].

As Equações (3) e (4) indicam, respectivamente, que o torque (ou conjugado) T_e aplicado sobre o eixo do rotor é diretamente proporcional à corrente do circuito da armadura i_a , e a velocidade angular do rotor ω_r é diretamente proporcional à tensão aplicada ao motor, e_a . Dessa forma, as equações elétrica e mecânica são dadas, respectivamente, por:

$$L_a \frac{di_a}{dt} + r_a i_a = v_a - K_2 \omega_r \quad (5)$$

$$J_m \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r = K_1 i_a \quad (6)$$

A expressão que relaciona a entrada elétrica padrão do circuito, a tensão v_a , e a saída mecânica do circuito, ou seja, a posição do eixo do rotor do motor, θ , é obtida da seguinte forma:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_r \quad (7)$$

Aplicando (7) às Equações (5) e (6) pode-se obter as seguintes Equações:

$$J_m \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} = K_1 i_a \quad (8)$$

$$L_a \frac{di_a}{dt} + r_a i_a = v_a - K_2 \frac{d\theta}{dt} \quad (9)$$

Vale ressaltar que as Equações (8) e (9) representam a interação eletromecânica existente no interior do motor CC. De forma que, para fins de simplificação da modelagem, devem-se considerar as constantes de proporcionalidade eletromecânicas como sendo iguais, ou seja: $K_1=K_2=K_b$ (onde K_b é a constante da força eletromotriz [Vs/rad]). Esta consideração não causa grandes modificações no sistema uma vez que, durante o projeto de construção do motor, essa característica pode ser moldada.

2.1.2 Função de Transferência

De acordo com Ogata (1997) a função de transferência que relaciona a tensão na entrada fornecida pela fonte com a posição do rotor na saída mecânica do sistema é obtida a partir da aplicação da Transformada de Laplace às Equações (8) e (9), considerando que antes de a fonte ser ligada não havia qualquer forma de energia acumulada no sistema (condições iniciais nulas).

$$J_m s^2 \theta(s) + B s \theta(s) = K_b I(s) \quad (10)$$

$$L_a s I(s) + R_a I(s) = V(s) - K_b s \theta(s) \quad (11)$$

As Equações (10) e (11) encontram-se no domínio da frequência, onde estão na forma puramente algébrica. Sendo assim (10) é substituída em (11), resultando em:

$$\left[\frac{J_m s^2 \theta(s) + B s \theta(s)}{K_b} \right] (L_a s + R_a) = V(s) - K_b s \theta(s) \quad (12)$$

$$\left[\frac{(J_m s^2 + Bs)(L_a s + R_a)}{K_b} + K_b s \right] \theta(s) = V(s) \quad (13)$$

Por fim, a simplificação algébrica da Equação (13) permite a obtenção da função de transferência a qual se objetiva.

$$\frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{K_b}{J_m L_a s^3 + (R_a J_m + B L_a) s^2 + (K_b^2 + R_a B) s} \quad (14)$$

Vale salientar que, a partir da função de transferência obtida, pode-se realizar uma análise qualitativa e quantitativa da resposta do motor em termos de um sinal degrau aplicado à entrada de tensão, ou seja, a fonte. Dessa forma, espera-se que a posição do motor responda de maneira semelhante ao sinal, entretanto, como será observado, para as especificações das constantes da Equação (14) tal fato não ocorre, restando ao sistema de controle realizar os ajustes necessários.

2.2 SISTEMAS DE CONTROLE

Os sistemas de controle, de modo geral, objetivam manter um sinal de saída em um comportamento pré-especificado a partir da aplicação de sinais adequados na entrada de controle, além de buscar a minimização ou eliminação total dos efeitos causados pela ação de 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 malha aberta ou em malha fechada (OGATA, 2010).

2.2.1 Controle em malha aberta

O controle em malha aberta ocorre a partir da aplicação de um sinal de controle $u(t)$ predefinido, de forma que a variável controlada $y(t)$ (sinal de saída) apresente um determinado comportamento ou valor, sem que seja feita medição do sinal de saída, conforme Figura 2.

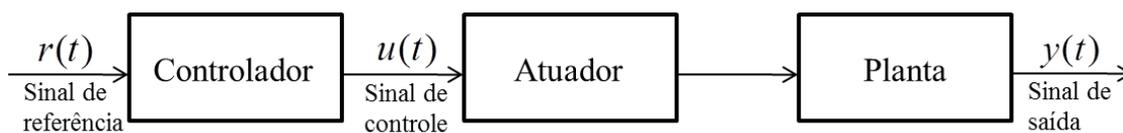


Figura 2 - Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha aberta

Fonte: Adaptado de Ogata (2010).

Apesar desse tipo de sistema ser, em geral, simples e barato, pelo fato de não necessitar de equipamentos de medição e/ou determinação de sinal de controle, o controle em malha aberta apresenta a desvantagem de não se adaptar a variações externas (perturbações) (BAZANELLA e SILVA, 2005).

2.2.2 Controle em malha fechada

No controle em malha fechada, o sinal de saída $y(t)$ é utilizado como base para a definição do sinal de controle $u(t)$ que deve ser aplicado ao processo a cada instante de tempo, conforme apresentado na Figura 3. O sinal de saída é medido através de um sensor (responsável pela conversão da grandeza física a ser controlada em um sinal elétrico), e consecutivamente é comparado com um sinal de referência $r(t)$, de modo que a diferença entre os dois sinais, definido por sinal de erro $e(t)$, é determinante para a definição do sinal de controle que deve ser aplicado ao processo para corrigir o desvio entre os sinais $r(t)$ e $y(t)$ (OGATA, 2010).

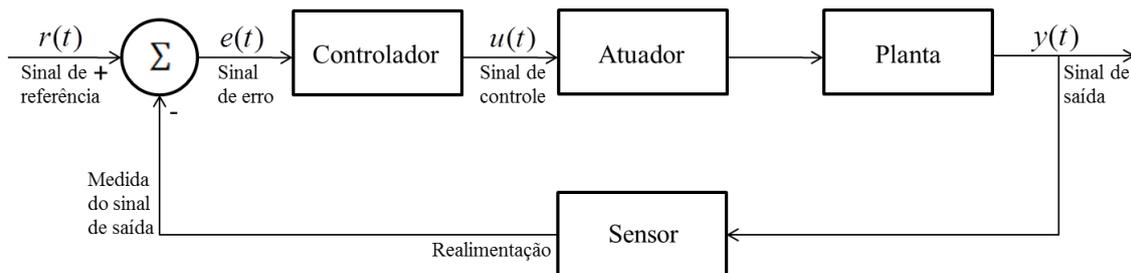


Figura 3 - Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada

Fonte: Adaptado de Ogata (2010).

Vale salientar que, o processo mencionado de medição do sinal de saída e posterior comparação com o de referência é denominado de realimentação (do inglês *Feedback*). Já ao dispositivo que capta o sinal de erro para gerar o sinal de controle a ser aplicado na planta dá-se o nome de controlador ou compensador. Por fim, o atuador se

faz necessário nesse sistema pelo fato de possibilitar a conversão do sinal elétrico advindo do controlador na grandeza física de entrada da planta (ou processo) (BAZANELLA e SILVA, 2005).

2.2.3 Desempenho de sistemas realimentados (*feedback*)

A análise do desempenho de um sistema de controle pode ser realizada a partir da resposta temporal do sistema submetido a uma determinada entrada. Sendo assim, as especificações de desempenho, para efeito comparativo entre sistemas, podem ser definidas em função da resposta a entradas padrão, tais como degrau e rampa unitários. A resposta de um sistema estável à aplicação de uma determinada entrada padrão se divide em duas etapas: a resposta em regime transitório e a resposta em regime permanente (OGATA, 2010).

2.2.3.1 Resposta em regime transitório

O desempenho da resposta em regime transitório é analisado, comumente, por meio da resposta temporal do sistema a uma entrada tipo degrau, conforme Figura 4, a qual exemplifica resposta de um sistema a um degrau unitário (referência constante).

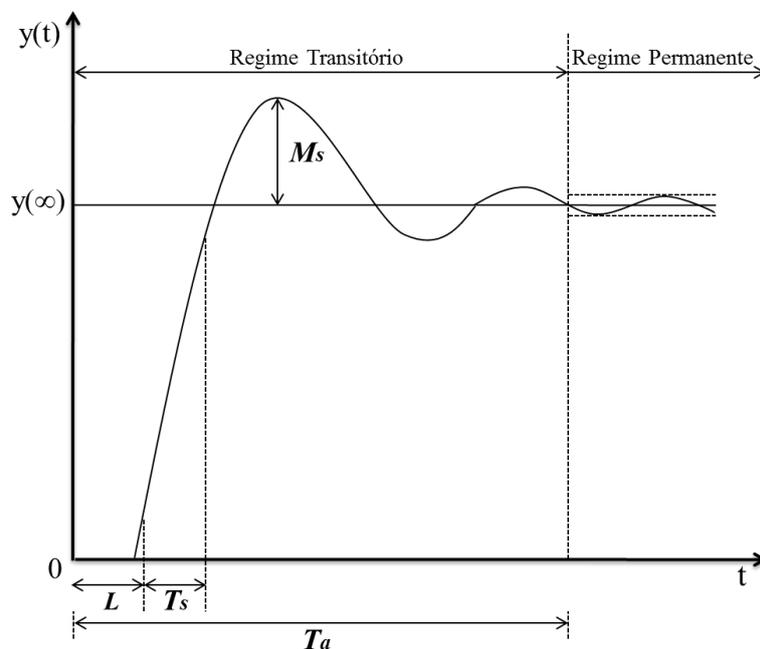


Figura 4 - Desempenho dos sistemas realimentados

Fonte: Adaptado de Bazanella e Silva (2005).

De acordo com Ogata (2010), as grandezas que representam o desempenho de um sistema, mostradas no gráfico da Figura 4, são definidas como:

- Máximo Sobressinal (M_s): É a máxima diferença entre a saída $y(t)$ e a referência $y(\infty)$ durante o regime transitório.
- Tempo de subida (T_s): É o tempo que a resposta percorre de 10% a 90% de seu valor final.
- Tempo de acomodação (T_a): É o tempo a partir do qual a resposta permanece dentro de uma faixa percentual de 2% ou 5% em torno do valor de regime permanente.
- Atraso de transporte (L): É o tempo transcorrido para que o sinal de entrada seja efetivamente observado na variável do processo, ou seja, durante esse tempo a saída do processo permanece inalterada.

2.2.3.2 Resposta em regime permanente

O desempenho da resposta em regime permanente é medido sob dois critérios: a capacidade do sistema de seguir sinais de referência padrões (degrau, rampa, parábola) e de rejeitar assintoticamente sinais de perturbação padrões. Dessa forma, o teorema do valor final (ferramenta matemática utilizada na análise de regime permanente) define que, se $T(s)$ (função de transferência) e $r(s)$ (entrada aplicada ao sistema), Figura 5, possuem todos os pólos com parte real não positiva, então o valor de saída $y(s)$ do sistema para $t \rightarrow \infty$ (valor da saída em regime permanente) é dado por: (HAYKIN e VEEN, 2001; GEROMEL e PALHARES, 2004).

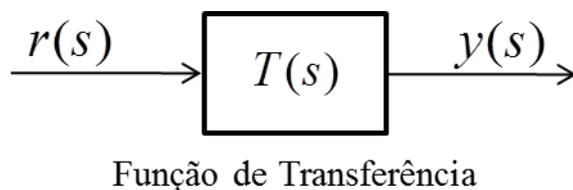


Figura 5 - Diagrama de blocos simplificado de um sistema de malha fechada

Fonte: Adaptado de Ogata (2010).

$$y(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s r(s) T(s) \quad (15)$$

Considerando o diagrama de blocos da Figura 6, os efeitos sobre a saída do sistema do sinal de referência $r(s)$ e da perturbação $d(s)$ em regime permanente, é obtido a partir do princípio da superposição¹ de sinais.

$$y(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} r(s) + \frac{G(s)}{1 + C(s)G(s)} d(s) \quad (16)$$

Aplicando-se o teorema do valor final, tem-se que:

$$y(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} r(s) + \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{G(s)}{1 + C(s)G(s)} d(s) \quad (17)$$

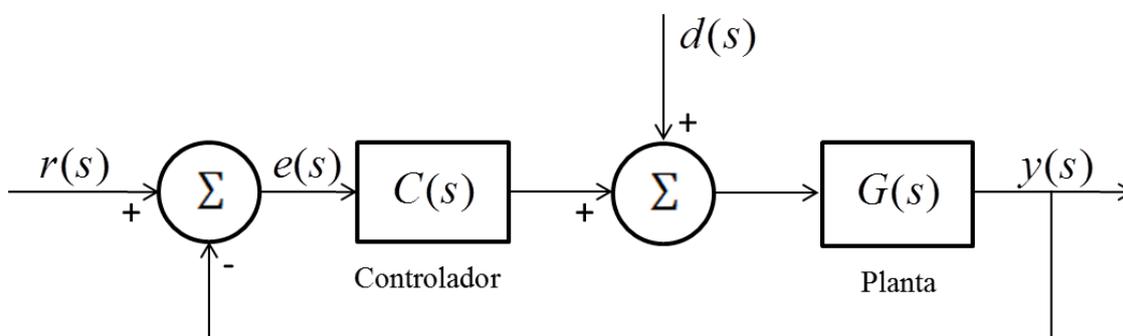


Figura 6 - Sistema realimentado (controle *feedback*)

Fonte: Adaptado de Ogata (2010).

Vale ressaltar que, o erro em regime permanente $e(\infty)$ é definido como a diferença entre o sinal de referência $r(\infty)$ e de saída $y(\infty)$ em regime permanente.

2.2.4 Rejeição a Distúrbios

Os distúrbios ou perturbações são sinais que, se aplicados em um sistema (considerando que o mesmo tenha atingido o regime permanente com relação a uma determinada entrada de referência), tendem a alterar o comportamento da variável controlada (variável de saída) e não se extingue no tempo por si só. Esses sinais que tendem alterar a dinâmica do sistema podem ser exemplificados por: um ruído na rede elétrica induzido em elementos do controlador; a ação da própria carga no eixo de um motor de velocidade controlada; a corrente de carga fornecida por um sistema de controle de tensão etc. (MAYA e LEONARDI, 2011).

