

Sintonia de controladores PID por algoritmos
genéticos.

Gerson Rizzo

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

São Paulo
2002

CONSULTA

FD-3034

04

Sintonia de controladores PID por algoritmos genéticos.

Gerson Rizzo

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Decio Crisol Donha

São Paulo
2002

A meus pais,
José (in memoriam) e Anna

Agradecimentos

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Decio Crisol Donha pelo apoio e pela imprescindível colaboração.

Aos Professores Dr. Oswaldo Horikawa e Dr. Oscar Brito Augusto cujas sugestões e críticas contribuíram para enriquecer o trabalho.

A minha família, pelo apoio e incentivo constantes.

A todos os meus colegas que de alguma forma, contribuíram para a realização do trabalho.

Este trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES.

Sumário

Lista de Figuras	IV
Lista de Tabelas	IX
Lista de Símbolos	XI
Resumo	XV
Abstract	XVI
1 Introdução	1
1.1 Objetivos do trabalho e metodologia	1
1.2 Organização do trabalho	3
1.3 Revisão bibliográfica	4
2 Algoritmos Genéticos	9
2.1 Uma breve história dos AGs	9

II	
27	2.4 O AG como otimizador de funções
29	2.5 Comparação entre os AGs com população binária e decimal
34	3 Turbinas eólicas
34	3.1 Desenvolvimento das turbinas eólicas
41	3.2 Regulagem do ângulo das pás
43	3.3 Descrição do modelo matemático utilizado
43	3.3.1 Aerodinâmica
45	3.3.2 Distúrbio de vento turbulento
46	3.3.3 Distúrbio rotacional
47	3.3.4 Dinâmica do conjunto turbo-gerador
48	3.3.5 Atraso de indução
49	3.3.6 Transdutor de medida
49	3.3.7 Atuador
49	3.3.8 Controlador
51	3.3.9 Os ganhos aerodinâmicos K_φ e K_v
54	3.4 Redução de ordem do conjunto turbo-gerador
63	4 Validação do AG
63	4.1 Validação do AG
64	4.2 Controlador PID
66	4.3 Exemplo 1
67	4.3.1 Método baseado no ganho crítico

III	
	4.3.2 Projeto do controlador PID utilizando o AG 73
	4.4 Exemplo 2 84
	4.4.1 Critério ITAE 85
	4.4.2 Projeto do controlador PID utilizando o AG 91
	5 Projeto de um controlador para turbina eólica 101
	5.1 Caso 1: Velocidade do vento - 15,706 m/s 103
	5.2 Caso 2: Velocidade do vento - 12,654 m/s 115
	5.3 Caso 3: Velocidade do vento - 18,845 m/s 120
	5.4 Rejeição ao distúrbio 125
6 Conclusão	133
	6.1 Análise do trabalho realizado 133
	6.2 Proposta de continuidade 135
	Referências bibliográficas 137
	Apêndice I

Lista de Figuras

2.1	Fluxograma do AG	14
2.2	Roleta da sorte	16
2.3	Seleção por torneio	18
2.4	Gráfico da função $f(x)$	28
2.5	Maximização da função $f(x)$	28
2.6	Minimização da função $f(x)$	29
3.1	Turbina eólica do tipo HAWT	39
3.2	Turbina eólica do tipo VAWT	40
3.3	Potência versus velocidade do vento	42
3.4	Forças de sustentação e arrasto	43
3.5	Esquema do conjunto turbo-gerador	47
3.6	Modelo de controle da turbina de vento	51
3.7	Entrada a degrau unitário	59
3.8	Entrada a impulso unitário	59
3.9	Entrada a rampa	60

4.1	Diagrama de blocos do controlador PID	64
4.2	Diagrama de blocos com as funções de transferências	65
4.3	Diagrama do sistema	69
4.4	Resposta do sistema em malha fechada	70
4.5	Resposta em malha fechada	71
4.6	Resposta do sistema - Primeira sintonia	72
4.7	Resposta do sistema com sintonia fina	73
4.8	Diagrama do processo de determinação do controlador PID	74
4.9	Resposta com PID sintonizado pelo AG	76
4.10	Evolução do índice de desempenho	77
4.11	Resposta com PID sintonizado pelo AG	78
4.12	Evolução do índice de desempenho	79
4.13	Resposta com PID sintonizado pelo AG	80
4.14	Evolução do índice de desempenho	81
4.15	Resposta com PID sintonizado pelo AG	81
4.16	Evolução do índice de desempenho	82
4.17	Sistema de controle de velocidade	87
4.18	Sistema de controle de velocidade	89

5.9	Evolução do índice de desempenho	110
5.8	Resposta ao degraú unitário: AG	109
5.7	Evolução do índice de desempenho	108
5.6	Resposta ao degraú unitário: AG	108
5.5	Evolução do índice de desempenho	107
5.4	Resposta ao degraú unitário: AG	106
5.3	Evolução do índice de desempenho	105
5.2	Resposta ao degraú unitário: AG	104
5.1	Resposta ao degraú unitário: PI	103
4.29	Resposta dos controladores ao degraú unitário	100
4.28	Resposta dos controladores ao degraú unitário	100
4.27	Evolução do índice de desempenho	97
4.26	Resposta ao degraú unitário	97
4.25	Evolução do índice de desempenho	96
4.24	Resposta ao degraú unitário	95
4.23	Evolução do índice de desempenho	94
4.22	Resposta ao degraú unitário	93
4.21	Evolução do índice de desempenho	93
4.20	Resposta ao degraú unitário	92
4.19	Resposta do sistema ao degraú unitário	90

5.10 Resposta ao degrau unitário: AG	111
5.11 Evolução do índice de desempenho	112
5.12 Resposta ao degrau unitário: AG	113
5.13 Evolução do índice de desempenho	113
5.14 Resposta ao degrau unitário: PI	116
5.15 Resposta ao degrau unitário: AG	117
5.16 Evolução do índice de desempenho	117
5.17 Resposta ao degrau unitário: AG	118
5.18 Evolução do índice de desempenho	119
5.19 Resposta ao degrau unitário: AG	120
5.20 Resposta ao degrau unitário: AG	121
5.21 Evolução do índice de desempenho	122
5.22 Resposta ao degrau unitário: AG	123
5.23 Evolução do índice de desempenho	124
5.24 Sinais de saída da turbina eólica	125
5.25 Sinais de saída da turbina eólica	126
5.26 Sinais de saída da turbina eólica	126
5.27 Sinais de saída da turbina eólica	127
5.28 Sinais de saída da turbina eólica	128
5.29 Diagrama de Bode do sistema: PI	129
5.30 Diagrama de Bode do sistema: PID	129

5.31 Diagrama de Bode do sistema: PI 130

5.32 Diagrama de Bode do sistema: PID 131

Lista de Tabelas

2.1	Primeira geração	23
2.2	Seleção e cruzamento	24
2.3	Segunda geração	25
2.4	Seleção e cruzamento	26
2.5	População final	26
2.6	Tabela comparativa entre a população decimal e binária	32
2.7	Tabela comparativa entre a população decimal e binária	33
3.1	Tabela de ganhos do controlador	50
3.2	Ganhos aerodinâmicos	52
4.1	Tabela do método Ziegler-Nichols	68
4.2	Método de Routh	69
4.3	Tabela comparativa de valores	83
4.4	Coefficientes ótimos de $T(s)$ no critério ITAE para uma entrada degrau.	86
4.5	Tabela comparativa de valores	98

4.5	Tabla comparativa de valores	98
5.1	Tabla comparativa de valores: Caso 1	114
5.2	Tabla comparativa de valores: Caso 2	119
5.3	Tabla comparativa de valores: Caso 3	124

Lista de Símbolos

Valores de aptidão	f_i
Valor de aptidão para o truncamento sigma	g_i
Comprimento do cromossomo	l
Número de indivíduos	n
Por definição	\equiv
Valor acumulativo de cada indivíduo	r_j
Número aleatório	u
Velocidade do vento	U
Velocidade relativa	V_r
Velocidade de translação	v
Força de sustentação	L
Pressão aerodinâmica	p_d
Densidade do ar	ρ
Largura da área projetada	A_p

XII

D	Força de arrasto
C_L	Coefficiente de sustentação
C_D	Coefficiente de arrasto
α	Angulo de ataque
W_T	Distúrbio turbulento
$W_{3\omega}$	Distúrbio rotacional
$D(s)$	Função de transferência do conjunto turbo-gerador
$I(s)$	Atraso de indução
$T(s)$	Transdutor de medida
$A(s)$	Atuador
C	Controlador
K_φ	Ganho no torque aerodinâmico
K_v	Ganho na velocidade do vento
P_o	Valor de referência da potência elétrica
P_e	Potência elétrica
P_m	Potência elétrica medida
ϕ_a	Angulo desejado
ϕ_a	Angulo real

XIII

Sinais de entrada com ruído branco	$w, \omega, \omega_{III}, \omega_{II}, \omega_{I}$
Torque aerodinâmico com pré-atraso de indução	T_f^i
Torque aerodinâmico	T_f
Função de transferência do sistema original	$H(s)$
Função de transferência do sistema reduzido	$L(s)$
Coefficientes de L(s)	d_1, d_2
Denominador de H(s)	$M(s)$
Denominador de L(s)	$\Delta(s)$
Sinal de saída	$c(t)$
Sinal de entrada	$r(t)$
Ganho proporcional	K_p
Ganho integral	K_i
Ganho derivativo	K_d
Erro entre a entrada e a saída	$e(t)$
Função de transferência do controlador	G_c
Tempo de acomodação	t_a
Tempo de subida	t_s
Sobre-sinal máximo	M_p

Erro em regime permanente	e_r
Tempo integrativo	T_i
Tempo derivativo	T_d
Ganho crítico	K_{cr}
Período crítico	P_{cr}
Frequência natural	ω
Parte real de um número complexo	σ
Índice de desempenho	ID
Coefficiente de amortecimento	ζ
Função de transferência em malha fechada do critério ITAE	$T(s)$
Constante de peso no tempo	k_1
Coefficientes do índice de desempenho	k_2, k_3, k_4, k_5
Frequência de corte	ω_c

Resumo

Este trabalho trata da sintonia de controladores com auxílio de um algoritmo genético.

O método aqui proposto foi utilizado para a sintonia de controladores do tipo proporcional, integral e derivativo (PID).

O trabalho apresenta uma validação dos procedimentos através da comparação do desempenho de controladores projetados usando técnicas clássicas àquelas projetados com auxílio do algoritmo genético.

A técnica de sintonia proposta é então aplicada ao projeto do controlador PID para uma turbina eólica. Resultados de simulações são apresentados e analisados, e também neste caso, comparados com as simulações obtidas com os controladores projetados de forma clássica.

Abstract

This work deals with the tuning of controllers by means of a genetic algorithm. A proportional, integral and derivative (PID) controller was tuned using the proposed method. The work includes a procedure validation through performance comparison between controllers designed using classical techniques and those projected with aid of a genetic algorithm. The tuning method is then applied to synthesize a PID for a wind turbine. Results of simulations are presented, analyzed and also compared to those obtained from simulations on controllers designed by classical methods.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Objetivos do trabalho e metodologia

Na literatura podemos encontrar diversos trabalhos que descrevem téc-

nicas para sintonizar controladores clássicos. Em especial, podemos citar

técnicas consagradas, como o critério ITAE e os métodos de Ziegler-Nichols

(método da resposta ao degrau e método baseado no ganho crítico) que são

utilizadas para sintonizar os ganhos dos controladores, que podem combinar

ações proporcional e/ou integral e/ou derivativa.

O objetivo do trabalho proposto é a investigação de uma técnica alterna-

tiva às acima mencionadas. Esta técnica consiste em utilizar um algoritmo

genético, doravante denominado AG, para a sintonia de controladores PID.

O AG é utilizado para estabelecer um método numérico de busca de

valores ótimos. A busca é realizada por meio de operadores genéticos que manipulam as possíveis soluções (indivíduos da população), que são avaliadas por um índice de desempenho. Por uma característica própria do AG, o método concentra-se nas soluções mais promissoras.

Neste trabalho, programamos o AG para gerar três parâmetros correspondentes aos três ganhos para sintonizar o controlador PID. De cada indivíduo da população, são extraídos três parâmetros que são decodificados posteriormente. Um índice de desempenho é definido para a escolha da melhor solução.

O método desenvolvido foi utilizado no projeto de um controlador PID para uma turbina eólica.

O algoritmo desenvolvido com o auxílio do AG tem por objetivo produzir um controlador ótimo que estabilize a potência da turbina eólica num valor desejado. O AG deve sintonizar controladores distintos para valores diferentes de velocidade do vento.

1.2 Organização do trabalho

O capítulo 2 apresenta uma introdução aos AGs. São descritas as principais características do AG, bem como as funções dos operadores genéticos e aplicações práticas de um AG.

No capítulo 3 são introduzidas as noções sobre funcionamento de turbinas eólicas, suas características e o problema de controle para turbinas eólicas de eixo horizontal, objeto deste trabalho.

Este capítulo apresenta ainda, o modelo de uma turbina eólica, adaptado para o trabalho. Nele apresentamos a descrição completa do modelo da turbina eólica escolhida.

Os capítulos seguintes descrevem os resultados e análises da aplicação do AG para a sintonia de controladores PID. O capítulo 4 apresenta duas aplicações a sistemas distintos, onde o objetivo é validar o algoritmo desenvolvido.

No capítulo 5, a técnica de sintonia do controlador PID auxiliado pelo AG é aplicada ao modelo de turbina eólica. No capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões e sugestões de continuidade.

1.3 Revisão bibliográfica

As referências bibliográficas descritas a seguir incluem informações relativas às três áreas distintas: AGs, turbinas eólicas e controle.

Foi utilizado inicialmente o livro de GOLDBERG (1989), considerado um livro seminal na área dos AGs. Nele encontramos, um extenso trabalho teórico e de introdução aos conceitos fundamentais do AG, com exemplos ilustrativos para os conceitos abordados. No livro de MITCHELL (1999), encontramos uma abordagem didática dos fundamentos dos AGs, com exemplos introdutórios que complementam estes conceitos.