¹ O princípio da superposição aplicado a sistemas lineares estabelece que a resposta de um sistema à aplicação simultânea de dois sinais de entrada é igual à soma das respostas do sistema às duas entradas introduzidas separadamente (OGATA, 2010).

Um dos pré-requisitos para que o projeto de controle de um sistema apresente resultados desejáveis é a rejeição parcial, Figura 7, ou rejeição assintótica à perturbação, conforme observado na Figura 8.

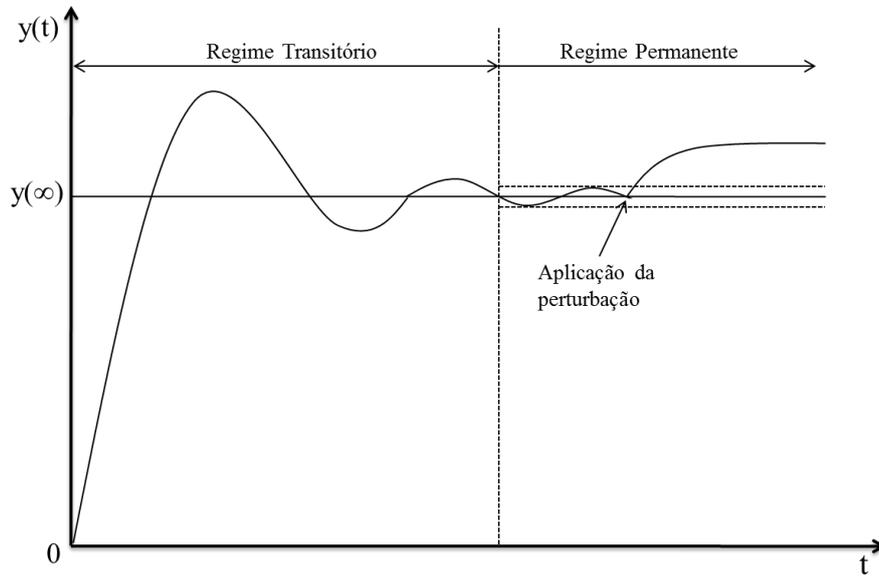


Figura 7 - Comportamento da resposta do sistema com rejeição parcial da perturbação

Fonte: Adaptado de Bazanella e Silva (2005).

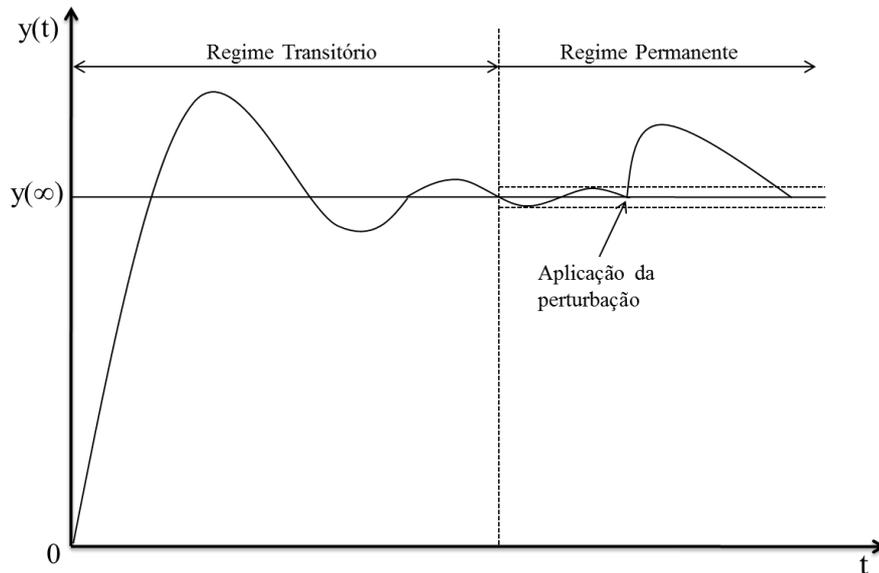


Figura 8 - Comportamento da resposta do sistema com rejeição assintótica à perturbação

Fonte: Adaptado de Bazanella e Silva (2005).

De acordo com Maya e Leonardi (2011), para que um determinado sistema em malha fechada, de modo geral, rejeite assintoticamente uma perturbação, o mesmo deve gerar internamente um sinal de perturbação (com sinal oposto a esta), de forma a haver o cancelamento de sinais.

São várias as técnicas de rejeição a distúrbios utilizadas em projetos de controle. Dentre elas, pode-se destacar o método de rejeição a distúrbios por ação *feedback* (discutido na seção 2.2.3) e *feedforward*. O controle por ação *feedforward* consiste em um método de controle antecipatório, no qual um dado distúrbio é medido e transmitido, através de uma função de transferência apropriada, ao ponto de comparação com o sinal de entrada antes que o sinal possa gerar efeitos indesejáveis na saída do processo. Em outras palavras, o elemento *feedforward* recebe o sinal de perturbação e realiza ações de controle preventivos que compensem o distúrbio (MAYA e LEONARDI, 2011). O controle antecipatório tanto pode ser usado para sistemas lineares quanto para sistemas não lineares, entretanto, ele requer um modelo matemático do sistema. A estratégia de controle *feedforward* é esquematizada conforme Figura 9.

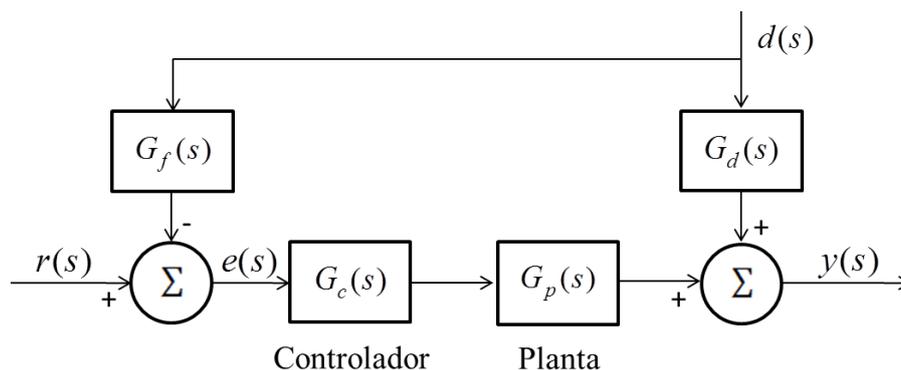


Figura 9 - Esquema de ação de controle *feedforward*

Fonte: Adaptado de Maya e Leonardi (2011).

Onde G_p representa a função de transferência da planta, G_c a função de transferência do controlador *feedback*, G_f a função de transferência do compensador de distúrbios (*feedforward*) e G_d representa a função de transferência do distúrbio.

A função de transferência que relaciona a saída $y(s)$ com a entrada de referência $r(s)$ e entrada ao distúrbio $d(s)$, obtida a partir da simplificação do diagrama de blocos da Figura 9, é dada por:

$$y(s) = (G_d(s) + G_p(s)G_c(s)G_f(s))d(s) + (G_p(s)G_c(s))r(s) \quad (18)$$

Para este caso, a eliminação dos efeitos do distúrbio na saída é obtida de acordo com a Equação (19).

$$G_d(s) + G_p(s)G_c(s)G_f(s) = 0 \quad (19)$$

Portanto, o controlador a ser projetado para a compensação do distúrbio é obtido a partir da Equação (20).

$$G_f(s) = -\frac{G_d(s)}{G_p(s)G_c(s)} \quad (20)$$

O controle *feedforward* é sensível a erros de modelagem e não pode compensar distúrbios não medidos. Dessa forma, para se projetar um sistema de controle mais robusto é necessário se trabalhar em conjunto com o controle *feedback*, técnica utilizada neste trabalho, ilustrada na Figura 10.

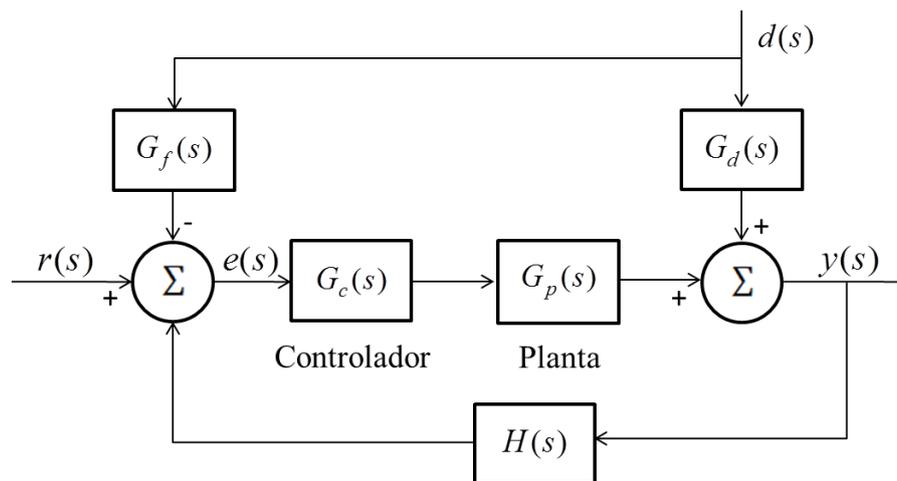


Figura 10 - Esquema de ação de controle *feedforward* em conjunto com controle *feedback*

Fonte: Adaptado de Maya e Leonardi (2011).

Onde H representa a função de transferência da realimentação.

De acordo com o diagrama de blocos da Figura 10, o controlador *Feedforward* $G_f(s)$ recebe o sinal de perturbação $d(s)$ e computa ações de controle preventivos, que são combinados com a ação tradicional de controle *Feedback*. Essa estrutura, com os controladores G_f e G_c devidamente projetados, garante que sejam compensados de forma parcial ou assintoticamente tanto os distúrbios medidos quanto os não mensuráveis.

2.3 CONTROLADOR PROPORCIONAL - INTEGRAL - DERIVATIVO

De acordo com Campestrini (2006) o controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é o mais utilizado em sistemas de controle realimentados. Sua larga utilização pode ser justificada pela 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, como por exemplo, controladores PID eletrônicos, hidráulicos e pneumáticos.

Uma particularidade vantajosa deste controlador, segundo Ogata (2010), é quando na ausência de possibilidade de uma abordagem analítica (modelo matemático da planta desconhecido), ainda sim é possível à obtenção de sintonia dos parâmetros por meio de abordagens experimentais. Caso contrário, 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.

A estrutura do controlador PID apresenta três ações de controle (Proporcional, Integral e Derivativo), ilustradas conforme diagrama da Figura 11 e posteriormente analisadas de forma detalhada.

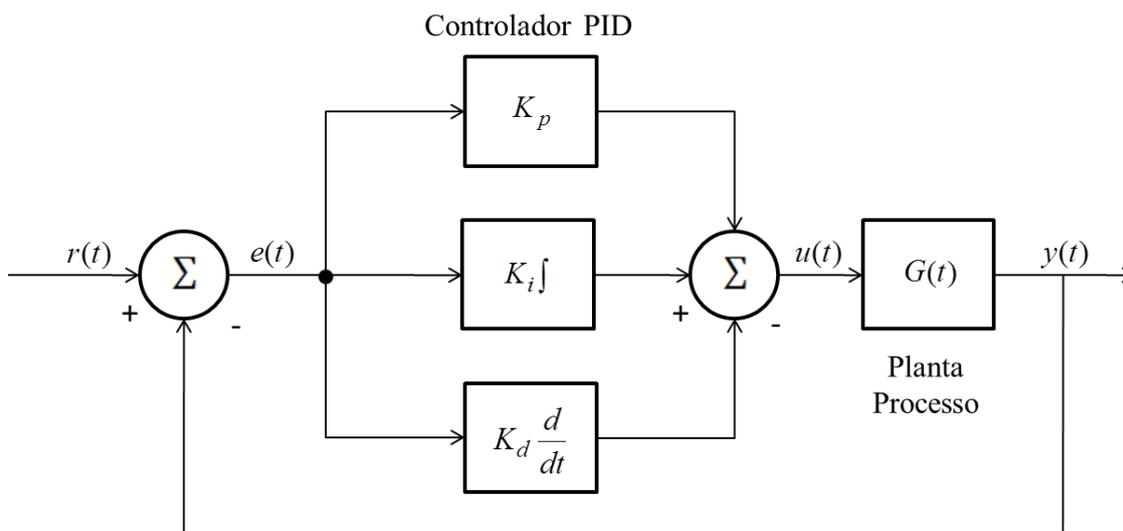


Figura 11 - Diagrama de blocos de um controle PID

Fonte: Adaptado de Ogata (2010).

2.3.1 Ação Proporcional

A ação de controle proporcional, como o próprio nome sugere, apresenta um sinal resultante do controle proporcional ao sinal de erro. As Equações (21) e (21) representam, respectivamente, a ação de controle proporcional e sua transformada de Laplace (OGATA, 2010):

$$u(t) = K_p e(t) \quad (21)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (22)$$

Através de simulações realizadas por Caniato (2006) para analisar os efeitos da ação proporcional, pode-se verificar o comportamento da resposta de um sistema quando submetido ao aumento da constante de proporcionalidade K_p .

- Diminuição do tempo de subida;
- Pequena variação do tempo de acomodação;
- Diminuição do erro de regime estacionário;
- Aumento do Sobressinal (do inglês *Overshoot*).

2.3.2 Ação Integral

O controle integral não é, isoladamente, considerado uma técnica de controle por não ser empregado separado da ação proporcional. Dessa forma, a ação integral é proporcional a integral do erro presente, conforme Equações (23) e (24) como a correspondente transformada de Laplace (OGATA, 2010):

$$u(t) = K_i \int e(t) dt \quad (23)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (24)$$

Analogamente às simulações realizadas para a ação de controle proporcional, Caniato (2006) chegou a conclusões sobre o impacto da ação do controle integral, dentre as quais o aumento da constante de proporcionalidade K_i promoveu:

- Diminuição do tempo de subida;
- Aumento do tempo de acomodação;
- Eliminação do erro de regime estacionário;
- Aumento do Sobressinal.