Recomendamos o livro de Holland (1992), também considerado um livro seminal na área dos AGs. Constitui-se num livro para estudos mais avançados, por ser de difícil leitura e por abranger aplicações em áreas como biologia, controle e inteligência artificial.

Para consultas rápidas podemos citar o livro de COLEY (1999), que aborda de forma mais sucinta que os dois primeiros, os conceitos principais de um AG. Foram consultados ainda, trabalhos de menor envergadura como o de BARBOSA (1997), que apresenta os AGs comparando-os aos métodos tradicionais de solução numérica e avalia o desempenho do AG no processo de busca de soluções. Em CAO; WU (1999), é realizada uma introdução rápida aos operadores genéticos que são apresentados em códigos para Matlab.

O trabalho de BULMEER aborda de forma simples e exemplificada os operadores genéticos.

Recomendamos o trabalho de KRISHNAKUMAR (1994), como uma fonte de consulta rápida, que mostra resumidamente as características dos AGs em algumas aplicações e os fundamentos dos operadores genéticos.

Ainda no âmbito de trabalhos para estudos iniciais em AG, recomendamos o texto de HOLLAND (1992), que descreve o procedimento que o AG realiza para encontrar soluções num espaço de busca e a suas similaridades com a natureza, comenta ainda sobre as aplicações do AG em problemas práticos, mostrando a sua flexibilidade frente à problemas distintos.

No intuito de analisar procedimentos para as soluções de problemas, utilizando AG, podemos citar QI; CHIN (1997), cujo trabalho descreve a aplicação combinada do AG com o controlador difuso ('fuzzy') em sistemas de ordens elevadas. O AG utiliza como índice de desempenho a combinação de dois índices, sendo que um considera os parâmetros dinâmicos e o outro índice é um critério de desempenho relativo ao erro. Em COELHO (1999) é proposta a utilização de algoritmos evolutivos, entre eles os AGs, para a sintonia de um controlador PID aplicado à um sistema dinâmico. Utilizando como índice de desempenho, uma função que inclui o erro quadrático.

Outro trabalho interessante é o de FERNANDES et al., que descreve a aplicação de AGs na geração de trajetórias de robôs, onde o índice de

desempenho é definido como uma combinação de prioridades ponderadas

para o movimento do robô.

No que se refere à turbinas eólicas, consultamos inicialmente o livro de

SPERA (1994), que é um trabalho completo sobre os fundamentos da tec-

nologia aplicada às turbinas eólicas, desde a história do desenvolvimento

das turbinas eólicas até a descrição do seu funcionamento mecânico. Em

outros trabalhos podemos encontrar conceitos fundamentais relacionados às

turbinas eólicas, como é o caso de GRIMBLE et al. (1991), onde é feito um

estudo teórico sobre os efeitos do controle nas turbinas eólicas e as influên-

cias da aerodinâmica no controle do ângulo das pás, tanto em turbinas de

velocidade constante como em turbinas de velocidade variável. No trabalho

de DE LA SALLE et al. (1990) é apresentada a descrição dos pré-requisitos

para o controle de turbinas eólicas, suas implicações e importâncias para o

sistema e uma extensa revisão da literatura de controle é realizada.

Para a modelagem e controle de turbinas eólicas podemos citar o texto

de GRIMBLE et al. (1992), que apresenta um modelo simples e linearizado

de uma turbina eólica, para a investigação do controle do ângulo das pás,

utilizando como um dos métodos de controle, um controlador PI. Da mesma

forma ANDERSON et al. (1990), apresenta um modelo dinâmico de turbina

eólica, onde cada componente é descrito, caracterizando os pontos fundamen-

tais de sua dinâmica na modelagem, visando a investigação do controle.

Um trabalho teórico sobre a simulação dinâmica de uma turbina eólica é apresentado em ANDERSON et al. (1991), além de realizar um estudo sobre as características da não-linearidade que dificultam a sua simulação e modelagem. É apropriado mencionar, também, o trabalho de NOVAC et al. (1995), que descreve os componentes de um modelo de turbina eólica, as equações físicas que governam a dinâmica destes componentes e a investigação do controle pela implementação de seis controladores distintos, lineares e não-lineares.

No âmbito da teoria de controle foram utilizados apenas referências clássicas.

O livro de OGATA (1993) aborda algumas técnicas para a sintonia do controlador PID. Nele encontramos uma relação de exemplos ilustrativos aplicando as técnicas abordadas, além de descrever as noções sobre sistemas dinâmicos. O livro de DORF (1993), aborda a sintonia do controlador PID utilizando o critério ITAE. Citamos, também, o trabalho de PHILLIPS (1996), em que podemos encontrar uma série de exemplos didáticos.

Em ASTRÖM (1988), encontramos uma descrição sobre os efeitos e características das ações proporcional, integral e derivativa e combinações destas, nos sistemas realimentados, com exemplos de aplicação e uma abordagem sobre os métodos de Ziegler-Nichols com exemplos ilustrativos.

No livro de OGATA (1997) encontramos a descrição de muitos sistemas

dinâmicos e as soluções de problemas, juntamente com códigos do Matlab.

Capítulo 2

Algoritmos Genéticos

2.1 Uma breve história dos AGs

Nas décadas de 50 e 60, muitos pesquisadores já estudavam sistemas evolutivos, tendo em mente usar os mecanismos de evolução, inspirados na genética natural e na seleção natural, como ferramenta na solução de problemas de engenharia.

Nos anos 60, Rechenberg introduziu o método de estratégias evolutivas para otimizar parâmetros de valor real em sistemas dinâmicos, MITCHEL (1999). A estratégia evolutiva utilizava, originalmente, apenas um indivíduo juntamente com a sua mutação e um operador seleção. Este método foi posteriormente aperfeiçoado nos trabalhos de Schwefel apud MITCHEL (1999). Em 1966, Fogel, Owens e Walsh desenvolveram a programação evolutiva,

Os algoritmos genéticos surgiram do trabalho pioneiro de John Holland e os seus colaboradores, na década de 60. Ao contrário da programação evolutiva e da estratégia evolutiva, o objetivo de Holland não era desenvolver algoritmos para solucionar problemas específicos. Ele estava interessado em estudar o fenómeno de adaptação que ocorre na natureza, com o propósito de transportar estes mecanismos da natureza, para programas de computador. Holland apresentou o algoritmo genético (AG) como uma abstração da evolução biológica. O AG apresentado por ele, trazia inovações significativas com relação aos outros métodos. O AG inicia-se a partir de uma população com um grande número de indivíduos, representados por seqüências binárias, evoluindo para uma nova população pelo uso de um tipo de operador seleção, juntamente com os operadores inspirados na genética, sendo eles: cruzamento, mutação e inversão. O operador seleção escolhe na população, indivíduos para participarem da reprodução. O cruzamento realiza a troca de partes de informações entre dois cromossomos. A mutação altera aleatoriamente os

com os algoritmos genéticos, da computação evolutiva.

A estratégia evolutiva e a programação evolutiva fazem parte, juntamente

(1999):

MITCHELL (1999), uma técnica que usava uma população com N indivíduos e a partir da aplicação do operador mutação, gerava um descendente. O melhor entre os dois era escolhido para compor a nova geração, COLEY

Uma técnica para explorar tal paisagem, a fim de buscar soluções ótimas soluções.

ginária, onde os vales correspondem às soluções pobres e os picos às melhores todas as seqüências possíveis pode ser considerado como uma paisagem imadeterminado problema é a busca de soluções particulares. O universo de A busca de uma boa solução por meio de algoritmos genéticos, para um

2.1.1 O espaço de busca

troladores.
de redes caletação, determinação de trajetórias para robôs, sintonia de como por exemplo, para determinação do custo de operação e manutenção (1999). Além de demonstrarem capacidade de aplicação em áreas distintas, apresenta um espaço de busca complexo, com muitos ótimos locais, COLEY na estimação de parâmetros de valores reais (como o registro de imagens) que plexos onde outros métodos experimentaram dificuldades, como por exemplo Os AGs demonstraram capacidade na resolução de muitos problemas com MITCHELL (1999).

incorpora recursos que não se fazem presentes nos dois primeiros algoritmos, entre as estratégias evolutivas, programação evolutiva e o AG de Holland, que de uma seqüência contínua do cromossomo. Observamos, então, o contraste valores de alguns alelos no cromossomo. O operador inversão altera a ordem

é a escaladação de colinas. Inicia-se de algum ponto aleatório, e se uma modificação melhora a qualidade de sua solução, então, continua-se nesta direção. Caso contrário, altera-se a direção.

O AG explora este espaço de busca por níveis em toda região simultaneamente, encontrando ótimos locais (picos de colinas menores). Devido a habilidade do AG em combinar sequências que possuem soluções parciais, a busca concentra-se nas soluções mais promissoras. Assim o AG tende a convergir para um valor que é o máximo global, o pico da colina mais alta.

Problemas complexos produzem ambientes com muitos picos e vales. Como o número de dimensões de um problema aumenta com sua complexidade, a paisagem pode conter uma topologia bastante intrincada. A função de determinar a colina certa ou até mesmo determinar qual caminho leva à colina, fica crescentemente mais difícil. Além disso, tais espaços de busca são normalmente extremamente enormes. Por exemplo, se cada movimento em um jogo de xadrez tem uma média de 10 alternativas por jogada, e um jogo típico tem em torno de 30 movimentos em cada lado, então há 10^{60} possibilidades, sendo a maioria delas ruins. Isto torna uma eventual busca das melhores jogadas, numa tarefa bastante complicada, HOLLAND (1992).

2.1.2 Diferença entre os métodos tradicionais e o AG

Em comparação aos métodos numéricos de otimização mais tradicionais, os AGs diferenciam-se da maioria, em quatro pontos principais, GOLDBERG

(1989):

- Empregam uma população de indivíduos ou soluções;
- Trabalham sobre uma codificação das possíveis soluções (genótipo) e não sobre as soluções (fenótipo) propriamente ditas;
- Empregam regras de transição probabilísticas;
- Não necessitam de conhecimentos adicionais da função a ser otimizada (derivadas ou gradiente por exemplo).

Os AGs não ficam facilmente presos a mínimos locais como é o caso dos algoritmos tradicionais. Estas características dos AGs podem levar à descoberta de soluções não convencionais que não poderiam ser visualizadas pelo projetista por serem contra-intuitivas, BARBOSA (1997).

2.2 Um algoritmo genético simples

Com o objetivo de ilustrar o funcionamento do AG, apresentamos na

Figura 2.1 um fluxograma que engloba o modo de operação da maioria dos

AGs existentes.

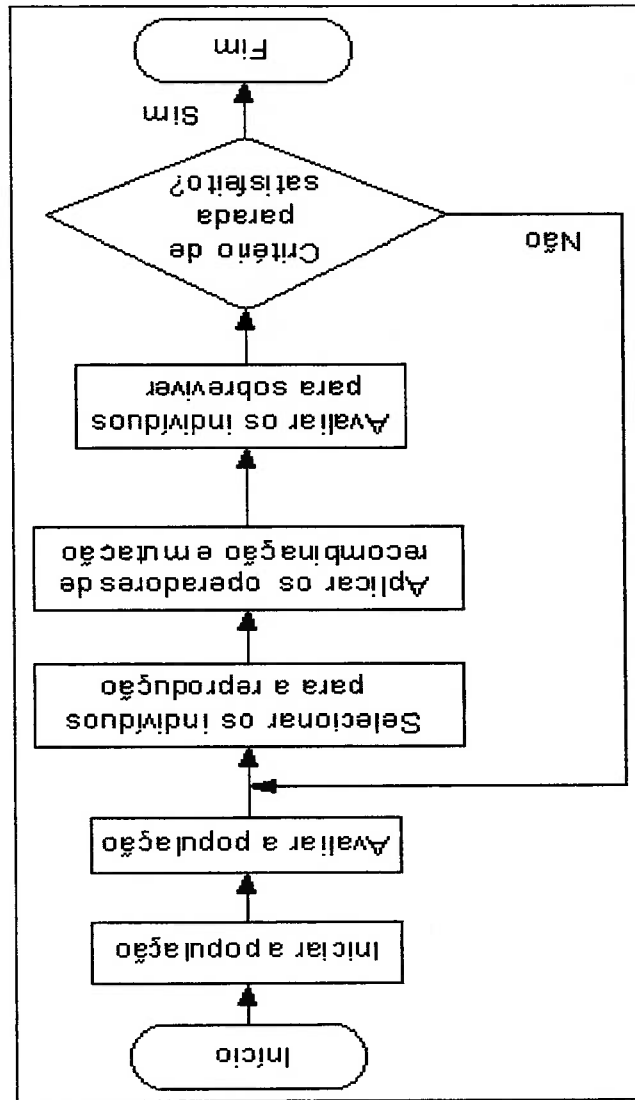


Figura 2.1: Fluxograma do AG

Um algoritmo genético simples, conta com os seguintes operadores em

sua estrutura:

1 - Seleção:

Esse operador seleciona indivíduos na população que posteriormente vão gerar a prole. Os indivíduos com as melhores aptidões são os que têm maior probabilidade de serem selecionados pelo método.

Para simular esse operador existem vários métodos na literatura, descreve-
mos sucintamente a seguir, dois destes métodos que são utilizados nesse tra-

balho:

- Roleta da sorte:

O método consiste em repartir um disco em tamanhos proporcionais à

aptidão de cada indivíduo.

O indivíduo mais apto tem um espaço maior que os outros no disco e portanto, tem maior probabilidade de ser selecionado no sorteio.

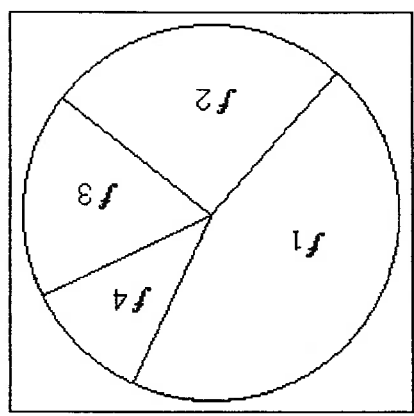
A Figura 2.2 mostra uma roleta típica, levando em conta o valor de aptidão de cada indivíduo. Há quatro indivíduos com os respectivos valores de aptidão f_1 , f_2 , f_3 e f_4 , portanto a roleta é girada quatro vezes. O indivíduo com aptidão f_1 (mais apto) terá maior probabilidade de ser sorteado. O indivíduo com aptidão f_4 (menos apto) tem a menor parte da roleta e, portanto, terá a menor a probabilidade de ser escolhido.

Este método tem como vantagens ser intuitivo e de fácil implementação, KRISHNAKUMAR (1994).

O método apresenta problemas de convergência prematura, isto é, nas primeiras gerações, pode surgir, eventualmente, uma solução medíocre, mas tal que a sua aptidão seja muito maior que a aptidão média. Esta solução pode dominar a população nas próximas gerações e causar uma convergência prematura, para uma solução que não é boa, MITCHEL (1999).

A fim de resolver problemas de escala ('Scaling'), isto é, manter níveis apropriados de competição em uma simulação, no qual ocorre uma tendência prematura em que poucos indivíduos com altos valores de aptidão dominam o processo de seleção, utilizamos um recurso denominado truncamento sigma, GOLDBERG (1989) ou escalamento sigma, MITCHEL (1999). Este recurso pode, também, ser utilizado no método da roleta da sorte, para permitir a

Figura 2.2: Roleta da sorte



minimização ou maximização de funções. O escalamento é apresentado pela

equação 2.1.

$$g_i = 1 + \frac{f_i - \bar{f}}{2s} \quad (2.1)$$

Onde: f_i é o valor da aptidão, de um indivíduo i ; \bar{f} é a aptidão média e s é o desvio padrão da aptidão da população. Os valores de g_i são, portanto,

usados para a seleção da prole no lugar de f_i .

$$g_i = 1 + \frac{f - f_i}{2s} \quad (2.2)$$

No caso de minimização de problemas, basta reanular g_i , como mostra

a equação (2.2).

• Seleção por torneio:

O procedimento é iniciado com a escolha, ao acaso, de dois indivíduos na população. O método compara a aptidão dos dois indivíduos e aquele de maior aptidão é selecionado para reproduzir. Os dois voltam, então, à população inicial e podem ser escolhidos novamente. Esse processo é feito até que n indivíduos da população sejam escolhidos.

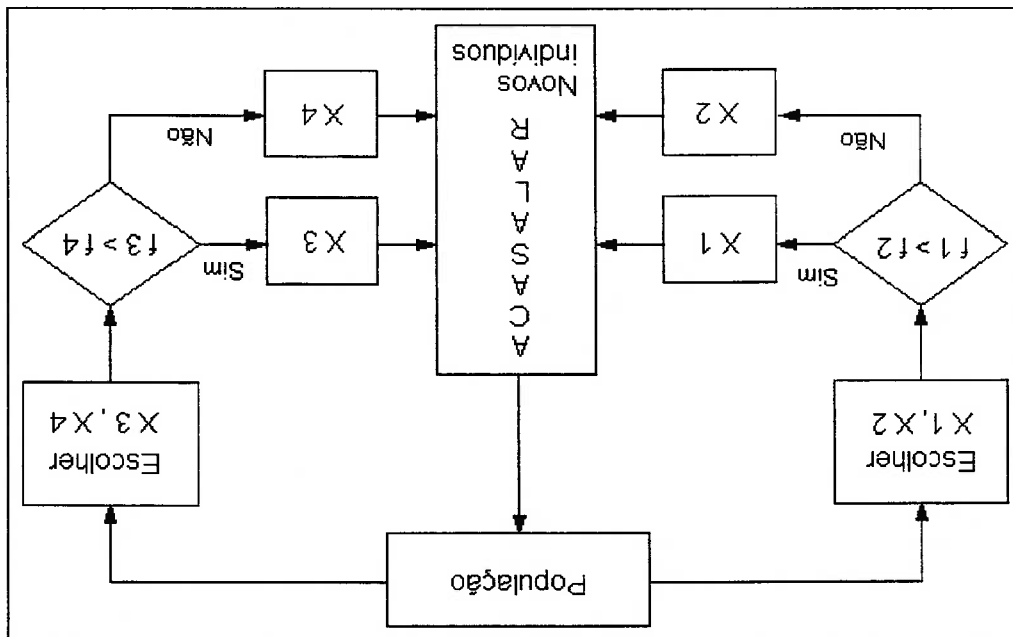
A Figura 2.3 ilustra o funcionamento descrito anteriormente.

2 - Cruzamento:

Através de um ou mais pontos de cruzamento, esse operador realiza a troca de informações entre dois cromossomos, de onde surgirá a prole. A escolha dos pontos de cruzamento é aleatória e obedece ao intervalo $[1, l-1]$, onde l é o comprimento do cromossomo. Esse processo é ilustrado através de um pequeno exemplo.

Dados dois cromossomos de comprimento $l = 8$, 10101011 e 11010111, sorteamos um número entre 1 e 7 para determinar o ponto de cruzamento. Supondo que o valor escolhido seja 4, o cruzamento será feito a partir

Figura 2.3: Seleção por torneio (KRISHNAKUMAR (1994))



do quarto componente ('bit'). Teremos, então, os cromossomos filhos como

apresentado a seguir:

Ancestrais

1010|1011

1101|0111

Filhos

10100111

11011011

O símbolo | representa a posição na qual ocorre o cruzamento.

3 - Mutação:

Este operador altera aleatoriamente um ou mais componentes de um cro-

mossomo. Por exemplo, dado um cromossomo 11010110 em que o operador

mutação escolhe o terceiro componente ('bit') para alterar, o cromossomo

transforma-se em 11110110. Este operador é necessário para a introdução

e manutenção da diversidade populacional no algoritmo genético e trabalha

com uma probabilidade, usualmente muito baixa, MITCHEL (1999).

O operador inversão foi introduzido logo no início da criação dos AGs,

mas não produziu melhoria de desempenho considerável. Mais recentemente,

formas de inversão foram incorporadas com algum sucesso em AGs aplicados

ao problema de montagem de fragmentos de DNA. Porém, são necessários

estudos experimentais e teóricos mais sistemáticos. Além disso, qualquer benefício de desempenho conferido pelo operador inversão deve ser pesado contra o espaço e tempo de computação adicionais que este operador requer, MITCHEL (1999).

2.3 Simulação passo a passo de um AG

Para um melhor entendimento do funcionamento do AG, vamos agora realizar uma simulação passo a passo de um exemplo simples.

Uma rápida revisão da noção de sistema binário, torna-se necessária, pois os operadores do AG que utilizamos na simulação passo a passo, como cruzamento e mutação, manipulam valores codificados neste sistema numérico.

Considere, por exemplo, o número 2.134. Escrevendo-o na base decimal temos:

$$2 \times 10^3 + 1 \times 10^2 + 3 \times 10^1 + 4 \times 10^0 = 2.000 + 100 + 30 + 4 = 2.134$$

O mesmo procedimento é utilizado para escrever um número binário na base decimal.

Considere agora o número 10101 na base binária, como sendo um indivíduo numa população de seqüências binárias. O valor equivalente desse número na base decimal é:

$$1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 16 + 0 + 4 + 0 + 1 = 21$$

O valor na base decimal representa o valor decodificado, que posterior-

mente será utilizado pelo operador seleção, como veremos na simulação passo

a passo.

Ilustramos a simulação passo a passo do AG, para maximização da função

$$f(x) = x^2, \text{ no intervalo } [0, 31].$$

Utilizamos no AG os seguintes valores de parâmetros:

- Número de gerações = 2;
- Número de indivíduos por geração = 4;
- Probabilidade de mutação = 0,001;
- Um ponto de cruzamento.

A aptidão de cada um dos quatro indivíduos é calculada (com os valores

decodificados) fazendo uso do índice de desempenho, isto é, a função a ser

$$\text{otimizada, } f(x) = x^2.$$

A escolha do ponto de cruzamento é feita de forma aleatória, onde os

indivíduos que participam do cruzamento, neste caso, são sempre vizinhos.

A escolha é feita no intervalo de $[1, 4]$, já que o comprimento de cada

indivíduo é igual a 5.

Estes valores são associados, respectivamente, a cada um dos três valores de aptidão. O valor de r é a acumulação da aptidão relativa. Para selecionar um indivíduo utilizamos a rotina:

$$r_3 = \frac{\sum_{i=1}^3 f_i / \sum_{i=1}^3 f_i}{48} = \frac{48}{48} = 1,0000$$

$$r_2 = \frac{\sum_{i=1}^2 f_i / \sum_{i=1}^3 f_i}{48} = \frac{33}{48} = 0,6875$$

$$r_1 = \frac{\sum_{i=1}^1 f_i / \sum_{i=1}^3 f_i}{48} = \frac{12}{48} = 0,2500$$

15. Aplicamos estes valores na equação (2.3) e obtemos respectivamente: população com três indivíduos com os seguintes valores de aptidão: 12, 21 e n é o número de indivíduos na população. Por exemplo, considere uma onde j é o índice para cada valor de aptidão, f_i é a aptidão de cada indivíduo

$$(2.3) \quad r_j = \frac{\sum_{i=1}^j f_i / \sum_{i=1}^n f_i}{48}$$

Na seleção dos indivíduos mais aptos utilizamos o seguinte recurso:

Repetir n vezes

Gerar número aleatório u

Procurar o primeiro valor $r > u$

Guardar o indivíduo, associado a este valor

Fim

O número aleatório u , a ser escolhido, deve estar no intervalo $[0, 1[$.

População inicial	Valor decodificado x	Aptidão x^2	Valor de r aleatório	Número
01001	9	81	0,0509	0,0459
11100	28	784	0,5440	0,1703
01110	14	196	0,6673	0,2319
10111	23	529	1,0000	0,1188

Tabela 2.1: Primeira geração

Na Tabela 2.1, observamos que a primeira coluna contém os valores codi-

ficados da população, sendo estes valores decodificados na segunda coluna,

isto é, os valores binários são convertidos em decimais. A aptidão de cada

indivíduo, terceira coluna da Tabela 2.1, é obtida substituindo-se cada valor

decodificado de x na função $f(x) = x^2$.

As colunas quatro e cinco correspondem ao processo de seleção, ou seja,

na quarta coluna temos os valores cumulativos da aptidão relativa de cada

A Tabela 2.1, representa a primeira geração. O indivíduo 11100 é o mais

lação de quatro indivíduos, sendo o comprimento de cada um igual a 5. uma moeda cinco vezes para cada indivíduo, de modo a formar uma população. Esta primeira etapa do processo pode, por exemplo, ser feita lançando-se moedas no intervalo de 00000 à 11111.

A população inicial foi obtida por geração aleatória. Escolhemos sucessivamente até que o quarto indivíduo seja selecionado.

selecionado é 0,5440 que está associado ao indivíduo de valor $x = 28$ e assim $x = 9$. O segundo valor sorteado aleatoriamente é 0,1703 e o valor de r valor sorteado. Este valor é 0,0509 que corresponde ao indivíduo de valor r ramos, então o primeiro valor de r (coluna quatro) que seja maior que o acaso. Na primeira linha da quinta coluna temos o valor 0,0459, procuremos o indivíduo, sendo que a última coluna corresponde aos números sorteados ao

Tabela 2.2: Seleção e cruzamento

Indivíduos	selecionados	11100	11100	11100	01001	11100	11100
Cruzamento		11100	11100	11100	01001	11100	11100

apto, 784, sendo, portanto, um candidato à reprodução. Já o indivíduo 01001 é o menos apto da população, com aptidão 81. Este é portanto, um candidato a desaparecer. A aptidão média dos indivíduos nesta geração é igual a 397,5. O indivíduo 11100, o melhor da primeira geração, foi selecionado três vezes. Nesta simulação não utilizamos o truncamento sigma.

A Tabela 2.2 apresenta o cruzamento dos pares de indivíduos que foram selecionados. A prole compõe a população da próxima geração, Tabela 2.3.

Nova população	Valor decodificado x	Aptidão x^2	Valor de r aleatório
11100	8	64	0,0259
01000	29	841	0,4999
11101	28	784	0,0034
11100	28	784	0,5977
11100	28	784	0,3472

Tabela 2.3: Segunda geração

Observamos que a aptidão média aumentou de 397,5 para 618,25, em apenas uma geração. A maior aptidão na população, também aumentou, de 784 para 841, Tabela 2.3.

Ha a presença de um indivíduo 01000 com baixa aptidão 64, mas a tendência do AG é preservar os bons valores e eliminar os valores ruins.

Utilizando a Tabela 2.5 temos a seguinte previsão para uma eventual

terceira geração: o indivíduo 11101 é o melhor candidato. Também são bons candidatos os indivíduos 11100 de aptidão 784, enquanto o indivíduo 01000, é o mais cotado para ser eliminado.

Nesta seleção ajustamos a probabilidade de mutação em 0,001. Para cada geração esperamos que $4 \times 5 \times 0,001 = 0,002$ componentes ('bits') sejam alterados. Portanto não é esperada a alteração de nenhum dos 20

Tabela 2.5: População final

População final	Valor de x^2	aptidão
11101	29	841
11100	28	784
01000	8	64
11100	28	784

Tabela 2.4: Seleção e cruzamento

Indivíduos selecionados	Cruzamento
11100	1110 0
11101	1110 1
01000	0100 0
11100	1110 0
11101	111 00

Inspeccionando a Figura 2.5 relativa ao processo de maximização, verificamos que a aptidão média dos indivíduos converge em nove gerações. Os indivíduos com a melhor aptidão convergem para o valor em quatro gerações. Podemos verificar pelas Figuras 2.5 e 2.6, que os resultados são satisfatórios, pois, essas simulações utilizaram 10 gerações, correspondendo a um melhor, pior e a aptidão média em cada geração.