2.3.3 Ação Derivativa

O controle derivativo, assim como o integral, não pode ser empregado separado de uma ação proporcional. Desta forma, a ação de controle derivativa responde à taxa de variação do sinal de erro de acordo com (25) e sua respectiva transformada de Laplace (26) (OGATA, 2010):

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (25)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_d s \quad (26)$$

Para este caso, os principais efeitos no sistema com o aumento da constante de proporcionalidade K_d , a serem destacados por Caniato (2006) são:

- Pequena variação no tempo de subida;
- Diminuição do tempo de acomodação;
- Pequena variação do erro de regime estacionário;
- Diminuição do Sobressinal.

A partir da análise detalhada das ações de controle PID pode-se concluir que, o efeito combinado dos controles Proporcional, Integral e Derivativo resulta na Equação (27) e sua respectiva função de transferência (28).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (27)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (28)$$

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 que promova melhor resposta para o sistema diante da situação-problema, dentre os quais, conforme mencionado podem ir desde métodos tradicionais, como por exemplo: o de Ziegler-Nichols, à técnicas pertencentes a Inteligência Computacional.

2.4 MÉTODOS DE SINTONIA DE ZIEGLER - NICHOLS

Existem vários métodos de sintonia de controladores clássicos, os quais são baseados em técnicas heurísticas², tais como: Diagramas de resposta em frequência, Lugar das raízes, Ziegler-Nichols (ZN), entre outros. Dessa forma, Ogata (2010) destaca este último (ZN) 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. Tais métodos podem ser descritos conforme a seguir.

2.4.1 1º Método

Primeiramente, se faz necessário a realização de ensaios com a planta, a partir da qual se aplica um degrau na entrada em malha aberta para posterior verificação do comportamento do sinal de saída da planta. Caso a curva tenha a configuração mostrada na Figura 12 (aspecto de um “S”) o método é possível de ser aplicado (OGATA, 2010).

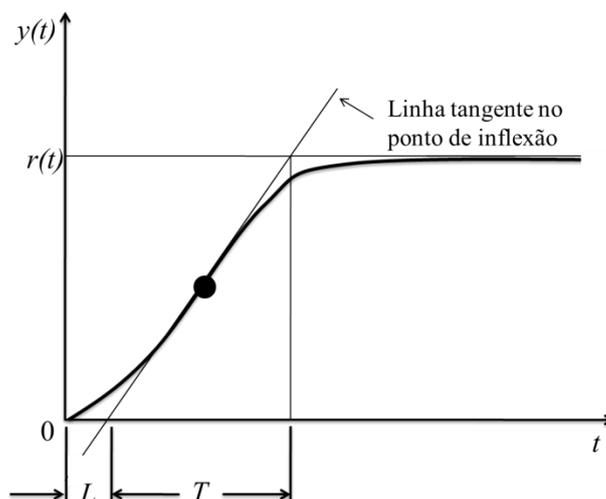


Figura 12 - Resposta do sistema em malha aberta

Fonte: Adaptado de Ogata (2010).

Obtida a curva desejada, é possível medir os comprimentos do atraso L e da constante de tempo T , traçando-se uma reta tangente no ponto de inflexão da curva e, a

² É a técnica a partir da qual os algoritmos fornecem soluções sem um limite formal de qualidade, tipicamente avaliado empiricamente em termos de complexidade (média) e qualidade das soluções (LUIZELLI, 2010).

partir da mesma, determinar a intersecção da linha tangente com o eixo dos tempos e a linha $y(t)=r(t)$. De posse dos valores numéricos de L e T , aplicam-se as regras previstas na Tabela 1, para obtenção dos parâmetros do compensador PID.

Tabela 1 - Parâmetros do controlador PID referente ao 1º Método de Ziegler-Nichols

Tipos de Controlador	K_p	T_i	T_d
P	T/L	∞	0
PI	$0,9T/L$	$T/0,3$	0
PID	$1,2T/L$	$2L$	$0,5L$

Fonte: Adaptado de Ogata (2010).

2.4.2 2º Método

Segundo Ogata (2010), aplica-se este método utilizando inicialmente na malha apenas o controlador proporcional; para isto, é definido $T_i=\infty$ e $T_d=0$ conforme o diagrama de blocos da Figura 13.

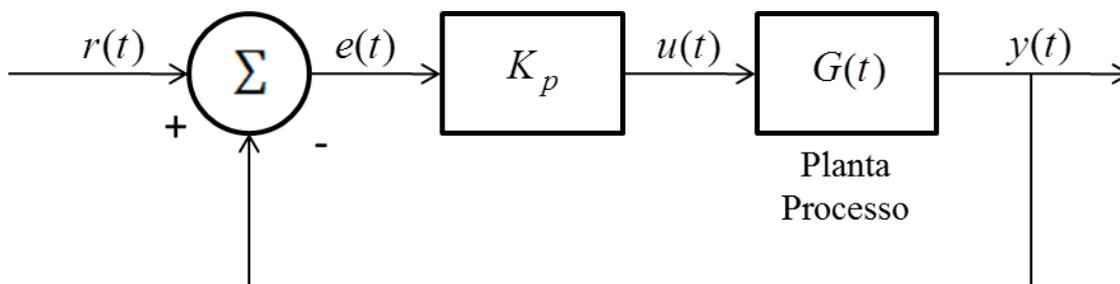


Figura 13 - Sistema a malha fechada com controlador proporcional

Fonte: Adaptado de Ogata (2010).

Em seguida, aplica-se um degrau na entrada e mede-se a frequência de oscilação sustentada (ω) a partir da variação do ganho K_p até que a resposta do sistema se torne marginalmente estável, ou seja, se torne oscilante, conforme Figura 14. O valor de K_p , nesta situação, é conhecido como ganho no limiar da instabilidade e é definido como K_{cr} , e pode também ser obtido (além de experimentalmente) por meio da aplicação do critério de Routh na equação característica da função de transferência de malha aberta do diagrama representado na Figura 13.

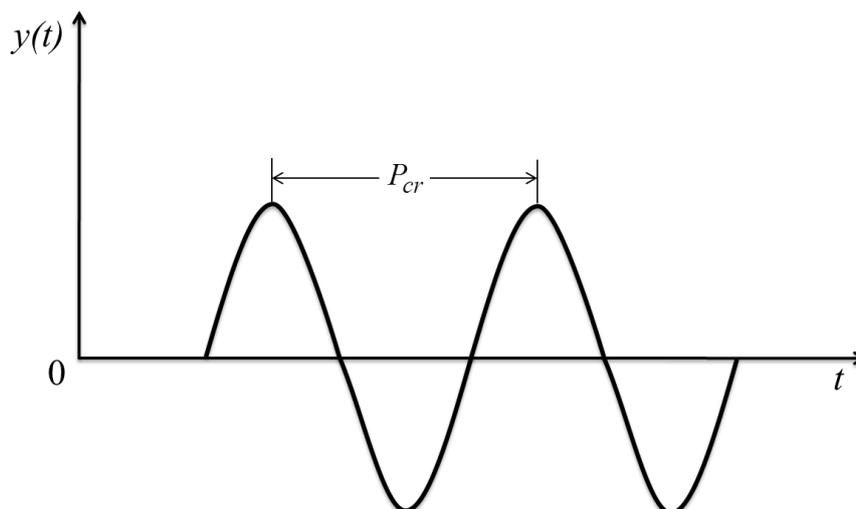


Figura 14 - Oscilação mantida com período crítico P_{cr}

Fonte: Adaptado de Ogata (2010)

Por fim, mede-se o valor do período de oscilação sustentada (P_{cr}) e aplicam-se as regras previstas na Tabela 2, para obtenção dos parâmetros do compensador PID.

Tabela 2 - Parâmetros do controlador PID referente ao 2º Método de Ziegler-Nichols

Tipos de Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$	0	0
PI	$0,45K_{cr}$	$P_{cr}/1,2$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Fonte: Adaptado de Ogata (2010).

De acordo com a Tabela 2, vale ressaltar que, poderão ser projetados controladores PI e/ou PD conforme necessidade do sistema a ser controlado.

Discutidas as principais características dos sistemas de controle, o próximo tópico (Seção 2.5) abordará os conceitos de Inteligência computacional com destaque para os Algoritmos Genéticos.

2.5 INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL

De acordo com Goldschmidt (2010), a Inteligência Computacional (IC) tem origem no ano de 1943, momento em que foi reconhecido o primeiro trabalho proposto por Warren McCulloch e Walter Pitts pertencente à área da Inteligência Artificial (IA), o qual propunha um simples modelo de neurônios artificiais de dois estados (ligado ou desligado); além de sugerirem que redes de neurônios artificiais seriam capazes de aprender. Este modelo ficou mundialmente conhecido como modelo de McCulloch e Pitts.

No final da década de 80, Rumelhart e McClelland foram responsáveis pela publicação de diversos trabalhos afins em uma coletânea denominada *Parallel Distributed Processing*. A partir de então, pesquisadores começaram a utilizar a expressão Inteligência Computacional como uma extensão à Inteligência Artificial (GOLDSCHMIDT, 2010). Dessa forma, segundo Engelbrecht (2007), a mais recente definição de IA proposta pela *IEEE Neural Networks* em 1996 estabelece que, trata-se do estudo de como fazer computadores tomarem atitudes semelhantes às melhores que um ser humano poderia realizar em atividades específicas. Analogamente, Goldschmidt (2010) 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 das definições, observa-se a grande semelhança entre os dois ideais e conclui-se que as diferenças são meramente práticas, tendo em vista que a pesquisa na IA envolvem 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). Analogamente, a mente humana simbólica “executa” sobre uma estrutura subsimbólica, o cérebro.

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.

2.5.1 Classificação da IC

De acordo com Goldschmidt (2010), a IC apresenta ramificações que envolvem estudos de técnicas e aplicações inspiradas na natureza. A Figura 15 representa uma taxonomia com a breve descrição dos principais paradigmas da Inteligência Computacional.

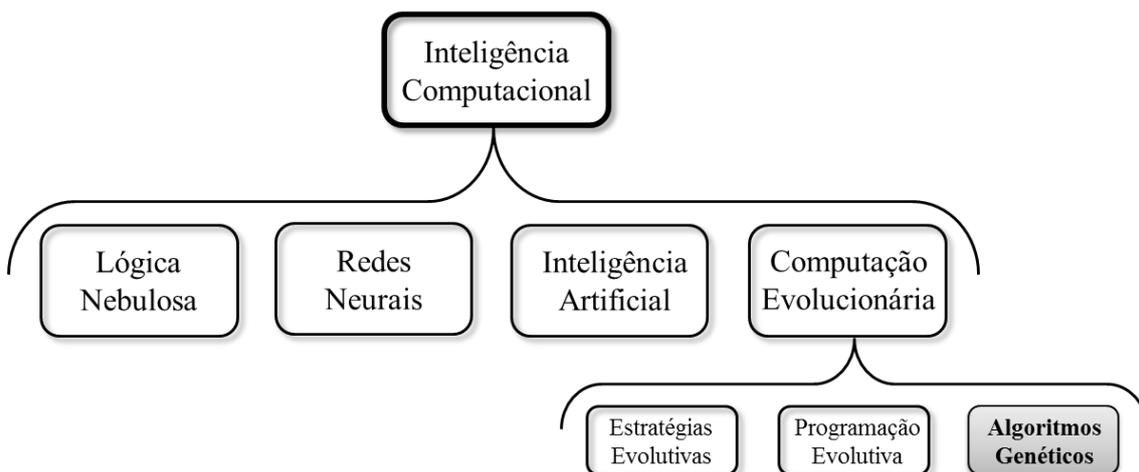


Figura 15 - Inteligência computacional-Taxonomia

Fonte: Adaptado de Goldschmidt (2010).

- Lógica Nebulosa (do inglês *Fuzzy Logic*):

Parte do princípio de modelagem aproximada do raciocínio humano estruturada em uma incerteza não estatística, ou seja, baseada em ambientes de subjetividade, imprecisão e/ou ambiguidade. Portanto, para ser implementada com eficácia, esta técnica exige do programador um conhecimento ou experiência prévia do comportamento do sistema em estudo (GOLDSCHMIDT, 2010).

- Redes Neurais:

Busca executar principalmente as tarefas de reconhecimento de padrões, percepção e controle motor, de forma semelhante às realizadas pelo cérebro. Em adição a estas características, o algoritmo baseado no sistema neural biológico, permite a capacidade de aprender e memorizar algumas ações; apresentando limitações tendo em vista o comportamento não linear e complexo do cérebro diante de situações específicas (ENGELBRECHT, 2007).

- **Inteligência Artificial:**

Retomando o conceito já esclarecido, esta linha de pesquisa restringe-se ao processamento simbólico do conhecimento, por meio da elaboração de programas que possam dotar computador de “inteligência” (GOLDSCHMIDT, 2010).

- **Computação Evolucionária:**

É uma técnica que abrange paradigmas baseados em conceitos biológicos da lei da evolução natural de Charles Darwin, em complemento à utilização do princípio da recombinação genética. Dentro do qual se observa o conceito de Algoritmos Genéticos (detalhado na Seção 2.5.2) (HOLLAND, 1975).

2.5.2 Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos (AGs) são técnicas computacionais inteligentes de busca e otimização, inspirados em conceitos biológicos e na teoria evolutiva descrita por Charles Darwin; hipótese a qual justifica as mudanças na natureza e a geração de novas espécies como sendo advindas de pequenas variações herdadas pelos seres vivos juntamente com o processo de seleção natural (HOLLAND, 1975).

Introduzidos pelo americano John Henry Holland's (1975), esta técnica busca pelas melhores soluções de um determinado problema através da estratégia de sobrevivência do mais apto. Em geral, os indivíduos mais aptos de qualquer população tendem a reproduzir e sobreviver à geração seguinte, melhorando assim as sucessivas gerações. No entanto, os indivíduos inferiores podem, por acaso, sobreviver e também reproduzir. Enfim, os algoritmos genéticos têm sido mostrados para resolver problemas lineares e não lineares, explorando todas as regiões do espaço do problema e consequentemente promovendo a descoberta de áreas promissoras através da mutação, cruzamento e demais operações de seleção possíveis de ser aplicar aos indivíduos de uma população (MICHALEWICZ, 1996).