Nas Figuras 2.5 e 2.6 observamos o comportamento dos indivíduos com em função dos valores 0 e 1, respectivamente. Os valores de máximo e mínimo de $f(x)$, observados na Figura 2.4, estão no intervalo $[0, 31]$, que corresponde à solução de um sistema amortecido.

$$f(x) = 10e^{-0.2x} \cos 3x$$

de mínimo da função matemática apresentada a seguir:
 a determinação de valores de x que correspondem aos valores de máximo e Apresentamos agora, a simulação de um algoritmo genético simples para

2.4 O AG como otimizador de funções

Para obtermos boas soluções é necessário aumentarmos o número de gerações, para que a convergência do AG, na busca do ótimo global, melhore. componentes.

Figura 2.5: Maximização da função $f(x)$

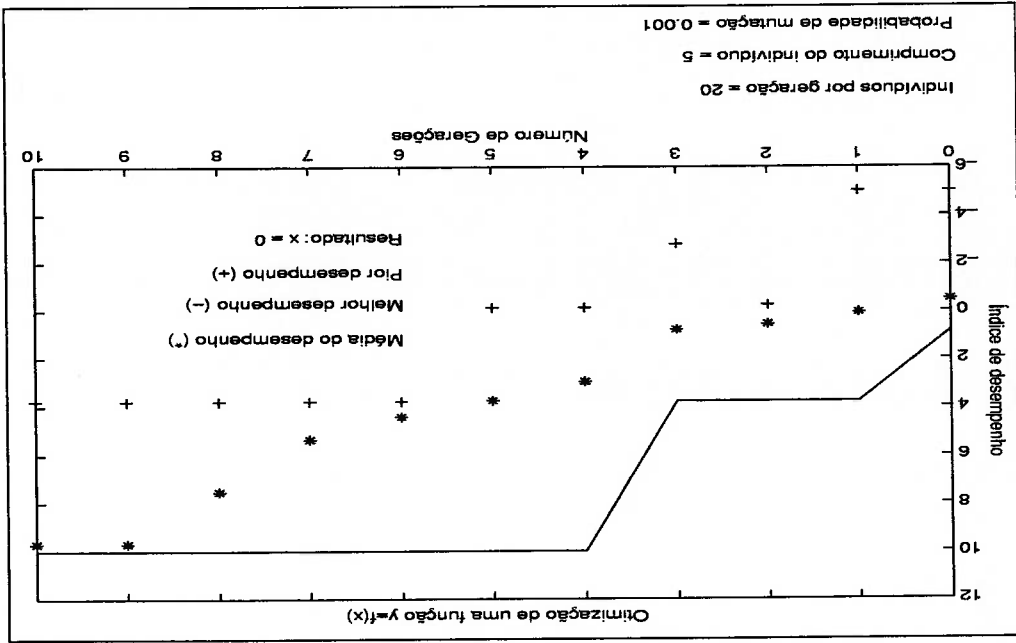
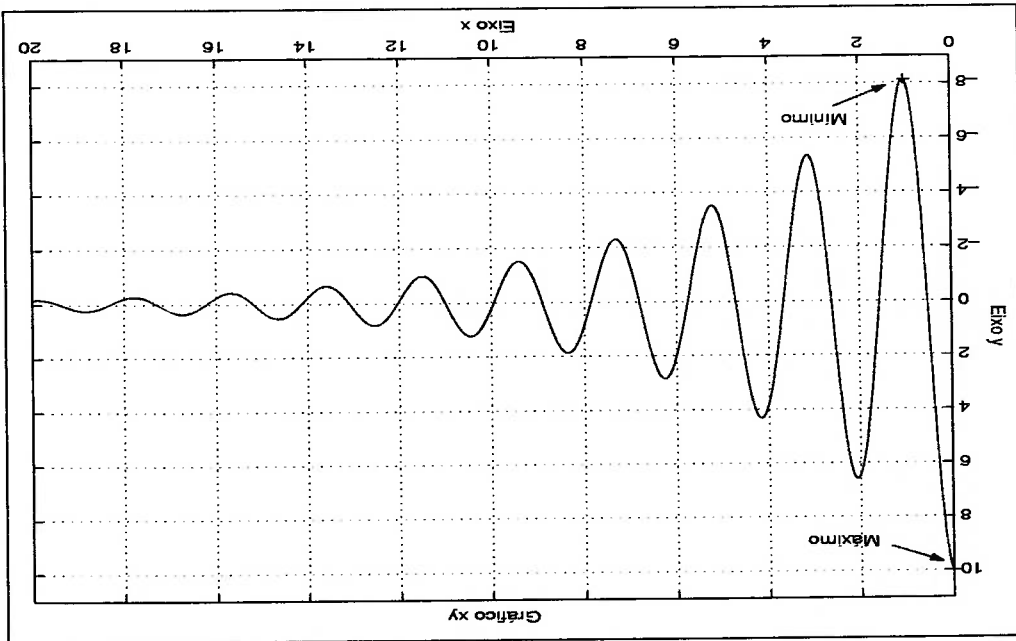


Figura 2.4: Gráfico da função $f(x)$



de um problema simples.

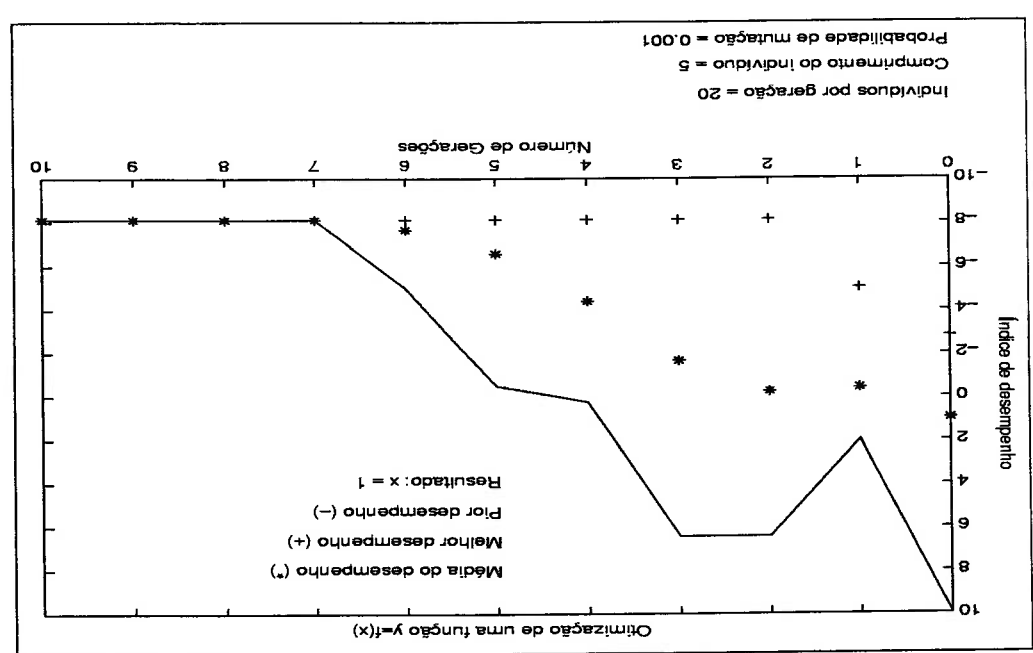
Apresentamos aqui uma comparação entre um AG com população decimal e um com população binária, a fim de verificar o desempenho na otimização

2.5 Comparação entre os AGs com população binária e decimal

Figura 2.4.

sultados obtidos pelo AG são compatíveis com os valores de x observados na tempo de simulação muito baixo, em torno de 0.16 – 0.20 segundos. Os re-

Figura 2.6: Minimização da função $f(x)$



Para simular o operador seleção utilizamos o mesmo recurso apresentado

na seção 2.3. O mesmo ocorre com o operador cruzamento, no entanto, os

indivíduos são representados por seqüências da forma 204756. No operador

mutação, a escolha é feita entre 0 e 9, excluindo o número que vai sofrer a

mutação.

Na comparação utilizamos o problema de determinar o valor máximo de

$$y = x \text{ num dado intervalo.}$$

Para o AG com população binária utilizamos os seguintes valores de

parâmetros:

- Tamanho do cromossomo=10;

- Probabilidade de mutação=0,001;

- Número de indivíduos por geração=20;

O tamanho do cromossomo estabelece, portanto, que a busca é efetuada

num intervalo de 0 a 1023.

No AG com população decimal utilizamos os seguintes parâmetros:

- Tamanho do cromossomo=3;

- Probabilidade de mutação=0,001;

- Número de indivíduos por geração=20;

Notamos que o intervalo de busca, neste caso, varia de 000 a 999. Devemos evidenciar que o AG com população binária realiza a busca num intervalo maior que o intervalo estabelecido para o AG com população decimal, embora estes valores sejam próximos. Realizamos 10 simulações para cada tipo de população. Programamos o AG para interromper a busca quando um indivíduo com o valor máximo for determinado. Os resultados são apresentados na Tabela 2.6.

Analisando a Tabela 2.6, constatamos que o AG com população decimal, em média, necessita de 351 gerações para determinar o valor máximo. Porém, podemos notar que nas simulações 3 e 4, o AG converge para o máximo valor em 2 gerações e na simulação 7, o AG converge na primeira geração. Com base nos valores da terceira coluna da Tabela 2.6, observamos que o AG com população binária precisa, em média, de 37 gerações para obter o valor máximo. Mostrando, portanto, uma diferença considerável. Com o aumento do número de indivíduos na população verificamos uma melhora substancial no AG com população decimal.

A Tabela 2.7 apresenta as simulações com a mudança do número de indivíduos na população de 20 para 160, comprovando a afirmação anterior. Observando os valores apresentados na Tabela 2.7, verificamos que apesar da melhora considerável no desempenho do AG com população binária, esta mudança é menos acentuada que no caso anterior. Em média, o AG com

Verificamos que os dois tipos de população (decimal e binária) possuem população na sintonia de controladores PID. Analisando os resultados que foram apresentados, podemos afirmar que há a necessidade de investigar o desempenho do AG, com os dois tipos de população decimal necessária de 4 gerações para determinar o máximo valor, para o AG com população binária, a média fica 3, 3 gerações.

Tabela 2.6: Tabela comparativa entre a população decimal e binária

População	Decimal	Binário
Simulação	Número de gerações	Número de gerações
1	689	23
2	8	17
3	2	74
4	2	5
5	1.088	7
6	3	3
7	1	20
8	4	75
9	907	132
10	807	9

questão.

é mais favorável para a determinação do valor máximo, no exemplo em características distintas e observamos, ainda, que o AG com população binária

Tabela 2.7: Tabela comparativa entre a população decimal e binária

População	Decimal	Binário
Simulação	Número de gerações	Número de gerações
1	3	1
2	4	4
3	5	3
4	3	1
5	1	3
6	6	9
7	4	5
8	5	3
9	4	3
10	5	1

Capítulo 3

Turbinas eólicas

3.1 Desenvolvimento das turbinas eólicas

Os moinhos de vento têm a sua origem perdida na antiguidade, porém a grande contribuição em atividades como moer grãos e bombear a água, fizeram deles uma das principais máquinas acionadas por fontes naturais. Eles alcançaram o apogeu de utilização nos séculos *XVII* e *XVIII*. A partir daí, o seu uso começou a declinar, devido ao surgimento de máquinas baseadas na queima de combustíveis. Estas máquinas podiam ser utilizadas continuamente e o seu funcionamento não dependia das condições da natureza, como era o caso dos moinhos de vento.

Contudo, os moinhos de vento não sucumbiram à revolução industrial. Eles continuaram sendo de muita utilidade em regiões habitadas, onde os

Outro importante passo na transição dos moinhos para as turbinas de vento foi dado pelo professor Poul LaCour na Dinamarca. LaCour conduziu as pesquisas, na estação experimental de Askov, de 1891 até a sua morte

As pás e baixa velocidade de rotação. Ao mesmo tempo que demonstrou ser de pouco futuro, os sistemas com várias pás e aerodinâmico com novos desenvolvimentos da tecnologia elétrica. máquinas, pelo seu pioneirismo em combinar o melhor desenvolvimento estrutural e aerodinâmico com novos desenvolvimentos da tecnologia elétrica. O moinho de vento construído por Brush foi um marco na história dessas rotor ser removido em 1908.

de sustentação média 18 metros de altura. Ele funcionou por 20 anos até o de vento possuía uma roda com 144 pás com 17 metros de diâmetro e a torre de carregar as baterias localizadas em sua grande propriedade. Este moinho construiu em 1888 um moinho para fornecer uma potência de 12 KW, a fim Nos E.U.A., Charles F. Brush, um empresário da área de eletricidade,

mundo e dois desses trabalhos merecem destaque pelo seu pioneirismo. energia elétrica, impulsionaram trabalhos experimentais em vários países do eletricidade das centrais elétricas até às regiões distantes e à demanda por aos enormes gastos com as linhas de transmissão, utilizadas para transportar crescente interesse no uso da energia eólica para gerar eletricidade. Devido em experimentos para a geração de eletricidade. Neste período criou-se um recursos eram escassos e ao final no século XIX começaram a ser utilizados

Outros modelos inovadores surgiram, nas primeiras décadas do século XX, como por exemplo o rotor Savonius de 1925, nome dado ao seu inventor S. J. Savonius. Que consiste num rotor em forma de "S", com eixo vertical.

200 e 1.200 W, utilizados em fazendas e ranchos.