Segundo Barcellos (2000), os AGs se encontram na classe dos Algoritmos Evolucionários juntamente com as Estratégias Evolutivas (EE) e a Programação Evolutiva (PE) conforme classificação de técnicas de busca a seguir:

- **Técnicas Baseadas em Cálculo** – As soluções de um problema de otimização devem satisfazer a um conjunto de condições necessárias e suficientes.

- Métodos Diretos – usam informações da função como derivadas de primeira e/ou segunda ordem.
- Métodos Indiretos – buscam por um extremo local resolvendo um conjunto de Equações, comumente não lineares, quando se considera o gradiente da função objetivo nulo.
- Técnicas Enumerativas – se utilizam da procura por uma solução pesquisando sequencialmente cada ponto do espaço de busca.
- Técnicas dirigidas por pesquisa aleatória – são baseadas em técnicas enumerativas, porém utilizam informações adicionais para proceder com a pesquisa.
 - *Simulated Annealing* – baseada no processo de evolução da termodinâmica para proceder com a pesquisa para um estado de mínima energia.
 - Algoritmos Evolucionários – baseados no princípio da seleção natural. (conforme citado esta classe se subdivide em: Estratégias Evolutivas e a Programação Evolutiva, Algoritmos de Genéticos).

Dentro dos Algoritmos Evolucionários, os AGs se subdividem em dois tipos básicos, o geracional (com ou sem elitismo) e o *steady state*. O AG geracional com elitismo, método usado nesse trabalho, ocorre quando há a preservação dos n melhores indivíduos a cada geração; já no AG sem elitismo, todos os novos indivíduos gerados (filhos) em uma nova população substituirão os indivíduos da população inicial (pais). O AG *steady state*, utiliza um processo no qual é criada uma determinada percentagem de filhos a cada geração para substituir os piores pais de uma população (NASCIMENTO, 2006).

De acordo com Linden (2008), os AGs vêm sendo aplicados com sucesso em diversos problemas de otimização. E para o seu entendimento, é necessário primeiramente assimilar a equivalência existente entre as denominações do processo de evolução natural e um problema a ser resolvido computacionalmente, conforme visualizado na Tabela 3.

Tabela 3 - Analogia entre os vocabulários do AG com um problema computacional

Evolução Natural	Problema Computacional
População	Conjunto de soluções
Indivíduo	Solução de um problema
Cromossomo	Representação de uma solução
Gene	Parte da representação de uma solução
Ambiente	Função objetivo ou aptidão (<i>fitness</i>)
Cruzamento, Mutação	Operadores de busca

Fonte: Adaptado de Pacheco (1999).

O algoritmo genético padrão proposto por Holland (1975), de forma geral, pode ser exemplificado conforme obediência às etapas destacadas na Figura 16:

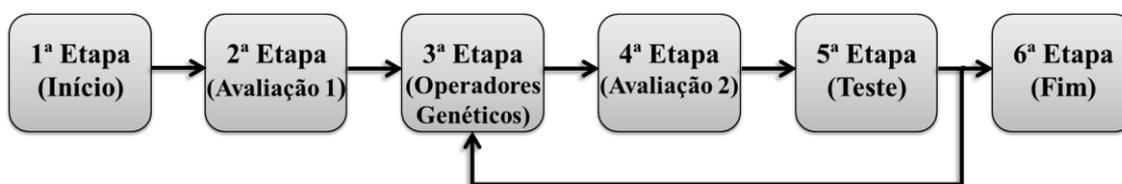


Figura 16 - Esboço básico de execução dos algoritmos genéticos

Fonte: Adaptado de Czarkowski (2002).

1ª Etapa (Início): É gerada uma população aleatória de n cromossomos (soluções adequadas para o problema).

2ª Etapa (Avaliação): A função *fitness* de cada indivíduo da população é avaliada.

3ª Etapa (Operadores Genéticos): Os indivíduos são **selecionados** de acordo com a melhor função *fitness* (escolha dos pais) para o **cruzamento** entre os pais, objetivando formar a nova geração. Caso ocorra a **mutação**, cromossomas da nova geração nos *locus* (posição nos cromossomas) são alterados.

4ª Etapa (Avaliação): A função *fitness* dos novos indivíduos da população é avaliada.

5ª Etapa (Teste): Se a condição final desejada para o problema for atingida, o algoritmo exibe a melhor solução da população atual e finaliza na próxima etapa, se não, retorna à 3ª etapa.

6ª Etapa (Fim)

Diante da estrutura geral mostrada de execução de um AG, vale ressaltar que há muitos parâmetros e ajustes a serem implementados neste algoritmo para cada problema específico. Dessa forma, serão descritas, mais especificadamente, as etapas que compreendem desde a criação dos cromossomos às fases de aplicação dos operadores genéticos para obtenção de uma determinada solução.

2.5.2.1 Representação das soluções

A representação das soluções de um problema (diz-se cromossomo) pode ser, de acordo com a especificidade da aplicação, codificada de diversas formas, as mais utilizadas são números binários e inteiros, representados conforme Figura 17 (PACHECO, 1999).

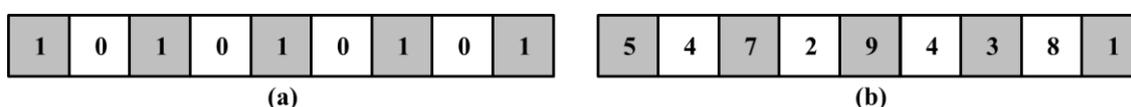


Figura 17 - Representação das soluções em (a) números binários e (b) números inteiros

Fonte: Autoria própria (2013).

Haupt e Haupt (1998) afirmam que apesar de a representação binária ser mais tradicional na codificação em AGs, tendo em vista a maioria dos trabalhos encontrados na literatura fazerem uso de tal solução, a representação inteira é melhor compreendida pelo fato de apresentarem cromossomos menores. Tal afirmação é ratificada por Bessaou e Siarry (2001), os quais asseguram a existência de diversas comparações empíricas entre as codificações binárias e valores inteiros, e a atribuição de melhor desempenho a esta última classe de valores. O que não pode ser generalizado, tendo em vista que o desempenho depende do problema e dos detalhes do AG utilizado.

2.5.2.2 Inicialização e Tamanho da População

A inicialização de uma população é a geração dos primeiros indivíduos para a execução do AG. Dessa forma, a criação de uma boa população significa dizer que o algoritmo tenderá a convergir para soluções eficazes, caso contrário, a população inicial poderá comprometer a convergência do AG.

Há uma variedade de abordagens para gerar populações iniciais. Um método comumente utilizado é o da geração aleatória, o qual mostra ser uma abordagem eficiente por fornecer uma população que abrange a região viável para as soluções

(RENNER e EKART, 2003). No que concerne ao tamanho ideal da população, Costa *et al* (1999) afirma que este parâmetro possui um papel importante para o sucesso do processo de resolução de problemas, porém existe ainda limitado entendimento dos efeitos e de se adaptar dinamicamente este parâmetro. Sendo, portanto, necessário a realização de testes no algoritmo que se esteja trabalhando para verificação dos valores que promovam a convergência para soluções desejáveis.

2.5.2.3 Função de Avaliação

A função de aptidão (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 de aptidão necessita ser minuciosamente elaborada de forma a representar fielmente as condições do problema, 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, são utilizadas comumente em sistemas de controle funções de *fitness* que minimizem os seguintes índices de desempenho: (ALIEV e LARIN, 1998):

- Integral do Erro Absoluto ponderado no tempo (ITAE – do inglês *Integral of Squared Error*).

$$ITAE = \int t \times |e(t)| dt \quad (29)$$

- Integral do Erro Absoluto (IAE – do inglês *Integral of Absolute Error*).

$$IAE = \int |e(t)| dt \quad (30)$$

- Integral do Erro ao Quadrado vezes o Tempo (ITSE – do inglês *Integral of Time Multiply Squared Error*).

$$ITSE = \int t \times e^2(t) dt \quad (31)$$

- Integral do Erro ao Quadrado (ISE – do inglês *Integral of Squared Error*).

$$ISE = \int e^2(t)dt \quad (32)$$

Onde $e(t)$ é o sinal de erro proveniente da diferença entre o sinal de saída e o sinal de referência.

Vale salientar que, de forma alternativa às funções tradicionalmente utilizadas, que visam minimizar o sinal de erro, pode-se utilizar o máximo sobressinal e tempo de acomodação como índice de desempenho a ser minimizado pela função *fitness*.

2.5.2.4 Operadores Genéticos de Seleção

Após a fase de avaliação, os indivíduos com melhor aptidão terão a maior probabilidade de serem selecionados para a aplicação dos demais operadores genéticos. Segundo Teng *et al* (2003), dentre as técnicas de seleção comumente utilizadas, podem ser destacadas:

- Seleção por roleta proporcional:

É considerado o método mais tradicionalmente empregado em sistemas de controle, no qual os indivíduos são representados de forma proporcional ao seu valor de aptidão. Mais especificamente, essa proporção é obtida pela razão entre a aptidão de cada indivíduo e a da população acumulada, de forma que receberá uma maior porção da roleta o indivíduo que apresentar maior valor de aptidão (PACHECO, 1999). Sendo assim, a probabilidade p_i de um indivíduo i ser selecionado é dada pela Equação (33):

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^N f_j} \quad (33)$$

Onde N é o número de indivíduos na população e f_i é a *fitness* de um indivíduo na população corrente.

O valor da razão irá situar-se na fatia da roleta correspondente a uma das soluções, a qual será a selecionada para sofrer ação dos operados genéticos. Para uma melhor visualização desta técnica, na Figura 18 são ilustradas as probabilidades de seleção de uma população constituída por 5 cromossomos que apresenta o vetor aptidão f_i dado por {0,06; 0,1; 0,24; 0,3; 2}.

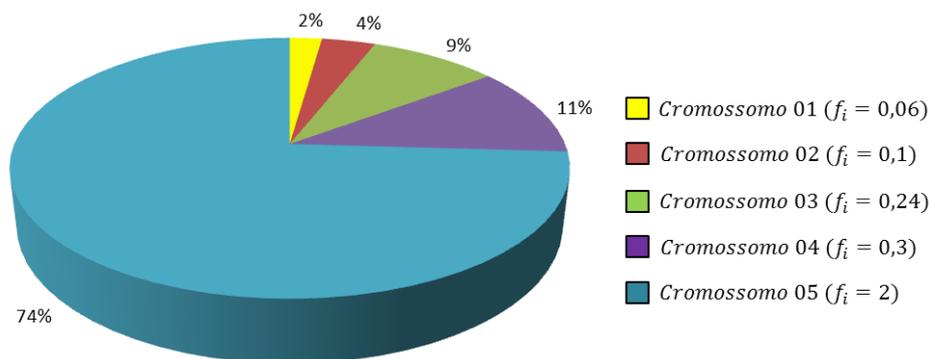


Figura 18 - Gráfico de probabilidade de seleção por meio da roleta proporcional

Fonte: Autoria própria (2013).

No gráfico da Figura 18 é possível observar que o cromossomo com maior possibilidade de ser selecionado foi o de número 05, apresentando uma probabilidade de 74%.

- Seleção por Ordenamento:

Neste método, os indivíduos de uma determinada população são ordenados de acordo com o seu valor de função de *fitness*, ou seja, o de menor aptidão recebe nota 1, o segundo a nota 2 e assim por diante. A roleta proporcional é então ponderada a partir dessas notas e não mais em função diretamente do valor de *fitness* (MOGNON, 2004). Na Figura 19 são ilustradas as probabilidades de seleção para o mesmo caso anterior, empregando a roleta ponderada, onde o vetor de notas atribuídas a f_i é $\{1; 2; 3; 4; 5\}$.

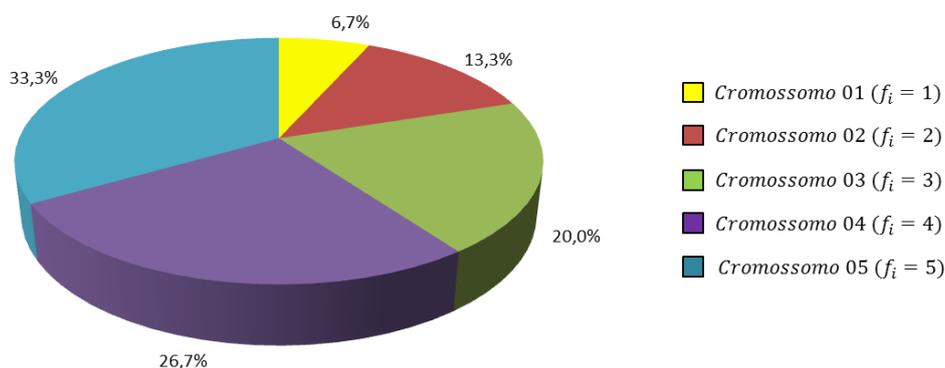


Figura 19 - Gráfico de probabilidade de seleção por meio da roleta ponderada

Fonte: Autoria própria (2013).

No gráfico da Figura 19 observa-se que o cromossomo com maior possibilidade de ser selecionado continua sendo o de número 05, porém com diminuição da probabilidade de seleção para 33,3%. Tal fato reflete na adoção deste método para casos em que os indivíduos possuem grandes diferenças entre os valores de *fitness*, tendo em vista que o mesmo causa uma diminuição da distância entre os indivíduos e, conseqüentemente pode promover maior diversidade à população (MOGNON, 2004).

- Seleção por Torneio:

Nesta seleção, parcela dos indivíduos da população é escolhida (dois a dois ou em pequenos grupos) de forma aleatória e com iguais probabilidades de forma que, o cromossomo que apresente maior função de aptidão seja selecionado para a população intermediária. A seleção é repetida até que a população se complete (MOGNON, 2004).

- Elitismo:

É o processo em que parcela de uma nova população pode ser criada simplesmente copiando (sem alterações) indivíduos selecionados da população corrente (NASCIMENTO, 2010). Por exemplo, em um AG com 100 indivíduos, se a probabilidade de elitismo for de 75%, significa que os 75 melhores serão selecionados para constituir uma nova população que apresentará 25 novos indivíduos gerados aleatoriamente.