O modelo com pás obtve sucesso em sistemas de pequeno porte, de superado). Com três pás, porém, solucionava-se o problema de vibração. do vento (nos últimos anos com a técnica de balanço do rotor o problema foi importantes vibrações, no modelo de duas pás, durante mudanças na direção para a geração de eletricidade. No entanto, estudos posteriores, mostraram de alta velocidade, com duas e três pás e com um perfil de asa mais aceitável tudos surgiram em vários países do mundo configurações de turbinas eólicas aplicados imediatamente às turbinas eólicas. Como consequência destes estudos do século XX, impulsionou projetos de estudos das hélices que podiam ser O desenvolvimento cada vez maior da aerodinâmica nas primeiras décadas estavam em operação na Dinamarca.

em pequenos povoados, em torno de 1910 várias centenas destes sistemas dinâmico. Ele projetou sistemas de 5 a 25 KW para uso na agricultura e baixa solidez (relação entre as pás e a área varrida) e baixo arrasto aerocom quatro pás em formato retangular, mas com apreciáveis vantagens como, aerodinâmica. LaCour utilizou a configuração padrão na Europa, moinhos em 1907. Ele introduziu, nos seus projetos, novos princípios da engenharia

Em paralelo com projetos de turbinas eólicas de pequeno porte, começaram a crescer o interesse por grandes sistemas de turbinas eólicas, por parte das companhias prestadoras de serviços. Este interesse foi reforçado pela preocupação com a escassez de petróleo num futuro próximo. Com isso, o interesse em sistemas de grande porte deu um novo impulso para o surgimento de turbinas como a desenvolvida na Rússia em 1931. A turbina eólica Bala-clava de eixo horizontal, tinha um rotor que produzia uma potência de 100 KW e com pás que formavam uma área de 30 metros de diâmetro, sendo a primeira a ser conectada com rede elétrica, para utilidade pública. Outro projeto que é um marco na história das turbinas eólicas, foi concebido por Palmer C. Putnam em conjunto com a S. Morgan Smith Company. O re-

rada, até ressurgir no Canadá, por volta dos anos 70.

Após o seu aparecimento, a turbina Darrieus tem sido geralmente ignorada de um eixo vertical. O eixo vertical está ligado à cabos de sustentação. pás em forma de arcos, que são fixadas às extremidades superior e inferior ventor, F. M. Darrieus. O rotor Darrieus consiste num modelo de três ou duas Outro exemplo de modelo inovador foi introduzido em 1930, por seu inventor, porém não obteve sucesso comercial.

Em sua forma mais simples, ele pode ser construído realizando um corte longitudinal no meio do cilindro e reunindo as duas partes de modo que elas formem duas pás. Este modelo conseguiu alguma popularidade na Finlândia,

Nas turbinas VAWT, existe a possibilidade de captação do vento em qualquer direção e não necessitam do controle de ângulo das pás, o que facilita a sua fabricação. Além disto, o conjunto turbo-gerador está localizado em Terra, facilitando, assim a sua manutenção. No entanto têm como desvantagens a necessidade de um motor para dar a partida inicial na turbina e as pás são submetidas a forças alternadas que provocam pulsações de torque que podem causar a instabilidade do sistema de controle de velocidade, SIMÕES et al. (1999).

As Figuras 3.2 e 3.1 mostram as duas configurações mais comuns de turbinas eólicas.

- VAWT (iniciais em inglês para 'Vertical Axis Wind Turbine')
- HAWT (iniciais em inglês para 'Horizontal Axis Wind Turbine')

(1994), que usualmente são classificadas em:

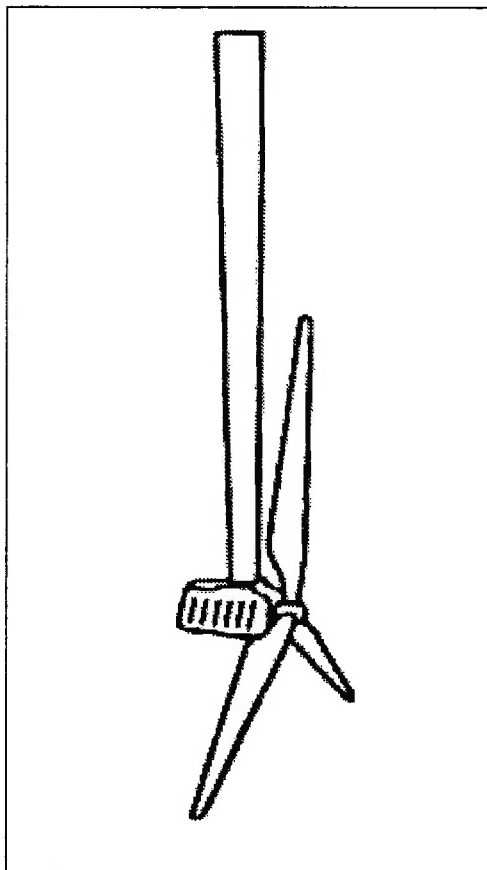
foram propostos, mas dois grupos de modernas turbinas destacaram-se, SPERA Nas décadas seguintes, vários modelos de formas e tamanhos diferentes alguns problemas técnicos esse sistema encerrou as suas atividades.

que formam uma área de 53, 3 metros de diâmetro. Em 1945, após enfrentar como ficou conhecida, tinha um rotor que produzia 1,25 MW e duas pás que foi durante 40 anos, a maior do mundo. A turbina eólica Smith-Putnam, resultado dessa colaboração foi a construção, em 1941, de uma turbina eólica

As turbinas do tipo HAWT são as mais populares e utilizadas, sendo uma configuração muito experimentada ao longo de décadas e com uma vasta literatura tratando desse sistema, além de contar com uma grande rede de serviços e fabricantes. Porém este sistema apresenta deficiências, pelo fato de conjunto turbo-gerador localizar-se no topo da torre de sustentação, sendo esta estrutura mais alta do que nas VAWTs. Portanto, uma requisição impor-

Spera (1994)

Figura 3.1: Turbina eólica do tipo HAWT



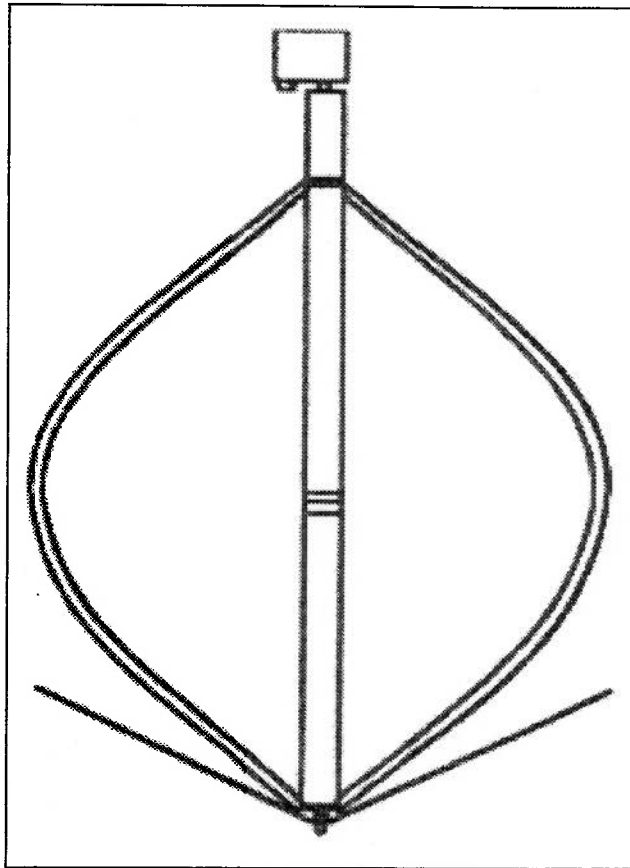
de partida.

tarefas de parada e de início de funcionamento, sem necessitar de um motor das pás, o que possibilita o controle da velocidade, auxiliando inclusive nas As turbinas do tipo HAWT possuem mecanismos de ajuste no ângulo GRIMBLE et al. (1991).

tanto no projeto é a menor manutenção possível do conjunto turbo-gerador,

SPERA (1994)

Figura 3.2: Turbina eólica do tipo VAWT



3.2 Regulação do ângulo das pás

Nas turbinas do tipo HAWT o aumento da potência é proporcional ao cubo da velocidade do vento. Mas as altas velocidades (tipicamente acima de 30 m/s) não são encontradas com frequência suficiente para que torne a sua utilização economicamente viável. Um conjunto turbo-gerador (rotor, eixo de baixa velocidade, caixa de engrenagens, eixo de alta velocidade e gerador) de alto desempenho seria necessário e para as velocidades de vento médio, a turbina trabalharia com uma pequena fração de sua capacidade e de maneira ineficiente e o custo da engenharia envolvida no projeto seria proibitivo. Neste caso, a alternativa comumente aceita é o limitador aerodinâmico de potência, GRIMBLE et al. (1992).

O limitador aerodinâmico atua quando a velocidade do vento excede o valor especificado, então a potência em excesso deve ser descartada pelo rotor, para evitar a sobrecarga da turbina.

A potência da turbina é mantida no valor pré-estabelecido até uma velocidade de vento máxima, quando então, a turbina é desligada.

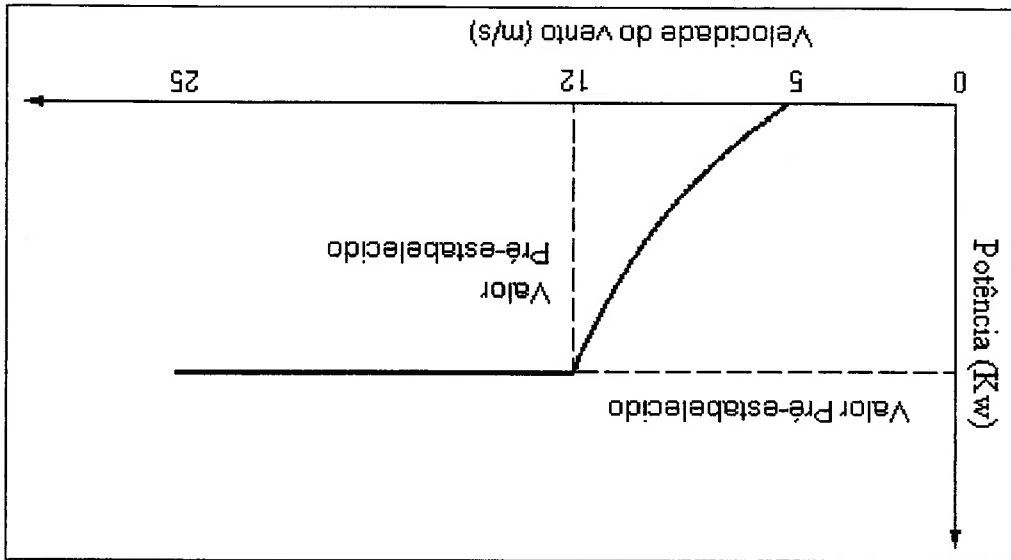
Uma curva típica deste comportamento é mostrada na Figura 3.3.

Há dois métodos comuns de limitador aerodinâmico de potência: o primeiro é uma regulação passiva, ou seja, as pás do rotor são projetadas para estolar próximo de valores de velocidade do vento especificados. Consequen-

temente, a potência gerada pela turbina não aumenta com o incremento da velocidade do vento. O segundo método diz respeito a uma regulação ativa. O torque induzido no rotor pelo vento depende do ajuste do ângulo das pás. Durante a regulação ativa, o ângulo das pás é continuamente ajustado para um ângulo que permita gerar a potência pré-especificada, GRIMBLE et al. (1991).

No presente trabalho utilizamos o controle de regulação ativa descrito.

Figura 3.3: Potência versus velocidade do vento



3.3 Descrição do modelo matemático utilizado

O modelo de turbina eólica que utilizamos, escolhido na literatura, é do tipo HAWT de 300 KW, com rotor de 15 metros de raio, três pás e velocidade constante.

A seguir fazemos uma descrição sucinta dos componentes principais na dinâmica de uma turbina eólica.

3.3.1 Aerodinâmica

O vento atua sobre as pás do rotor que converte a energia do vento em energia rotacional. A área varrida pelo rotor é determinada pelo comprimento das pás do rotor que determina, inclusive a quantidade de energia do vento que a turbina é capaz capturar.

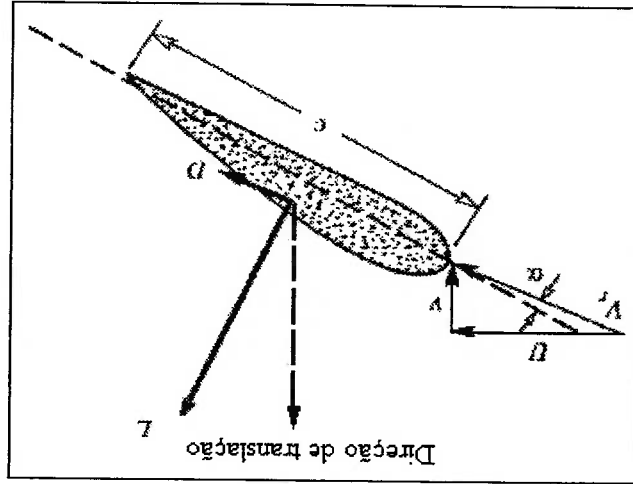


Figura 3.4: Forças de sustentação e arrasto

Cada pá do rotor está sujeita à duas forças aerodinâmicas, a força de sustentação ('Lifting') e a força de arrasto ('Drag'). Na Figura 3.4 o ar que é desviado pela pá, para o sentido oposto da translação, faz surgir uma força de sustentação, que pela terceira lei de Newton (ação e reação), impulsiona a pá para o movimento de translação. A força de arrasto surge devido ao fluxo de ar que atravessa o perfil da asa.