2.5.2.5 Operador de Cruzamento

Consiste na geração de descendentes (filhos) a partir da troca de material genético entre os pais. A maneira a qual o material genético dos genitores será combinado é particular de cada problema, e várias situações podem ser encontradas na literatura, dentre as quais são destacadas a seguir. (YALCINOZ e ALTUN, 2002; DAGLI e SCHIERHOLT, 1997):

- Cruzamento com ponto de corte único:

Nesse processo, é escolhida uma localização aleatória (ou predeterminada no algoritmo) no cromossomo dos pais, para assim dividi-los em duas partes cada. Onde cada filho será composto pela combinação dessas partes, de modo que os filhos adquiram informações genéticas dos dois pais conforme representado na Figura 20 (HOLLAND, 1975).

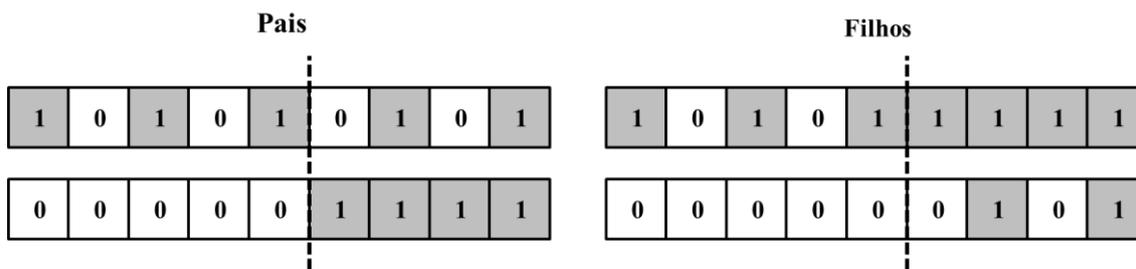


Figura 20 - Cruzamento com ponto de corte único

Fonte: Aatoria própria (2013).

- Cruzamento com ponto de corte duplo:

Esta modalidade de cruzamento permite uma maior diversidade genética para os indivíduos gerados tendo em vista que, ao invés de selecionar um único ponto de cruzamento (como no caso anterior), são selecionados dois pontos, dividindo, portanto, o cromossomo em três partes conforme ilustrado na Figura 21(HOLLAND, 1975).

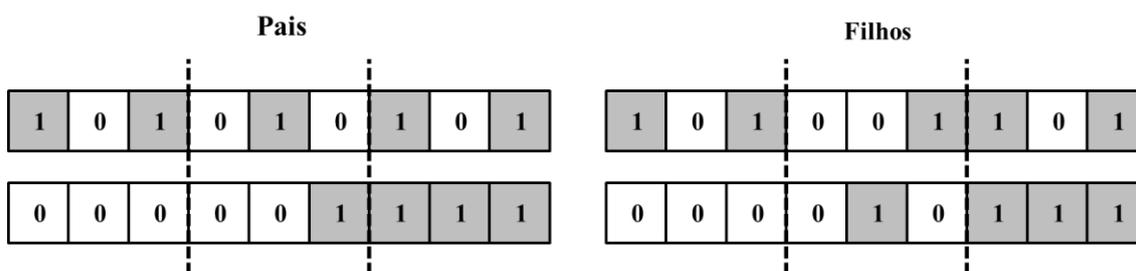


Figura 21 - Cruzamento com ponto de corte duplo

Fonte: Aatoria própria (2013).

- Cruzamento com pontos aleatórios:

Considerando existir diversas outras possíveis formas de cruzamento, pode-se destacar, por fim, o cruzamento em pontos aleatórios, no qual os pontos para a troca do material genético são definidos randomicamente para cada geração conforme Figura 22 (HOLLAND, 1975).

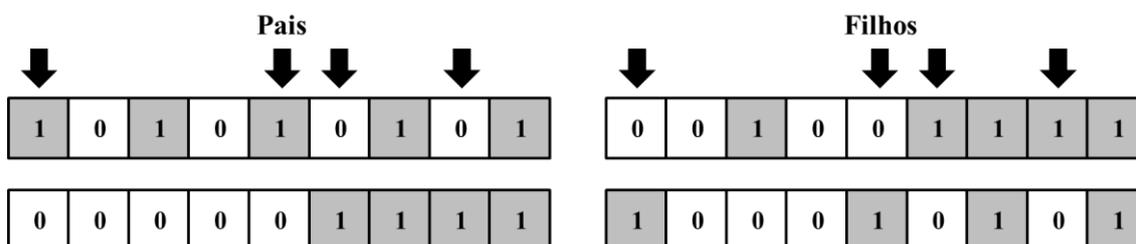


Figura 22 - Cruzamento com pontos aleatórios

Fonte: Aatoria própria (2013).

Vale ressaltar que, a taxa a qual o operador genético de cruzamento ocorre, denominado probabilidade de cruzamento P_c , mais usualmente encontrada na literatura, varia dentro de um intervalo entre 70 a 90%. Porém segundo Andrade *et al* (2008), para garantir uma maior diversidade genética das populações geradas, essa taxa pode assumir valores segundo uma probabilidade P_c que varia entre $50\% \leq P_c \leq 100\%$.

2.5.2.6 Operador de Mutação

Este processo contribui para a diversidade genética de uma espécie, alterando o valor do gene por outro valor aleatório distribuído normalmente dentro de uma faixa pré-estabelecida, com mínima probabilidade de ocorrência para que o processo de otimização não se torne puramente aleatório (NASCIMENTO, 2010). Esta probabilidade de mutação P_m é usualmente encontrada na literatura em torno de $0,1\% \leq P_m \leq 1\%$.

A Figura 23 ilustra dois casos de como podem ocorrer a mutação em um determinado cromossomo.

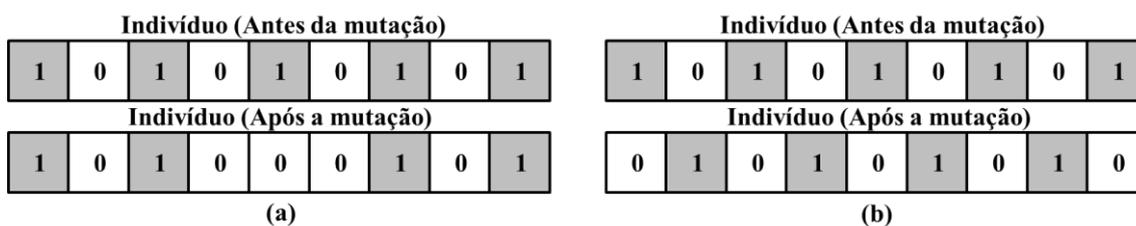


Figura 23 - Mutação em (a) apenas um ponto do cromossomo (b) cromossomo completo

Fonte: Autoria própria (2013).

De acordo com a Figura 23, a mutação pode ocorrer em apenas 01 (um) ou mais pontos, ou pode até acontecer no cromossomo completo.

2.6 TRABALHOS RELACIONADOS

Esta seção discute os principais trabalhos diretamente relacionados com a aplicação de técnicas inteligentes no projeto do controlador clássico PID para diferentes aplicações industriais, além da utilização dos métodos de sintonia de controladores tradicionais baseados em técnicas heurísticas para efeitos de comparação dos resultados.

O recente artigo publicado por Adhikari *et al.*(2012), sob o qual o presente trabalho se encontra baseado, 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. Para fins de comparação com o AG, é realizada a sintonia pelo método tradicional de Ziegler-Nichols. Dessa forma, para o controlador sintonizado por AG o sistema apresentou uma resposta mais rápida e com melhor desempenho no tempo de subida, tempo de acomodação e máximo sobressinal. Por fim, a maior contribuição do método clássico foi de fornecer o ponto de partida para os valores dos ganhos PID.

No trabalho de Alfaro-Cid *et al* (2009) é usada uma combinação entre três diferentes métodos de seleção e busca por AG para encontrar os parâmetros do controle PID do propulsor de uma embarcação. Dessa forma os autores chegaram à conclusão de que o melhor método para encontrar os parâmetros do controlador PID foi especificamente o método da roleta, pois manteve a robustez do sistema e evitou a convergência prematura do AG.

Semelhante ao artigo de Adhikari *et al* (2012), os trabalhos de Neenu e Poongodi (2009) e Bindu e Namboothiripad (2012), realiza a sintonia do controle PID para um motor de corrente contínua pelos métodos de Ziegler-Nichols e Algoritmos Genéticos. A comparação entre os desempenhos dos dois métodos permite concluir que o ajuste do PID por AG resulta na resposta mais rápida que a obtida pelo método tradicional, porém o método clássico é usado para obter o ponto de partida para os valores dos ganhos PID.

Com base nas publicações discutidas, será abordado no Capítulo 3 o Algoritmo proposto para o desenvolvimento deste trabalho.

CAPÍTULO 3 - ALGORITMO PROPOSTO

Neste capítulo é descrita a técnica de Algoritmos Genéticos aplicada ao controle de posição do rotor de um motor de corrente contínua com rejeição a distúrbios, com as particularidades das implementações.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O problema consiste na aplicação de um Algoritmo Genético na busca dos ganhos proporcional (K_{p1}), integral (K_{i1}) e derivativo (K_{d1}) de um controlador PID G_{c1} , que permita a otimização dos parâmetros de resposta tais como tempo de subida, tempo de acomodação e máximo sobressinal para o sistema mostrado na Figura 23. Dependendo dos ganhos obtidos para o controlador G_{c1} , o AG também busca a otimização para os ganhos do segundo controlador G_{c2} definidos por ações proporcional (K_{p2}), integral (K_{i2}) e derivativa (K_{d2}). Em adição, G_{c2} possibilita a rejeição de distúrbios, a partir da implementação do método de controle com ação à frente (*Feedforward*) no algoritmo proposto.

De acordo com Maya e Leonardi (2011), no método de controle por ação *Feedforward* o distúrbio é medido e transmitido, através de uma função de transferência apropriada, ao ponto de comparação com o sinal de entrada; porém em condições normais de operação, este procedimento matemático não cancelará os efeitos de perturbações não mensuráveis, sendo necessário, portanto, a inclusão de uma malha de realimentação conforme mostrado na Figura 24.

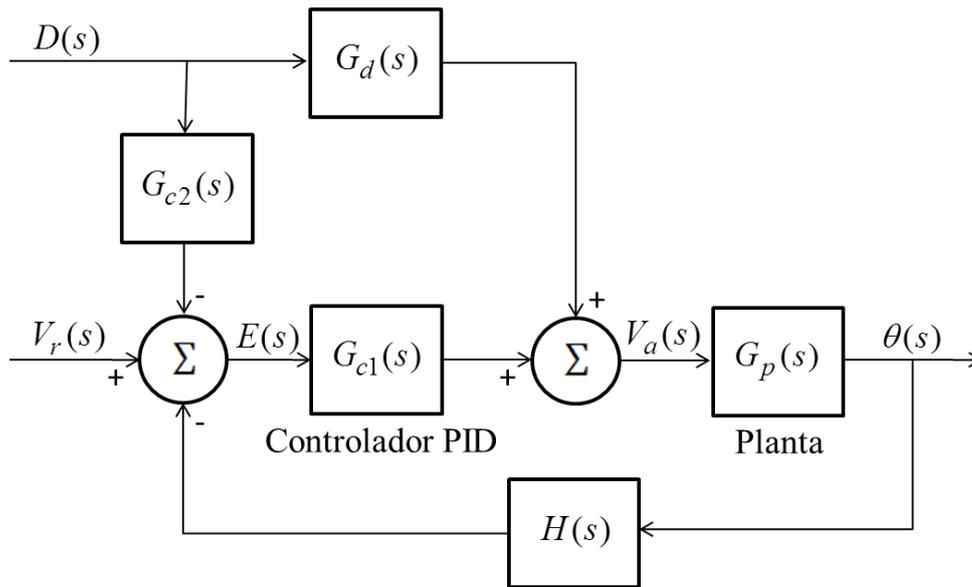


Figura 24 - Diagrama de blocos do sistema proposto para este trabalho

Fonte: Autoria própria (2013).

Nesse caso, a função de transferência de entrada ao distúrbio $D(s)$ para a saída $\theta(s)$ é dada por:

$$\frac{\theta(s)}{D(s)} = \frac{G_d G_p - G_{c2} G_{c1} G_p}{1 + G_{c1} G_p H} \quad (34)$$

Onde G_p representa a função de transferência da planta, G_{c1} a função de transferência do controlador, G_{c2} a função de transferência do compensador de distúrbios, G_d a função de transferência do distúrbio e H representa a função de transferência da realimentação. Em geral, além de G_p , G_d e H contêm os componentes fixos do sistema (representados, para este caso, por uma função de transferência unitária). Ao contrário destes, G_{c1} e G_{c2} , incluem elementos do controlador a serem projetados pelo AG.

A planta G_p a ser controlada refere-se à de um motor de corrente contínua (sistema linear e invariante no tempo), a partir da qual se objetiva o controle de posição do eixo $\theta(s)$ (saída) do motor a partir da tensão fornecida $V_a(s)$ (entrada) ao mesmo. Os parâmetros do motor CC utilizados neste trabalho foram extraídos dos recentes trabalhos de Adhikari *et al* (2012) e Neenu e Poongodi (2010), e podem ser visualizados na Tabela 4:

Tabela 4 - Parâmetros do motor CC

Parâmetros	Valor	Unidade
Momento de Inércia J_m	0,022	Kg-m ² /rad
Coefficiente de Amortecimento B	$0,5 \times 10^{-3}$	N-m/ (rad/s)
Constante da Força Eletromotriz K_b	1,2	V.s/rad
Resistência Elétrica R_a	2,45	Ω
Indutância Elétrica L_a	0,035	H

Fonte: Adaptado de Adhikari (2012), Neenu e Pongodi (2009).

A partir da substituição dos parâmetros do motor CC da Tabela 4 na função de transferência desenvolvida no tópico 2.1.2 deste trabalho (Equação 14), pode-se obter a seguinte expressão resultante para $\theta(s)/V_a(s)$.

$$\frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{1,2}{0,00077s^3 + 0,0539s^2 + 1,441s} \quad (35)$$

O diagrama de blocos simplificado do sistema de controle a ser projetado por meio do AG é representado conforme a Figura 25:

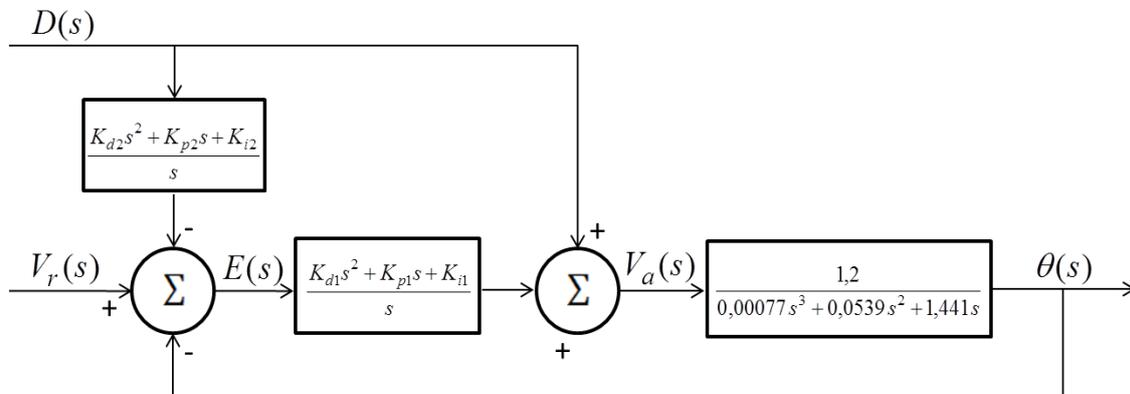


Figura 25 - Representação do sistema de controle a ser projetado

Fonte: Autoria própria, 2013.

A partir da caracterização do problema a ser explorado pelo presente trabalho, a Seção 3.2 apresenta a descrição detalhada do AG proposto.

3.2 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 de posição do eixo de um motor de corrente contínua submetido a uma tensão de entrada. Em adição, o AG permite a rejeição de distúrbios que possam vir a ocorrer na planta do motor CC. O fluxograma mostrado na Figura 26 apresenta a forma de execução do AG proposto neste trabalho.

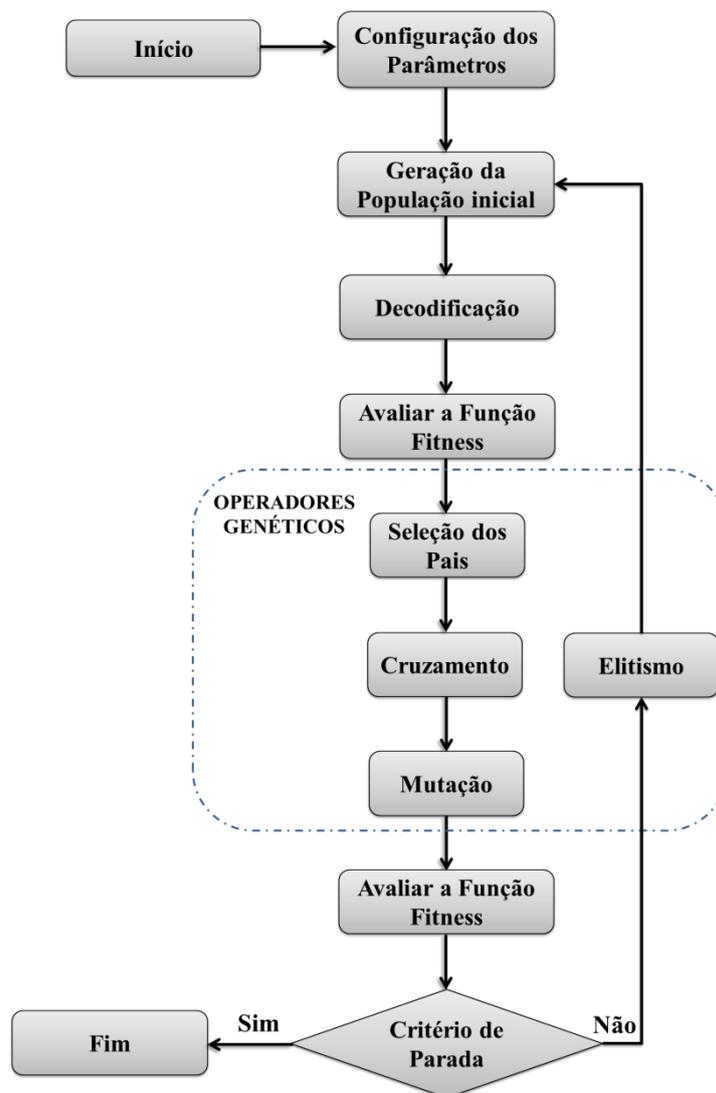


Figura 26 - Fluxograma do Algoritmo Genético proposto neste trabalho

Fonte: Autoria própria (2013).

De acordo com o fluxograma da Figura 26, inicialmente é criada uma população aleatória em forma binária, constituída por valores dos ganhos K_{p1} , K_{i1} , K_{d1} , K_{p2} , K_{i2} e K_{d2} referentes aos controladores G_{c1} e G_{c2} , os quais serão avaliados e, posteriormente 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.

Vale destacar que a expressão matemática que é utilizada para converter o número binário a um número real (decodificação) dentre uma gama de valores é representada pela Equação (36).

$$X_{Real} = X_{inf} + \frac{|X_{inf} - X_{sup}|}{2^k - 1} \cdot X_c \quad (36)$$

Onde X_{Real} representa o valor real a ser obtido dentro do intervalo $[X_{inf}, X_{sup}]$, X_c é o número inteiro correspondente ao binário e k é o número de bits do indivíduo (LINDEN, 2008). No AG proposto, X_{inf} e X_{sup} representam, respectivamente, os valores mínimos e máximos de cada um dos ganhos (K_{p1}, K_{i1}, K_{d1} , K_{p2}, K_{i2} e K_{d2}).

A função *fitness* é responsável pelo cálculo da aptidão de cada indivíduo e é muito importante para convergência do processo, sendo considerada a chave para o uso do AG devido sua responsabilidade no desempenho da dinâmica da planta a ser controlada (PACHECO, 1999). Desta forma, a função *fitness* ou função aptidão proposta para o AG utilizado neste trabalho é dada por:

$$Fitness = Ms_{(D=0)} + Ta_{(D=0)} + Ms_{(V_r=0)} + Ta_{(V_r=0)} \quad (37)$$

Onde $Ms_{(D=0)}$ e $Ta_{(D=0)}$ correspondem ao Máximo Sobressinal e Tempo de Acomodação da resposta do sistema considerando apenas a entrada $V_r(s)$; já $Ms_{(V_r=0)}$ e $Ta_{(V_r=0)}$ representam o Máximo Sobressinal e Tempo de Acomodação da resposta do sistema considerando apenas a entrada ao distúrbio $D(s)$.

Dessa forma, conclui-se que o objetivo do AG é de minimizar os quatro parâmetros constituintes da *fitness*, portanto, quanto menor o valor da *fitness* de um indivíduo mais adaptado ele vai estar e, conseqüentemente, maior a probabilidade de ir para a próxima geração.

Depois de avaliada a *fitness*, as populações atuais são selecionadas pelo método da roleta proporcional, às quais são organizadas em uma matriz onde as linhas correspondem ao número de populações (N_{pop}) e as colunas representam valores de K_{p1} , K_{i1} , K_{d1} , $Ms_{(D=0)}$, $Ta_{(D=0)}$, K_{p2} , K_{i2} , K_{d2} , $Ms_{(Vr=0)}$, $Ta_{(Vr=0)}$ e *Fitness*.

O próximo operador genético é a etapa de cruzamento, o qual seleciona dois pais a partir do primeiro indivíduo até N_{pop} e combina 50% de cromossomos de cada pai, originando dois novos indivíduos. O procedimento de cruzamento é realizado segundo uma probabilidade P_c que varia de $0,5 \leq P_c \leq 1,0$ (ANDRADE *et al*, 2008). De acordo com a Tabela 5 foi adotada, para o AG proposto, uma probabilidade ou taxa de cruzamento de 80%.

Após o cruzamento, o operador de mutação poderá ser aplicado segundo uma baixa probabilidade P_m variando em um intervalo de $0,001 \leq P_m \leq 0,01$ (CZARKOWSKI, 2002). Conforme exposto na Tabela 5, foi adotada uma probabilidade de apenas 1% dos indivíduos da população serem escolhidos para a mutação, nesse caso, todos os valores binários que representam o seu código genético serão invertidos.

Tabela 5 - Parâmetros do Algoritmo Genético proposto

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

Fonte: Autoria Própria, 2013.

Ao final da primeira geração de descendentes, a função *fitness* será novamente avaliada 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). A taxa de Elitismo de 75% utilizada neste trabalho foi obtida a partir de testes realizados com o AG proposto e a observação da convergência para valores ótimos de resposta. Terminada a etapa de elitismo, o processo é repetido até que seja atingido o critério de parada escolhido (número de gerações).

Vale salientar que, por não existir uma teoria geral que possa ser aplicada no auxílio da sintonia dos parâmetros dos AGs, fez-se necessário, antes de escolhidos os valores da Tabela 5, a verificação da convergência das respostas no algoritmo para os parâmetros sugeridos pela literatura.

3.3 DEFINIÇÃO DO INTERVALO DE BUSCA PARA OS GANHOS DOS CONTROLADORES

Os intervalos de busca para os ganhos dos controladores G_{c1} e G_{c2} foram obtidos a partir da aplicação de técnicas tradicionais de sintonia baseada no método de Ziegler-Nichols. Com base na planta apresentada, foi necessário saber previamente qual dos dois métodos de Ziegler-Nichols a se utilizar. Dessa forma, provavelmente o segundo método será adotado tendo em vista que a planta do motor CC em análise possui integrador e pólos complexos conjugados dominantes. Portanto, para confirmar o descarte do primeiro método, a resposta do sistema à entrada ao degrau será simulada no software MATLAB, conforme verificado na Figura 27.

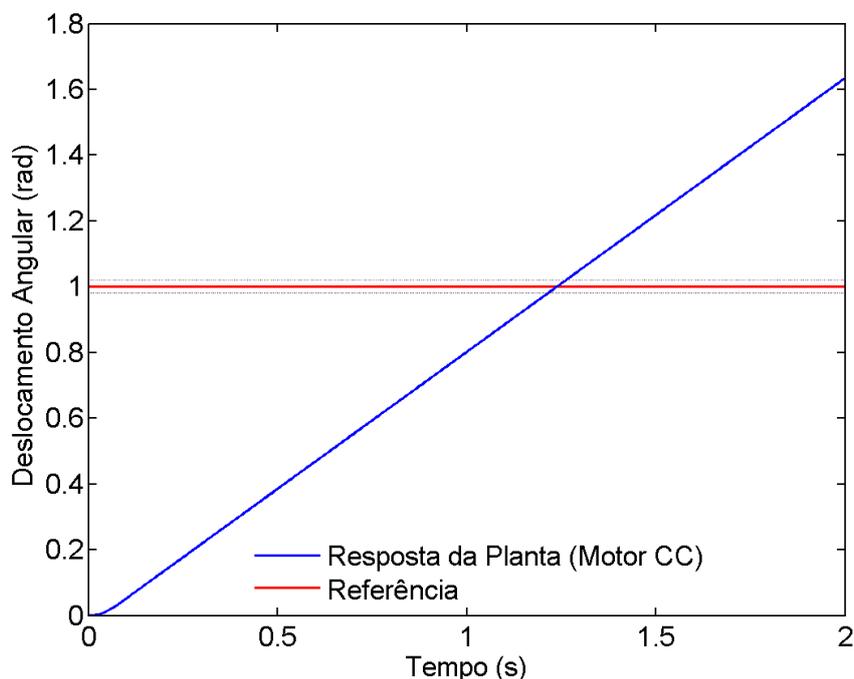


Figura 27 - Resposta do sistema à entrada ao degrau unitário sem controlador

Fonte: Autoria própria (2013).

A análise do comportamento da curva do sistema ao degrau unitário (não apresenta aspecto de “S”) confirma a não utilização do primeiro método, além de

evidenciar a necessidade da planta de ser controlada. Sendo assim, o ponto de partida para a aplicação do 2º método de Ziegler-Nichols é adotar $T_i=\infty$ e $T_d=0$ conforme diagrama de blocos da Figura 28, resultando na função de transferência de malha aberta para $D(s)=0$, representada na Equação (38).

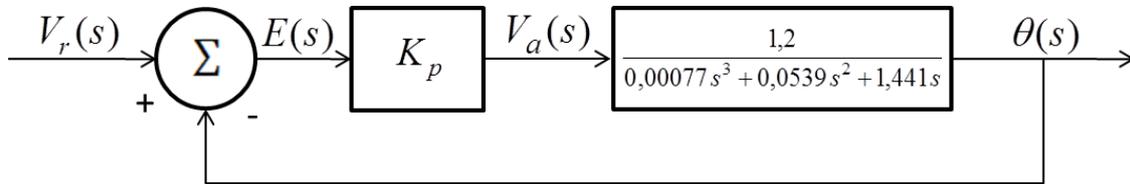


Figura 28 - Diagrama de blocos do sistema com controle proporcional

Fonte: Autoria própria (2013).

$$\frac{\theta(s)}{E(s)} = \frac{1,2K_p}{0,00077s^3 + 0,0539s^2 + 1,441s + 1,2K_p} \quad (38)$$

O valor de K_p que torna o sistema marginalmente estável pode ser obtido através do critério de estabilidade de Routh. Dessa forma, a Equação característica do sistema em malha fechada é dada pela Equação (39):

$$0,00077s^3 + 0,0539s^2 + 1,441s + 1,2K_p = 0 \quad (39)$$

A partir da Equação característica aplica-se o critério de Routh conforme descrito na Tabela 6.

Tabela 6 - Critério de estabilidade de Routh

s^3	0,00077	1,441
s^2	0,0539	$1,2K_p$
s^1	$\frac{0,0776699 - 0,000924K_p}{0,0539}$	
s^0	K_p	

Fonte: Autoria própria (2013).

Examinando os coeficientes da 2ª coluna e 3ª linha da Tabela 6 (igualando os coeficientes a 0) foi determinado que $K_p=84,05$, de onde se pode concluir que oscilações sustentadas vão existir. Portanto, o valor crítico K_{cr} é igual a 84,05.