A força de sustentação e a força de arrasto são respectivamente perpendicular e paralela à velocidade relativa (soma entre a velocidade do vento e a velocidade do vento induzida pela translação) e são relacionadas como segue:

$$L = C_{sp} \rho A_p$$

sendo,

$$\rho = 0,5 \rho V_r^2 \text{ e } A_p = c, \text{ onde:}$$

ρ - é a pressão dinâmica;

c - é a densidade do ar;

A_p - é a largura da área projetada;

Então,

$$L = 0,5 \rho V_r^2 C_{sc}$$

Para a força de arrasto temos:

$$D = 0,5 \rho V_r^2 C_{Ac}$$

O efeito da ação do vento turbulento na turbina é modelado através de um (1994).

pode ser medida, tomando-se como referência um ponto no espaço, SPERA bi-dimensional (altura e largura). A variação na velocidade, por sua vez, medição da velocidade e direção do vento), que são dispostos num padrão perimentalmente pela utilização de anemômetros (instrumento utilizado na e variações de velocidade. As variações espaciais podem ser medidas ex- O vento é por natureza, turbulento, ocasionando variações no espaço

3.3.2 Distúrbio de vento turbulento

seguir.

al. (1992), que simulam efeitos locais. Estes dois efeitos são apresentados a pode ser simplificado utilizando a modelagem por dois filtros, GRIMBLE et A interação do campo de vento com a turbina é um modelo complexo, mas α - é o ângulo de ataque.

determinados pelo tipo de perfil da asa e do ângulo α ;

C_A e C_S - são respectivamente, os coeficientes de arrasto e sustentação,

D - é a força aerodinâmica de arrasto;

L - é a força aerodinâmica de sustentação;

onde:

$$W_{3\omega} = \frac{(s^2 + 3s + 160, 2)}{7, 35 \times 10^3 (s + 12, 66)}$$

função de transferência é dada por:

a fim de gerar um distúrbio cujo o espectro assemelha-se ao efeito real. A modelado utilizando-se um filtro que molda a entrada de um ruído branco, passagem de cada pá da turbina, SPERA (1994). Este distúrbio pode ser circular, de modo a captar continuamente as mudanças no vento, devido a da turbina, de um conjunto de anemômetros, que obedecem a um padrão Este efeito pode ser medido experimentalmente com a montagem, próximo no espectro de vento, que são caracterizados pelo número de pás da turbina. região próxima à turbina eólica. Ela induz também, a ocorrência de picos provoca uma modificação, em termos de direção e velocidade do vento, na A passagem periódica das pás da turbina através do campo de vento

3.3.3 Distúrbio rotacional

$$W_T = \frac{(s + 0, 086)(1 + 0, 64s)(1 + 1, 64s)}{1, 37(1 + 0, 86s)}$$

para W_T é dada pela seguinte equação:

um sinal muito próximo de um sinal de vento real. A função de transferência ruído branco através de uma função de transferência que vai gerar na saída procedimento de filtragem de sinal, que consiste basicamente em passar um

3.3.4 Dinâmica do conjunto turbo-gerador

A dinâmica do conjunto turbo-gerador é dada pela combinação da dinâmica engrenagens, eixo de alta velocidade e do rotor do gerador) e da dinâmica elétrica do gerador.

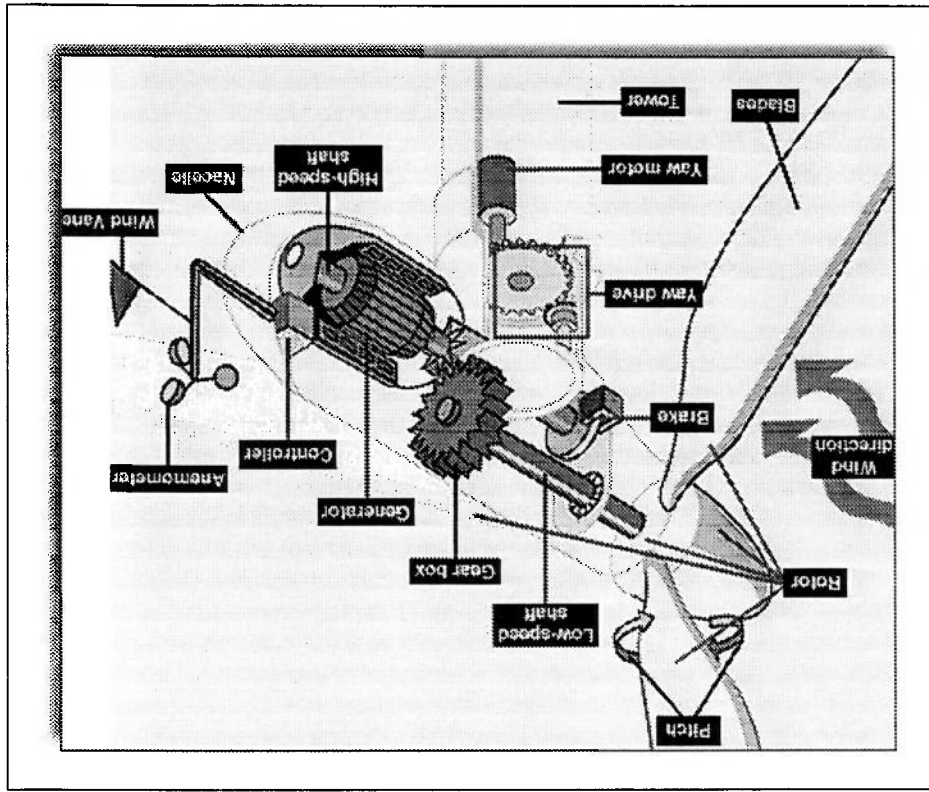


Figura 3.5: Esquema do conjunto turbo-gerador

Wind Energy Program: <<http://www.eren.doe.gov/wind/feature.html>>

A Figura 3.5 ilustra uma turbina eólica de eixo horizontal com ajuste

do ângulo das pás. No detalhe observamos o rotor com as pás e o conjunto

Quando há uma mudança na velocidade do vento ou no ângulo das pás, isto afeta a esteira de vento da turbina eólica, modificando o torque aplicado nas pás. Portanto o atraso de indução deve-se ao tempo que leva para o sistema ajustar-se à nova condição aerodinâmica, GRIMBLE et al. (1992). Este atraso de indução pode ser modelado pela função de transferência, re-

3.3.5 Atraso de indução

$$D(s) = \frac{(s^4 + 33,39s^3 + 7566,13s^2 + 6421,3s + 80.900)}{2123,38}$$

função de transferência:

A dinâmica do conjunto turbo-gerador pode ser modelada pela seguinte equação de transferência:

O sinal enviado à rede elétrica.

velocidade variável, entre ele e a rede existe um circuito elétrico para corrigir a velocidade de baixa rotação em alta rotação. Em casos onde o gerador tem potência da rede. Por isso utiliza-se uma caixa de engrenagens que transforma o gerador deve girar com velocidade constante e sincronizada com a frequência da rede.

permitir o funcionamento dos freios aerodinâmicos.

de rotações por minuto. Este eixo contém dutos do sistema hidráulico para engrenagens. Numa turbina moderna o rotor gira muito lentamente, algumas dezenas de rotações por minuto.

O eixo de baixa velocidade conecta o cubo do rotor à caixa de engrenagens turbo-gerador com os seus principais componentes.

Este controlador é projetado, especificamente para uma velocidade de vento média de $15,7 \text{ m/s}$, para as mudanças nas condições de vento, utiliza-se os valores da Tabela 3.1, que alteram os ganhos de controle.

3.3.8 Controlador

$$A(s) = \frac{25,9}{s + 25,9}$$

representada pela seguinte função de transferência:
 da turbina, conforme o comando do controlador. Sua dinâmica pode ser
 O atuador é o mecanismo que age na modificação do ângulo das pás

3.3.7 Atuador

$$T(s) = \frac{1}{1 + 0.02s}$$

A função de transferência que modela o transdutor é apresentada a seguir:
 sinal é realimentado à entrada da malha, no ramo principal.
 O transdutor é um sensor que mede a potência de saída do gerador, este

3.3.6 Transdutor de medida

$$I(s) = \frac{(1 + 11,25s)}{(1 + 7,5s)}$$

presentada a seguir:

Este controlador foi originalmente obtido experimentalmente, ajustando-se os parâmetros P e I , GRIMBLE et al. (1992).

Sua função de transferência é da forma apresentada a seguir:

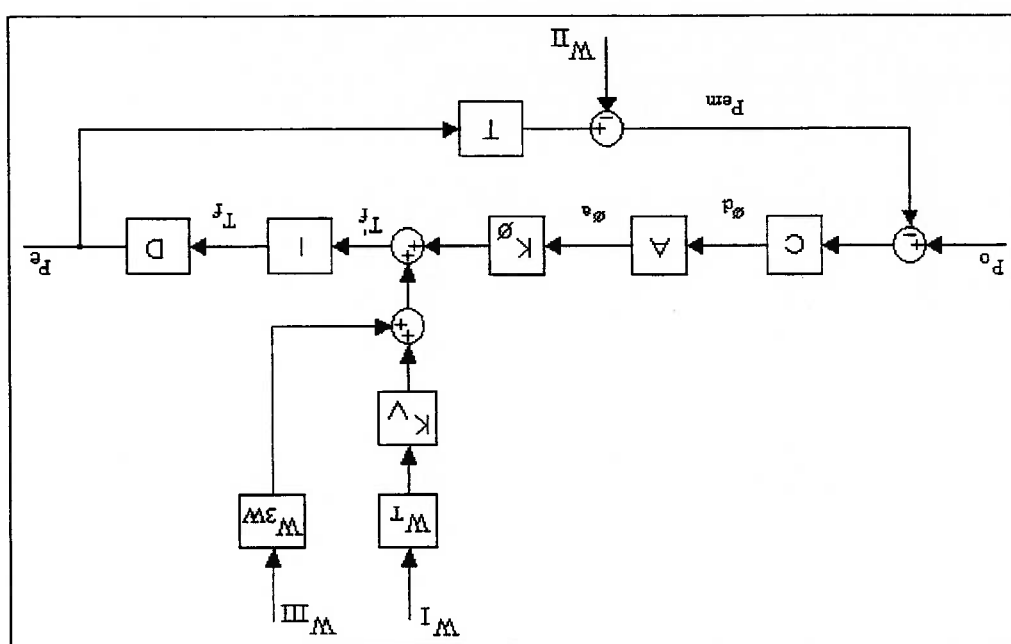
$$C = \frac{8,7 \times 10^{-5}(s + 10)}{s}$$

ϕ (graus)	$K(\phi)$
0	0,1831
2	0,3216
4	0,4536
6	0,5775
8	0,7336
10	0,8695
12	1
14	1,1457
16	1,2862
18	1,4655
20	1,6362
22	1,8069
24	1,9703

Tabela 3.1: Tabela de ganhos do controlador

O modelo de controle apresentado na Figura 3.6, corresponde ao sistema de controle originalmente projetado por GRIMBLE et al. (1992). O modelo é linearizado em torno do ponto de operação para uma velocidade de vento

Figura 3.6: Modelo de controle da turbina de vento



em torno dos valores $K_\varphi = 15,706$ e $K_v = 8.093$, GRIMBLE et al. (1992). Estes valores são obtidos, linearizando o torque e a velocidade do vento

tem-se dois valores de ganhos, que são apresentados na Tabela 3.2. em estado estacionário, isto é, para cada condição de velocidade do vento representa um ganho na mudança de velocidade do vento. São representações K_φ é um ganho que representa a mudança no torque aerodinâmico e K_v

3.3.9 Os ganhos aerodinâmicos K_φ e K_v

• P_o - Valor de referência da potência elétrica

As variáveis apresentadas na Figura 3.6 são definidas a seguir:

utilizar os valores da Tabela 3.2, para modificar o ganho K_φ e K_v .

média de 15,7 m/s. Para uma nova condição de velocidade de vento, deve-se

Tabela 3.2: Ganhos aerodinâmicos

ângulo de passo φ (grau)	velocidade do vento U (m/s)	K_φ ($Nm\ grau^{-1}$)	K_v ($Nm\ m^{-1}$)
0	11,964	1.482	15.409
2	12,190	2.603	15.192
4	12,654	3.671	15.260
6	13,153	4.674	15.425
8	13,858	5.937	15.774
10	14,669	7.037	16.266
12	15,706	8.093	16.838
14	16,581	9.272	17.582
16	17,645	10.409	18.427
18	18,845	11.860	19.675
20	20,058	13.242	20.659
22	21,391	14.623	21.250
24	22,860	15.946	21.591

- P_c - Potência elétrica
 - P_{em} - Potência elétrica medida
 - ϕ_d - Ângulo de passo desejado
 - ϕ_a - Ângulo de passo real
 - ω_I, ω_{II} e ω_{III} - Entradas com ruídos brancos, média igual a zero
 - T'_f - Torque aerodinâmico com pré-atraso de indução
 - T_f - Torque aerodinâmico
- Os blocos representam as funções de transferência definidas a seguir:
- T - Transdutor
 - D - Conjunto turbo-gerador
 - I - Atraso de indução
 - $W_{3\omega}$ - Distúrbio rotacional
 - W_T - Distúrbio turbulento
 - K_φ e K_v - Ganhos aerodinâmicos
 - A - Atuador
 - C - Controlador

3.4 Redução de ordem do conjunto turbo-gerador

A função de transferência do conjunto turbo-gerador é de quarta ordem.

Para facilitar a obtenção do controlador, neste trabalho optamos por

reduzi-la a uma função de segunda ordem.

A função de transferência em sua forma original é apresentada a seguir:

$$(3.1) \quad H(s) = \frac{(s^4 + 33,39s^3 + 7566,13s^2 + 6421,3s + 80900)}{2123,38}$$

Rearranjamos a equação (3.1), para aplicarmos o procedimento escolhido

para a redução de modelos, DORF (1993).

$$(3.2) \quad H(s) = \frac{80900}{1} \frac{(s^4 + 33,39s^3 + 7566,13s^2 + 6421,3s + 80900)}{38,0996}$$

Observamos que o ganho em corrente contínua, obviamente, deve ser o

mesmo no modelo original e no simplificado.

$$(3.3) \quad H(s) = \frac{80900}{80900} \frac{(s^4 + 33,39s^3 + 7566,13s^2 + 6421,3s + 80900)}{80900}$$

Dividindo o numerador e o denominador da equação (3.3), por 80900,

temos,

$$(3.4) \quad H(s) = \frac{\left(\frac{1}{80900}s^4 + \frac{33,39}{80900}s^3 + \frac{7566,13}{80900}s^2 + \frac{6421,3}{80900}s + 1 \right)}{1}$$

Desajamos obter uma função de transferência de segunda ordem na forma apresentada a seguir:

$$L(s) = \frac{1}{1 + d_1s + d_2s^2} \quad (3.5)$$

Precisamos determinar, então, os valores dos coeficientes d_1 e d_2 .

Sejam $M(s)$ e $\Delta(s)$ respectivamente, os denominadores de $H(s)$ e $L(s)$,

então:

$$M(s) \doteq 1 + d_1s + d_2s^2 \quad (3.6)$$

e

$$\Delta(s) \doteq \left(\frac{1}{80900}\right)s^4 + \left(\frac{33,39}{80900}\right)s^3 + \left(\frac{7566,13}{80900}\right)s^2 + \left(\frac{6421,3}{80900}\right)s + 1 \quad (3.7)$$

Derivamos a equação (3.6), sucessivamente e avaliamos cada uma das

derivadas, na origem.

$$M_0(s) = 1 + d_1s + d_2s^2 \iff M_0(0) = 1$$

$$M_1(s) = d_1 + 2d_2s \iff M_1(0) = d_1$$

$$M_2(s) = 2d_2 \iff M_2(0) = 2d_2$$

$$M_3(s) = 0 \iff M_3(0) = 0$$

O mesmo procedimento é aplicado também à equação (3.7):

(3.8)

$$M_{zq} = \Delta_{zq}$$

Consideramos a condição:

$$\Delta_3(0) = 2,5 \times 10^{-3}$$

$$\Delta_2(0) = 1,8705 \times 10^{-1}$$

$$\Delta_1(0) = 7,9373 \times 10^{-2}$$

$$\Delta_0(0) = 1$$

As derivadas avaliadas na origem são:

$$\Delta_4(s) = 24 \left(\frac{1}{80900} \right)$$

$$\Delta_3(s) = 24 \left(\frac{1}{80900} \right) s + 6 \left(\frac{33,39}{80900} \right)$$

$$\Delta_2(s) = 12 \left(\frac{1}{80900} \right) s^2 + 6 \left(\frac{33,39}{80900} \right) s + 2 \left(\frac{7566,13}{80900} \right)$$

$$\Delta_1(s) = 4 \left(\frac{1}{80900} \right) s^3 + 3 \left(\frac{33,39}{80900} \right) s^2 + 2 \left(\frac{7566,13}{80900} \right) s + \left(\frac{6421,3}{80900} \right)$$

$$\Delta_0(s) = \left(\frac{1}{80900} \right) s^4 + \left(\frac{33,39}{80900} \right) s^3 + \left(\frac{7566,13}{80900} \right) s^2 + \left(\frac{6421,3}{80900} \right) s + 1$$

para $q = 1$ e 2 , já que temos duas incógnitas: d_1 e d_2 .

Para $q = 1$, temos:

$$M_2 = \sum_{k=0}^2 \frac{(-1)^{k+1} M_k(0) M_{2-k}(0)}{k!(2-k)!} = -d_2 + d_1^2 - d_2 = -2d_2 + d_1^2 \quad (3.9)$$

e

$$\Delta_2 = \sum_{k=0}^2 \frac{(-1)^{k+1} \Delta_k(0) \Delta_{2-k}(0)}{k!(2-k)!} = -0,1807$$

Finalizando o processo, para $q = 2$, temos:

$$M_4 = \sum_{k=0}^4 \frac{(-1)^{k+2} M_k(0) M_{4-k}(0)}{k!(4-k)!} = d_2^2$$

e

$$\Delta_4 = \sum_{k=0}^4 \frac{(-1)^{k+2} \Delta_k(0) \Delta_{4-k}(0)}{k!(4-k)!} = 8,7011 \times 10^{-3}$$

Através da equação (3.8), determinamos os valores de d_1 e d_2 ,

$$d_2 = 9,3279 \times 10^{-2}$$

$$-0,18656 + d_1^2 = -0,1807$$

$$d_1 = 0,076549$$

Substituindo os valores de d_1 e d_2 na equação (3.5), temos a função de

transfêrencia simplificada:

padrões: degrau unitário, impulso unitário e rampa. As respostas ao degrau são apresentadas na Figura 3.7. Nota-se pelo gráfico da Figura 3.7, que não há diferença entre as duas funções de transferência consideradas. Para este sinal a função de transferência original poderá ser substituída pela função de transferência reduzida. O gráfico da Figura 3.8 é referente ao sinal de um impulso unitário, aplicado na entrada dos dois modelos. Como no caso da Figura 3.7, as respostas no gráfico da Figura 3.8, têm diferenças desprezíveis. Finalmente o sinal rampa é aplicado na entrada dos dois modelos. O gráfico da Figura 3.9, confirma os resultados anteriores. Verificamos que,

$$L(s) = \frac{10,7205}{10,7205 + 0,8206s + s^2} \quad (3.10)$$

Dividindo o numerador e o denominador por $9,3279 \times 10^{-2}$ e corrigindo o resultado para garantir o mesmo ganho em corrente contínua temos,

$$L(s) = \frac{1 + 7,6549 \times 10^{-2}s + 9,3279 \times 10^{-2}s^2}{1}$$

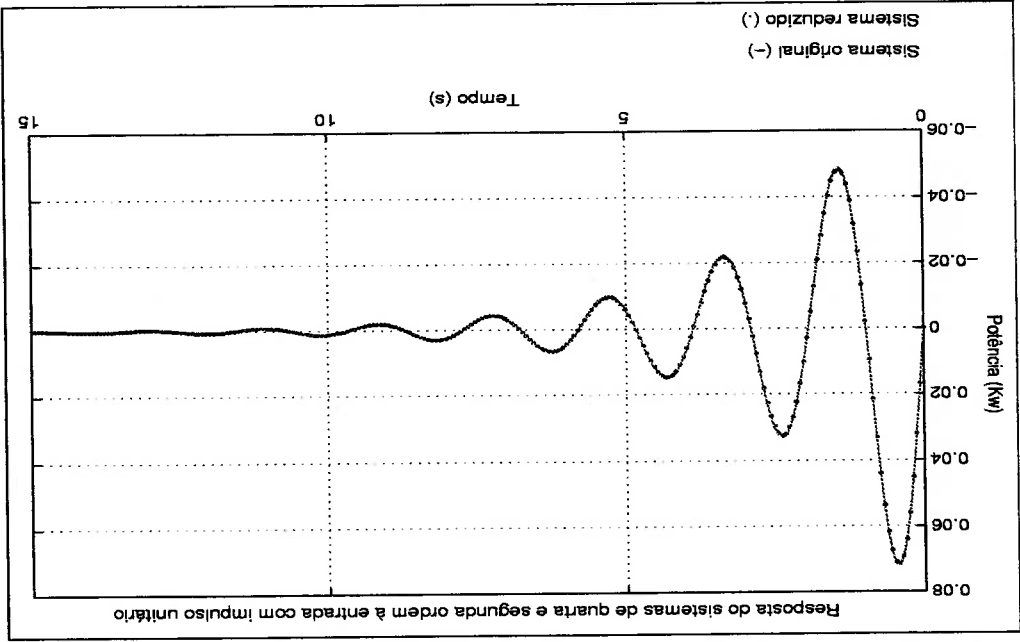


Figura 3.8: Entrada à impulso unitário

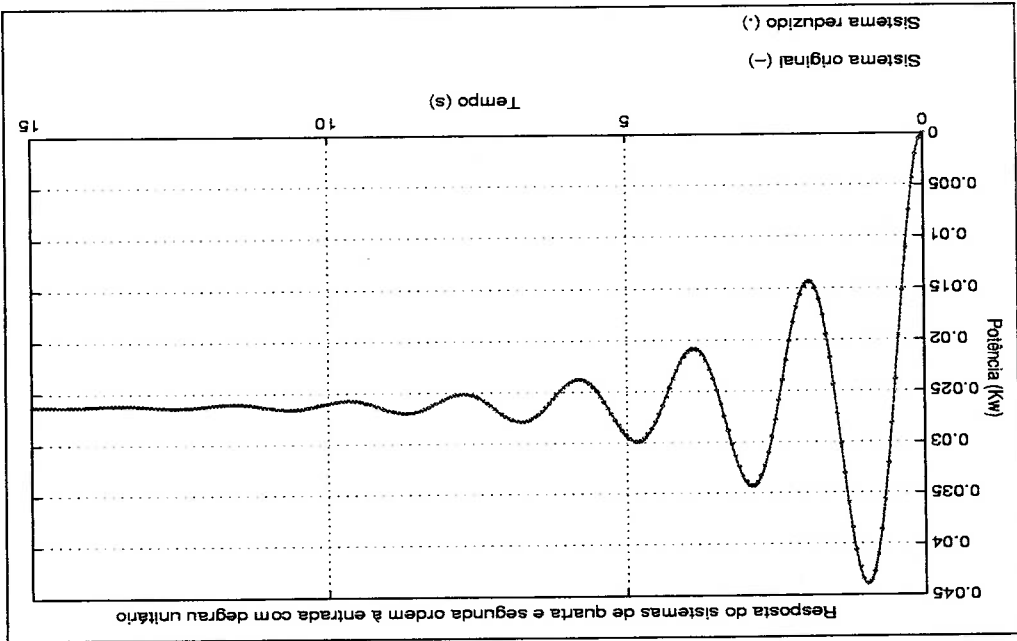
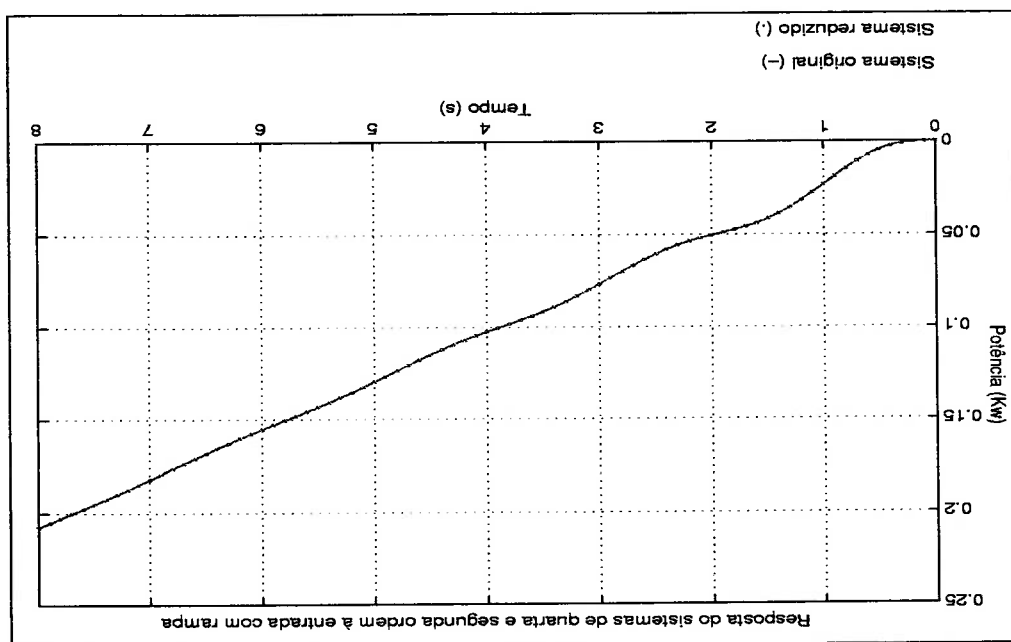


Figura 3.7: Entrada à degrau unitário

A fim de ilustrar o comportamento do sistema de transferência de potência reduzida, simulamos o modelo de uma turbina eólica, no projeto clássico, isto é, sem ruídos e comparamos a resposta com o projeto original. Neste caso foi utilizado o controlador original.

O gráfico da Figura 3.10, mostra a resposta do sistema submetido a um degrau unitário. Não verificamos diferenças significativas, portanto, podemos assegurar que o sistema, com o modelo reduzido tem comportamento

Figura 3.9: Entrada à rampa



reduzida está validada.