A Equação característica resulta em:

$$0,00077s^3 + 0,0539s^2 + 1,441s + 100,86 = 0 \quad (40)$$

Para encontrar a frequência de oscilação sustentada, substitui-se $s=j\omega$ na Equação característica (40) e obtém-se:

$$0,00077(j\omega)^3 + 0,0539(j\omega)^2 + 1,441(j\omega) + 100,86 = 0$$

$$\omega = 6,01 \text{ rad/s}$$

Dessa forma, o período de oscilação sustentada é dado por:

$$P_{cr} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{6,01} = 1,045s$$

Obtidos os valores de K_{cr} e P_{cr} utiliza-se a Tabela 2 referente à 2ª regra de Ziegler-Nichols para determinar os valores de K_p , T_i e T_d :

$$K_p = 0,6K_{cr} = 0,6 \times 84,05 = 50,43$$

$$T_i = 0,5P_{cr} = 0,5 \times 1,045 = 0,5225s$$

$$T_d = 0,125P_{cr} = 0,125 \times 1,045 = 0,1306s$$

Tendo em vista que $K_i = K_p / T_i$ e $K_d = K_p \times T_d$, foram extraídos os valores de $K_p = 50,430$, $K_i = 96,510$ e $K_d = 6,580$. Com base nesses resultados, foram definidos no AG os respectivos intervalos de busca para os controladores G_{c1} e G_{c2} : $0,000 \leq K_{p1} \leq 50,430$; $0,000 \leq K_{i1} \leq 96,510$; $0,000 \leq K_{d1} \leq 6,580$; $0,000 \leq K_{p2} \leq 50,430$; $0,000 \leq K_{i2} \leq 96,510$; $0,000 \leq K_{d2} \leq 6,580$.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo serão apresentados os resultados de testes aplicando o Algoritmo Genético proposto. Para validar a técnica utilizada serão apresentadas comparações com os Algoritmos desenvolvidos por Adhikari *et al* (2012), Neenu e Pongodi (2009) e Bindu *et al* (2012). As simulações foram implementadas no software MATLAB (do inglês *MATrix LABborary*) 7.12.0 (R2011a), em um processador AMD Athlon™ II P340 Dual-Core (2,2 GHz de clock) 2GB de memória RAM.

Em todas as simulações aplicou-se para seleção o método do ordenamento, descrito em detalhes na Seção 2.5.6 do Capítulo 2, e foram fixadas probabilidades de mutação em 1%, cruzamento em 80% e elitismo em 75%. Estes valores foram obtidos após resultados de simulações que mostraram que o aumento da probabilidade de mutação não conduziu à perda de diversidade da população, além de não apresentar ganho significativo no que se refere à convergência do algoritmo. No que se refere às taxas de cruzamento e elitismo, foi verificado nas simulações que as respectivas probabilidades de 80% e 75% garantem a inserção de novos indivíduos e a diversidade da população a cada interação.

As simulações foram realizadas conforme sugerido pelo teorema da superposição aplicado a sistemas lineares, o qual estabelece que a resposta de um sistema (saída $\Theta(s)$) à aplicação simultânea de duas perturbações (entradas $V_r(s)$ e $D(s)$) é igual à soma das respostas do sistema às duas perturbações introduzidas separadamente (OGATA, 2010; MAYA e LEONARDI, 2011). Dessa forma, através da simulação do AG proposto, considerando apenas a entrada $V_r(s)$ (como sendo um degrau unitário) e conseqüentemente $D(s)=0$, os seguintes valores ótimos para os ganhos do controlador G_{cl} foram obtidos: $K_{pl} = 7,166$, $K_{il} = 0,003$ e $K_{dl} = 0,207$.

A partir dos ganhos obtidos neste trabalho, verifica-se inicialmente o comportamento das respostas do sistema sintonizado por Ziegler-Nichols, Figura 29, e o Algoritmo Genético proposto na Figura 30.

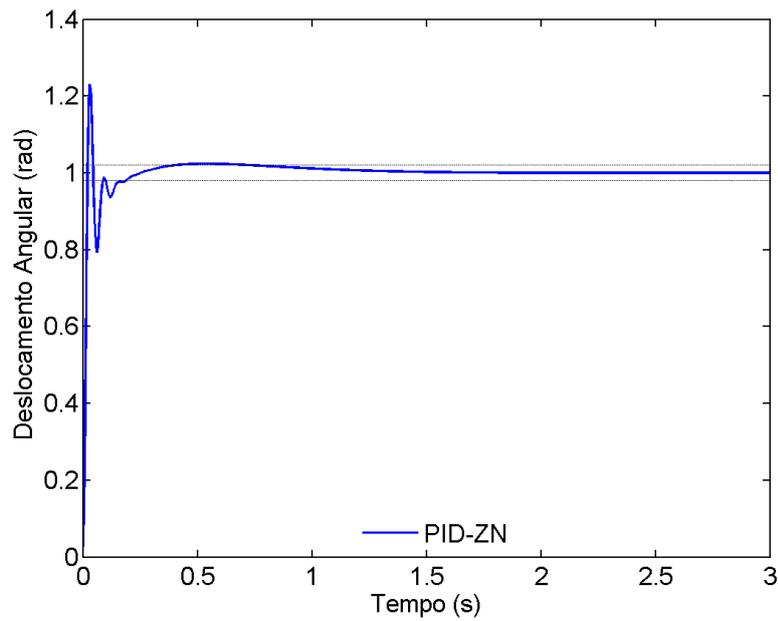


Figura 29 - Resposta à entrada degrau unitário (V_r) do sistema controlado pelo PID ajustado através da técnica de Ziegler-Nichols

Fonte: Autoria própria (2013).

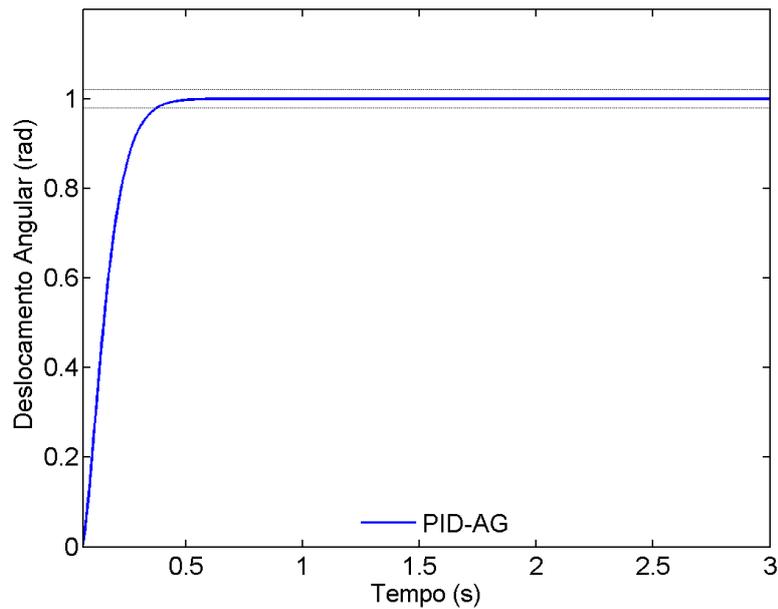


Figura 30 - Resposta à entrada degrau unitário (V_r) do sistema controlado pelo PID ajustado através da técnica do Algoritmo Genético proposto

Fonte: Autoria própria (2013).

De acordo com os gráficos das Figuras 29 e 30, podemos destacar a superioridade do desempenho do AG frente ao método tradicional de sintonia de PID proposto por Ziegler-Nichols. O qual apresentou resultados de tempo de acomodação em torno de 400ms e máximo sobressinal igual a 23,07%, consideravelmente superiores

aos valores alcançados pelo AG proposto, que foram de 307ms para o tempo de acomodação e máximo de sobressinal nulo (0%), conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Comparação entre os resultados

Método de Sintonia	Tempo de Subida	Tempo de Acomodação	Máximo Sobressinal
AG – Adhikari <i>et al</i> (2012)	161ms	700ms	1%
AG – Bindu <i>et al</i> (2012)	175ms	336ms	0%
AG – Proposto	135ms	307ms	0%
ZN – Proposto	18ms	400ms	23,07%

Fonte: Autoria própria (2013).

Os dados apresentados na Tabela 7 mostram uma análise comparativa entre os resultados fornecidos pelo AG proposto neste trabalho e os resultados apresentados por Adhikari *et al* (2012) e Bindu *et al* (2012). De modo geral, é possível observar resultados significantes com uso do AG proposto quando comparados com os resultados apresentados publicados na literatura. Sobretudo no que se refere aos tempos de subida, acomodação e máximo sobressinal.

De acordo com Bazanella e Silva (2005), os efeitos de perturbações ou distúrbios de carga na saída do processo em sistemas de controle devem ser minimizados ou completamente anulados, após um determinado período transitório. Dessa forma, com base nos ganhos obtidos para o controlador G_{c1} , o AG realiza automaticamente a sintonia do compensador de distúrbios, G_{c2} , o qual é submetido a uma entrada $D(s)$ em degrau unitário (considerando a entrada $V_r(s)=0$).

Os seguintes valores para os ganhos do compensador G_{c2} e a respectiva resposta do sistema, Figura 31, foram obtidos: $K_{p2} = 0,138$, $K_{i2} = 0$ e $K_{d2} = 0,004$. De acordo com os ganhos obtidos para compensador de distúrbio, verifica-se que o AG projetou um controlador do tipo PD, fato que está de acordo com o controle por ação *Feedforward* (controle por avanço) (MAYA e LEONARDI, 2011). No gráfico da Figura 31 pode-se observar que a perturbação aplicada ao sistema apresentou um reduzido sobressinal de aproximadamente 1,08%, sendo o distúrbio praticamente rejeitado (erro em regime permanente em torno de 0,13%) no tempo de apenas 118ms. Nesse caso, pode-se dizer que houve uma rejeição assintótica à perturbação.

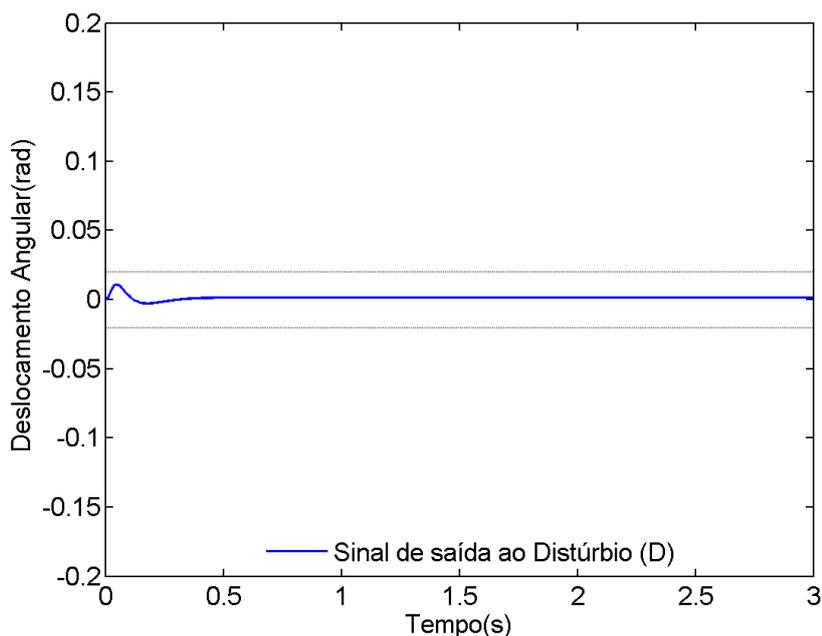


Figura 31 - Resposta à entrada ao degrau unitário (D) referente ao Distúrbio

Fonte: Autoria própria (2013).

A seguir é realizada uma análise comparativa a partir da representação gráfica do sinal de saída $\Theta(s)$ resultante da aplicação do teorema da superposição entre os sinais de entrada em degrau unitário $V_r(s)$ (aplicado no tempo de 0s) e o de distúrbio $D(s)$ (aplicado no tempo de 1s), para os controladores sintonizados pelo AG proposto neste trabalho, Figura 32, e pelos Algoritmos de Bindu *et al* (2012) e Neenu e Pongodi (2009), representados pelas Figuras 33 e 34.

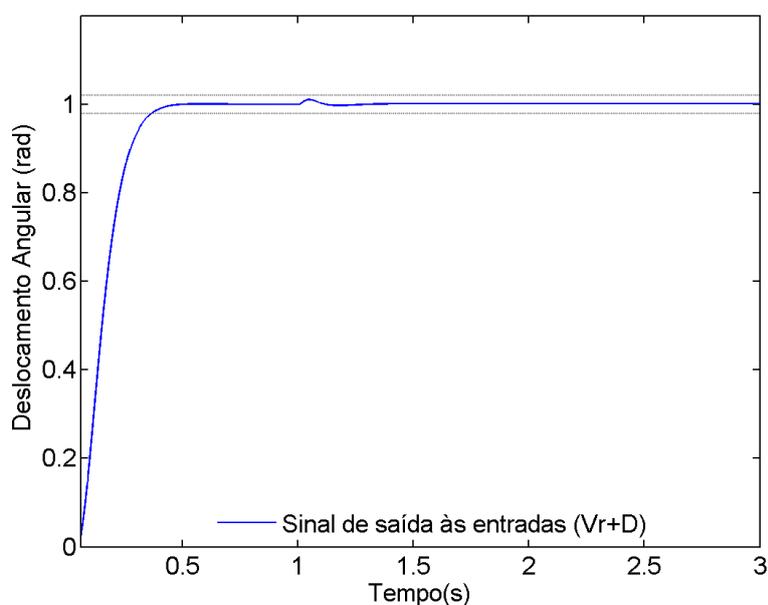


Figura 32 - Resposta às entradas ao degrau unitário (V_r+D) a partir dos ajustes obtidos do AG proposto neste trabalho

Fonte: Autoria própria (2013).

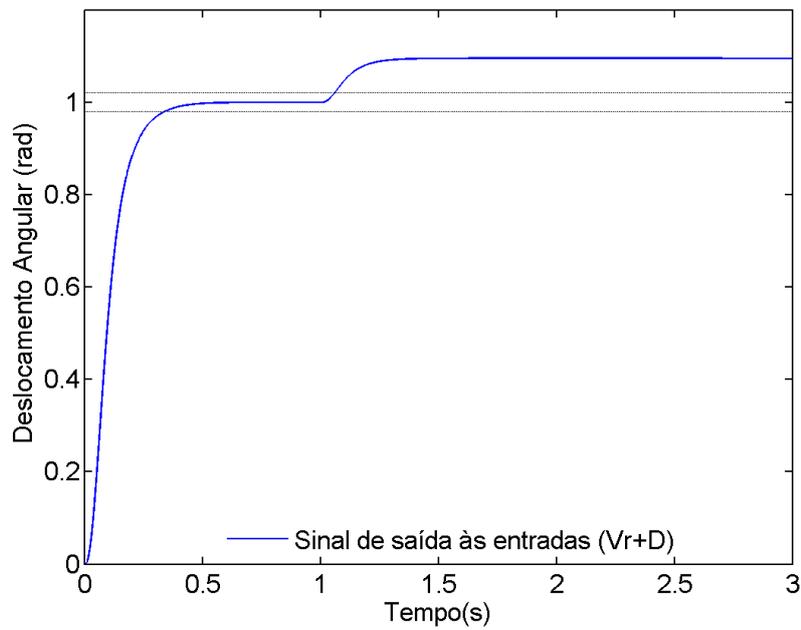


Figura 33 - Resposta às entradas ao degrau unitário (V_r+D) a partir dos ajustes obtidos do AG proposto por Bindu *et al* (2012)

Fonte: Adaptado de Bindu *et al* (2012).

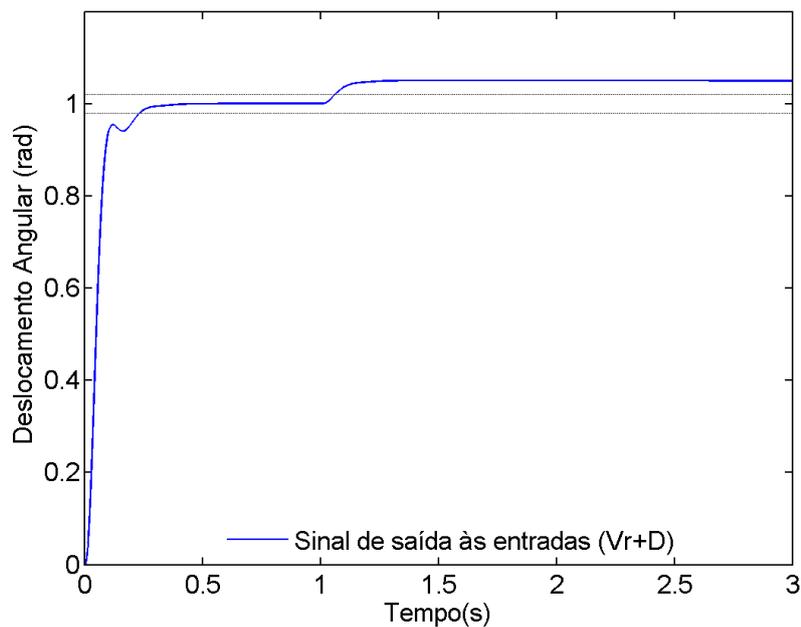


Figura 34 - Resposta às entradas ao degrau unitário (V_r+D) a partir dos ajustes obtidos do AG proposto por Neenu e Pongodi (2009)

Fonte: Adaptado de Neenu e Pongodi (2009).

O gráfico da Figura 32 e os resultados da Tabela 7 mostram que o método de sintonia de controladores PID pelo AG proposto neste trabalho, de modo geral, apresentou resultados satisfatórios da resposta do sistema tanto em regime transitório

quanto em regime permanente quando comparados com os publicados na literatura (Figuras 33 e 34).

A principal contribuição da técnica de sintonia utilizada neste trabalho pode ser verificada no estado estacionário (ou regime permanente) da resposta do sistema. A partir do qual se pôde observar que, com a aplicação de um distúrbio em degrau unitário no tempo $t=1s$, os ajustes do controlador PID proposto pelo AG de Bindu *et al* (2012), Figura 33, rejeitou apenas parcialmente a perturbação simulada, apresentando erro em regime permanente de aproximadamente 9,53% no tempo de 500ms. Analogamente, os ajustes para o controlador PID proposto pelo AG de Neenu e Pongodi (2009), Figura 34, também rejeitou parcialmente a perturbação, apresentando valores inferiores, em torno de 5,05% para o erro em regime permanente em um tempo de aproximadamente 300ms. Dessa forma, o AG proposto neste trabalho é o único que permite uma rejeição assintótica (total) à perturbação, não saindo da faixa limitante para a entrada do sinal em regime permanente de 2% (máximo sobressinal de apenas 1,08%), além de reduzir o erro em regime permanente para 0,13% em um tempo de apenas 118ms conforme já mencionado.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, foi realizada a sintonia de um controlador PID e projetado um compensador de distúrbio do tipo PD a partir da utilização da técnica de sintonia tradicional de Ziegler-Nichols aplicada em conjunto com a técnica de otimização baseada em Algoritmos Genéticos. A aplicação do AG foi direcionada para o controle de posição do rotor de um motor de corrente contínua abordado. De acordo com resultados obtidos, o método de sintonia do controlador PID usando AG mostrou uma melhor performance quando comparado com o método tradicional de Ziegler-Nichols para o controle de posição do rotor do motor CC. Além disso, pode-se concluir que a importância da aplicação prévia do ZN na sintonia dos controladores se deve ao fato de, permitir a obtenção do ponto de partida para a definição dos intervalos de busca dos ganhos proporcional, integral e derivativo.

A validação da técnica utilizada foi possível a partir da comparação dos resultados com os de outros métodos publicados na literatura, apresentando ganhos que garantiram uma resposta satisfatória no que se refere à minimização dos tempos de subida, acomodação e sobressinal analisados.

A principal contribuição do AG proposto neste trabalho é a sintonia do controlador PID para controle do sistema e, consecutivamente o êxito na compensação de distúrbios, por meio do projeto de um controlador PD (por ação *Feedforward*), que venha a ser submetido o motor de corrente contínua em estudo. Tendo em vista que a técnica de sintonia proposta neste trabalho permitiu uma rejeição assintótica, e não parcial, à perturbação aplicada.

Como trabalhos futuros propõe-se a aplicação de um Algoritmo Genético Adaptativo (AGA) para a obtenção dos ganhos do controlador PID para a planta do motor de corrente contínua em estudo, utilizando a rejeição de distúrbios por meio da implementação da ação de controle *Feedforward*, para uma posterior comparação com os resultados fornecidos pelo AG proposto neste trabalho. Um segundo trabalho consiste na implementação do Algoritmo desenvolvido neste trabalho para a otimização da *Toolbox* GACT (do inglês *Genetic Algorithm Control Tool*), a qual foi desenvolvida para aplicações em sistemas de controle e fundamenta-se na aplicação conjunta de AG com a teoria de controle clássico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADHIKARI, N. P.; CHOUBEY, M.; SINGH, R. Dc Motor Control Using Ziegler Nichols and Genetic Algorithm Tecnique. **International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering**, Jabalpur, v. 1, p. 33-36, 15 Abril 2012. ISSN 2277-2626. Department of Electrical Engineering, Gyan Ganga College of Technology.
- ALFARO-CID, E.; MCGOOKING, E. W.; MURRAY-SMITH, D. J. A comparative study of genetic operators for controller parameter optimization. **Control Engineering Practice**, v. 17, n. 1, p. 185-197, Janeiro 2009. ISSN 0967-0661. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2008.06.001>
- ALIEV, F. A.; LARIN V. B. **Optimization of Linear Control Systems: Analytical Methods and Computational Algorithms**. 8ª ed. Amsterdam: Taylor & Francis, 1998.
- ANDRADE, A. *et al.* Analisis of selection and crossover methods used by genetic algorithm-based heuristic to solve the lsp allocation problem in mp1s networks under capacity constraints. **Proceedings of International Conference on Engineering Optimization**. [S.l:s.n.], 2008.
- BARCELOS, J. C. H. **Algoritmos genéticos adaptativos: Um estudo comparativo**. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 131. 2000.
- BAZANELLA, A. S.; SILVA, J. M. G. **Sistemas de Controle: princípios e métodos de projeto**. 1ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.
- BESSAOU, M.; SIARRY, P. A genetic algorithm with real-value coding to optimize multimodal continuous functions. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, 23, Dezembro 2001. 63-74.
- BINDU, R.; NAMBOOTHIRIPAD M. K. Tuning of PID Controller for DC Servo Motor using Genetic Algorithm. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 2, n. 3, Março 2012. ISSN 2250-2459.
- CAMPESTRINI, L. **Sintonia de controladores PID descentralizados baseada no método do ponto crítico**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia. Porto Alegre, p. 12. 2006.

- CANIATO, L. C. **Modelagem e controle de nível e temperatura em sistema de armazenamento de água purificada para uso em empresa farmacêutica.** Escola de Engenharia de Mauá. São Caetano do Sul, p. 156. 2006.
- COSTA, J. C.; TAVARES, R.; ROSA, A. An experimental study on dynamic random variation of population size. **IEEE SMC'99 Conference on Systems, Man, and Cybernetics**, Tokyo, 1, 1999. 607-612. Digital Object Identifier: 10.1109/ICSMC.1999.814161.
- CZARKOWSKI, D. **Identification and Optimization PID parameters using MATLAB.** Cork Institute of Technology, Gdynia Maritime University. Poland, p. 22. 2002.
- DAGLI, C. H.; SCHIERHOLT, K. Evaluating the performance of the genetic neuro scheduler using constant as well as changing crossover and mutation rates. **Proceedings of the 21st international conference on Computers and industrial engineering**, 33, Outubro 1997. 253-256. [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-8352\(97\)00086-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-8352(97)00086-7).
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Moderno.** 11ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- ENGELBRECHT, A. P. **Computational Intelligence: An Introduction.** 2ª. ed. Pretoria: John Wiley e Sons, 2007.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. J.; STEPHEN, D. U. **Máquinas Elétricas: Com introdução à eletrônica de potência.** 6ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- GEROMEL, J. C.; PALHARES, A. G. B. **Análise linear de sistemas dinâmicos.** São Paulo: Edgard-Blucher, 2004.
- GOLDSCHMIDT, R. R. **Uma Introdução à Inteligência Computacional: fundamentos, ferramentas e aplicações.** 1ª. ed. Rio de Janeiro: IST-Rio, 2010.
- HAUPT, R. I.; HAUPT, S. E. **Practical Genetic Algorithms.** 1ª. ed. New York: Wiley, 1998.
- HAYKIN, S.; VEEN, B. **Sinais e Sistemas.** Porto Alegre: Bookman, 2001.
- HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence.** New York: Ann Arbor, 1975.
- LI, Q. *et al.* The Application of Fuzzy Control in Liquid Level System. **IEEE International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA)**, 3, 13-14 Março 2010. 776-778.

- LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos: Uma Importante Ferramenta da Inteligência Computacional**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2008.
- LUIZELLI, M. C.; GARCIA, V. J. Análise Comparativa entre Heurísticas e Metaheurísticas Aplicadas ao Problema de Roteamento de Veículos. **XXIV Congresso Regional de Iniciação e Tecnológica em Engenharia (CRICTE)**, Alegrete, 2010. Disponível em http://alegrete.unipampa.edu.br/gesep/wpcontent/uploads/2010/05/CRICTE_2010_Analise_heurísticas_roteamento.pdf. Acessado em: 12/08/2012.
- MAYA, P. A.; LEONARDI F. **Controle Essencial**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2011.
- MELOTTI, G. *et al.* Sintonia de Controlador PID Usando Rede Imunológica Artificial. **XVII Congresso Brasileiro de Automática**, Juiz de Fora, 14-17 Setembro 2008.
- MICHALEWICZ, Z. **Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs**. 3ª. ed. New York: Springer-Verlag, 1996.
- MOGNON, V. R. **Algoritmos Genéticos Aplicados na Otimização de Antenas**. Universidade Federal do Paraná (UFPR). Curitiba, p. 13. 2004.
- NASCIMENTO, F. T. **Algoritmos Genéticos para Síntese de Filtros Aplicados em Controle por Modo Deslizante**. Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Rio de Janeiro, p. 91. 2010.
- NASCIMENTO, L. S. V. **Estudo da operação otimizada aplicada a um sistema de reservatórios destinado à geração de energia elétrica**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 41. 2006.
- NEENU, T.; POONGODI, P. Position control of DC motor using genetic algorithm based PID controller. **Proceedings of the World Congress on Engineering (WCE)**, London, 2, 1-3 Julho 2009.
- NETO, A. F. S.; GOMES, F. J. Controladores PID: Introduzindo Inteligência Computacional no controle industrial. **XXXVIII Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE)**, Fortaleza, Setembro 2010.
- OGATA, K. **Modern Control Engineering**. 3ª. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1997.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª. ed. São Paulo: Pearson Education, 2010.
- PACHECO, M. A. **Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: ICA-Rio, 1999. ICA: Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada - www.ica.ele.puc-rio.br.

- PEREIRA, J. P. P. **Aplicação de Algoritmos Genéticos ao problema de planejamento de caminhos com a abordagem de Decomposição em Células Convexas para o caso aproximado.** Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA). Mossoró. p. 02. 2012.
- PIMENTA, E. C. C. **Efeitos de Afundamentos de Tensão no Processo de Laminação Industrial.** Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. Belo Horizonte. P. 12. 2010.
- RENER, G.; EKART, A. Genetic algorithms in computer aided design. **Computer aided Design**, 35, 2003. 709-726.
- SANTOS, F. G. *et al.* Métodos de Sintonia de Controladores PI/PID Aplicados a um Sistema de Nível. **X Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)**, São João Del-Rei, 18-21 Setembro 2011. 707-712.
- TENG, T. K.; SHIEH, J. S.; CHEN, C. S. Genetic algorithms applied in online autotuning PID parameters of a liquid-level control system. **Transactions of the Institute of Measurement and Control**, Taiwan, 25, Dezembro 2003. 433-450. <http://tim.sagepub.com/content/25/5/433>.
- YALCINOZ, Y.; ALTUN, H. Environmentally constrained economic dispatch via a genetic algorithm with arithmetic crossover. **IEEE AFRICON Conference**, George, 2, Outubro 2002. 923-928.