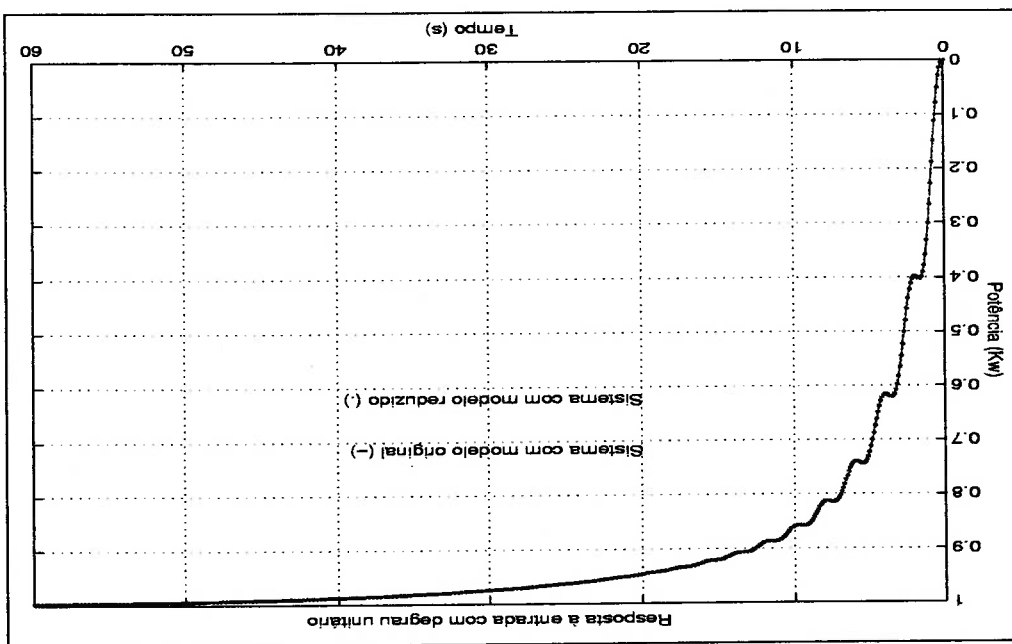
permanece semelhante ao modelo original e, portanto, a função de ordem independente do sinal na entrada, a resposta na saída do modelo simplificado,

A fase diverge para frequências acima de 15 rad/s, aproximadamente. Portanto, o modelo reduzido é válido somente em baixas frequências, o que não é um problema, já que a região de operação do sistema de controle é a região de baixa frequência, como é de praxe.

de 50 rad/s). os modelos divergem apenas na região de alta frequência (frequências acima (+) e para o modelo reduzido (-)). Observamos que, como era de se esperar, A Figura 3.11 apresenta a resposta em frequência para o modelo original

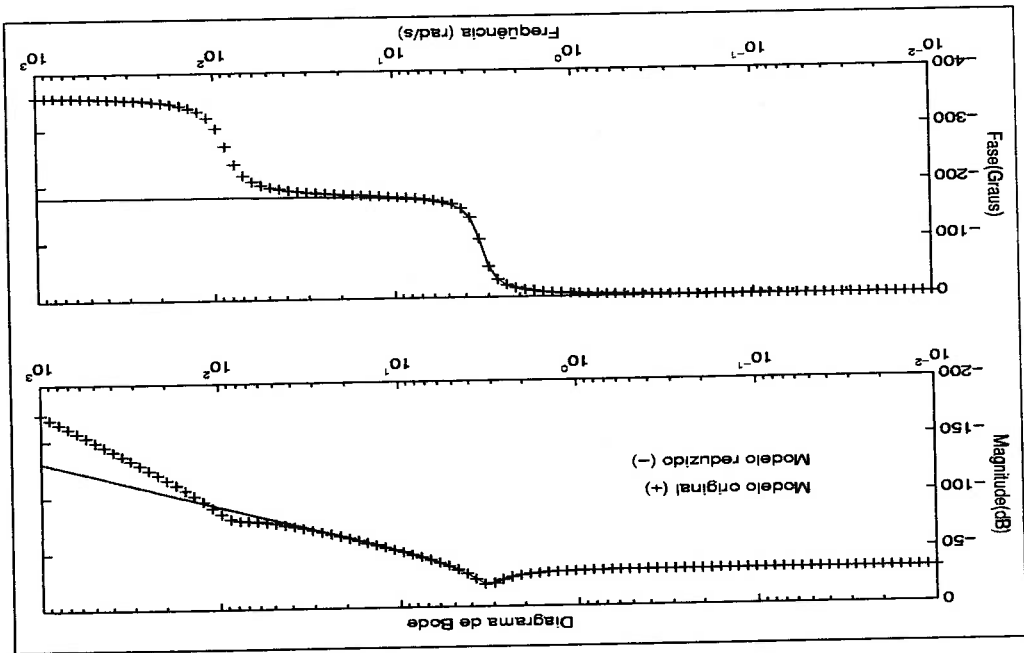
semelhante ao original.

Figura 3.10: Entrada à degrau



Doravante, portanto, utilizaremos a função de transferência de ordem reduzida para representar o sistema turbo-gerador.

Figura 3.11: Diagrama de Bode



Capítulo 4

Validação do AG

4.1 Validação do AG

Para validar o algoritmo genético desenvolvido para a busca dos parâme-

tros do controlador PID, resolvemos dois exemplos. O primeiro é um sistema

com função de transferência de terceira ordem e o segundo é um sistema com

função de transferência de segunda ordem, ambos encontrados nos livros

textos OGATA (1993) e DORF (1993).

Anteriormente à apresentação dos exemplos, vamos abordar de maneira

concisa o controlador PID.

4.2 Controlador PID

O controlador PID é o sistema de controle ativo por realimentação mais

utilizado industrialmente. Ele é implementado em sistemas de controle onde

é necessário tanto a melhoria do sinal transitório como da resposta em regime

permanente, PHILLIPS (1996).

Estabelecendo para $r(t)$ a entrada e $c(t)$ a saída, o controlador PID é

definido pela equação

$$(4.1) \quad c(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

onde: e é o erro entre o sinal de entrada e de saída, dado pela relação $e = r - c$.

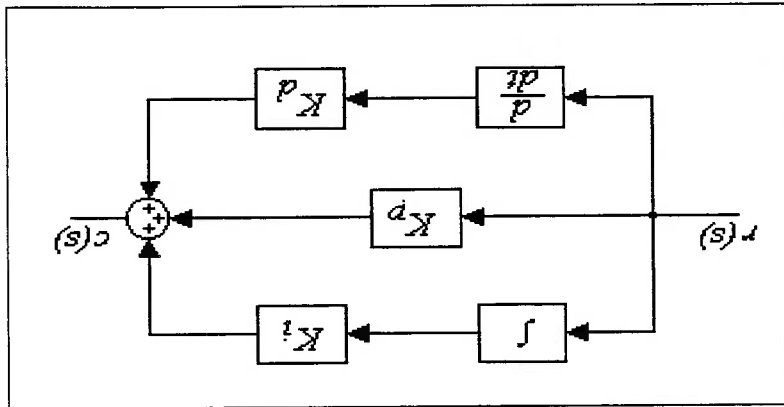


Figura 4.1: Diagrama de blocos do controlador PID

PHILLIPS (1996)

O diagrama de blocos da Figura 4.1 faz referência à equação (4.1) e

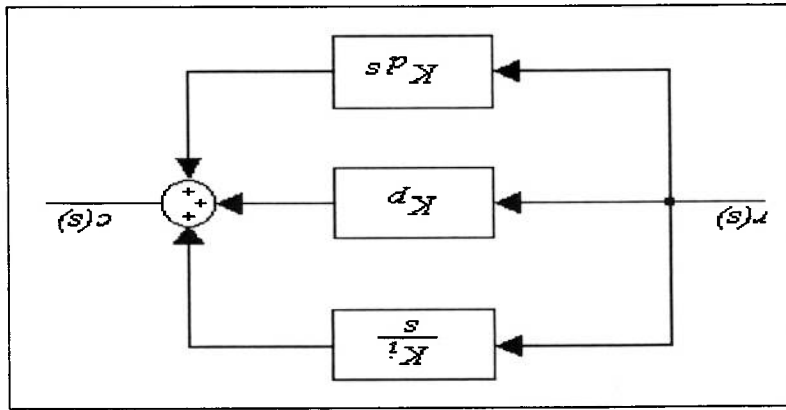
constitui-se na configuração mais usual do PID.

Portanto, a síntese do controlador PID reduz-se a sintonia dos três ganhos: Proporcional, Derivativo e Integral.

A seleção dos três coeficientes é basicamente um problema no espaço tridimensional. Pontos no espaço de busca correspondem a diferentes ajustes

PHILLIPS (1996)

Figura 4.2: Diagrama de blocos com as funções de transferências



Um diagrama representativo da equação (4.3) é dado pela Figura 4.2.

$$G_c(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_{ps} \quad (4.3)$$

ou

$$C(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_{ps} \right) R(s) \quad (4.2)$$

Aplicando a transformada de Laplace da equação (4.1) com condições iniciais nulas, obtemos a função de transferência para o controlador PID:

dos três parâmetros do controlador PID. Pela escolha de diferentes pontos no espaço de busca, podemos produzir, por exemplo, diferentes respostas para entradas a degrau unitário.

Para direcionar esta busca a fim de obtermos resultados esperados, isto é, para que os ganhos traduzam em características estabelecidas pelas especificações, existem vários métodos, como por exemplo o método de Ziegler-Nichols, critério ITAE entre outros, DORF (1993).

4.3 Exemplo 1

Para o exemplo a seguir, adotamos as seguintes características dinâmicas: tempo de acomodação (t_a) na faixa $\pm 2\%$, tempo de subida (t_s) de $0 - 100\%$ do valor final, sobre-sinal máximo (M_p) e o erro em regime permanente (er) da resposta para uma entrada a degrau unitário.

Primeiro, determinamos os ganhos do controlador pelo método de Ziegler-Nichols e em seguida determinamos estes ganhos através do AG.

As regras de Ziegler-Nichols para determinação de parâmetros do controlador PID, são geralmente aplicadas em sistemas cuja dinâmica é desconhecida. Todavia, o método pode ser estendido à sistemas com dinâmicas conhecidas.

São dois os métodos de Ziegler-Nichols: Método da resposta a degrau e

O controlador PID com parâmetros estimados através deste método é representado pela função de transferência:

Para utilizarmos este método, primeiro impomos $T_i = \infty$ e $T_d = 0$; isto é, o controlador é apenas proporcional. Usando somente a ação proporcional, determinamos, através do método de Routh, o valor do ganho crítico para que a resposta apresente oscilações mantidas (ajuste do ganho até obtermos a resposta desejada). Determinamos, então, o ganho crítico K_{cr} e o período crítico P_{cr} . O método de Ziegler-Nichols, sugere estabelecer os valores dos parâmetros K_p , T_i e T_d , conforme a Tabela 4.1.

4.3.1 Método baseado no ganho crítico

Antes de resolvermos o exemplo propriamente dito, vamos apresentar o método de Ziegler-Nichols, baseado no ganho crítico.

O primeiro consiste em aplicar na entrada de um sistema, em malha aberta, um degrau unitário, obtendo desta resposta os parâmetros para o projeto do controlador. Este método restringe-se a sistemas que apresentam uma resposta em malha aberta em forma de "s", quando excitado por um degrau. No exemplo que tratamos, este método não se aplica, pois a saída não apresenta uma resposta em forma de "s", OGATA (1993).

$$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{s^3 + 6s^2 + 5s + K_p}{K_p}$$

A função de transferência de malha fechada para o sistema fica:

$$\text{temos } G_c = K_p.$$

Fazendo $T_i = \infty$ e $T_d = 0$, na função de transferência do controlador,

A Figura 4.3 ilustra o sistema em malha fechada.

$$G_p = \frac{1}{(s^3 + 6s^2 + 5s)}$$

A função de transferência do sistema escolhida para este caso é:

$$s = -\frac{P_{cr}}{4}$$

Então, o controlador PID possui um pólo na origem e um duplo zero em

$$G_c = 0,6K_{cr} \left(1 + \frac{0,5P_{cr}s}{1} + 0,125P_{cr}s \right) = 0,075K_{cr}P_{cr} \frac{s}{\left(s + \frac{P_{cr}}{4} \right)^2}$$

Tabela 4.1: Tabela do método Ziegler-Nichols

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{1}{1,2}P_{cr}$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Examinando os elementos da primeira coluna da Tabela 4.2, verificamos que K_p tem valores positivos no intervalo, $30 > K_p > 0$.

Tabela 4.2: Método de Routh

s^0	K_p	
s^1	$\frac{6}{30 - K_p}$	
s^2	6	K_p
s^3	1	5

Portanto pelo método de Routh temos,

$$s^3 + 6s^2 + 5s + K_p = 0 \quad (4.4)$$

A equação característica do sistema em malha fechada é ao longo do tempo. Para isto utilizamos o critério de estabilidade de Routh. Com isso, passamos a determinação do valor de K_p que fornece o ganho crítico K_{cr} , para que a resposta apresente oscilações com amplitude constante

A equação característica do sistema em malha fechada é

OGATA (1993)

Figura 4.3: Diagrama do sistema

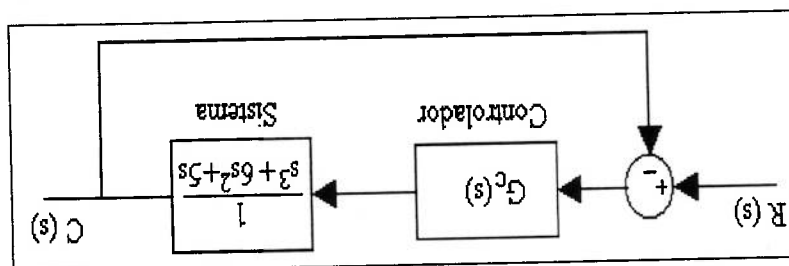


Figura 4.4: Resposta do sistema em malha fechada

Portanto o valor de $K_{cr} = 30$, fornece a resposta com oscilações de am-

plitude constante, como mostra a Figura 4.4.

Nos faltam os valores T_i e T_d . Para tanto, necessitamos determinar o

período crítico. Substituindo K_p pelo ganho crítico na equação característica

temos:

$$(4.5) \quad s^3 + 6s^2 + 5s + 30 = 0$$

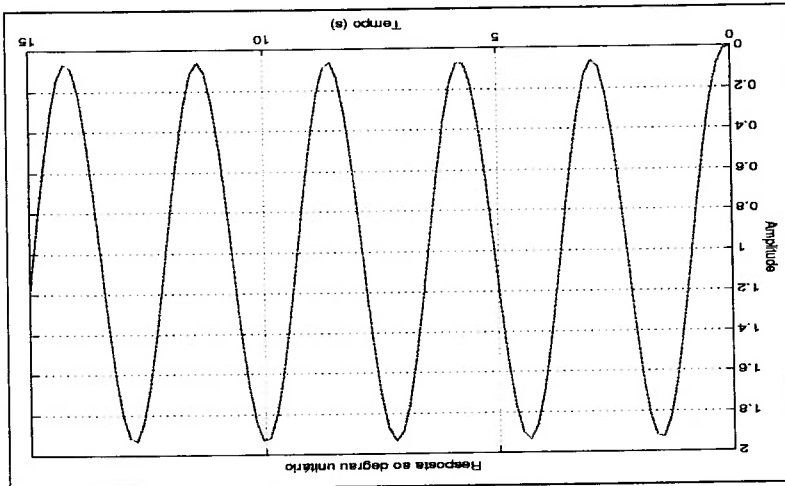
Resolvendo a equação (4.5), obtemos as raízes $\sqrt{5}j$, $-\sqrt{5}j$ e -6 . A última

raiz não convém, pois não gera uma resposta oscilatória. Lembrando que

$$s = \sigma + j\omega, \text{ temos a solução } \omega = \sqrt{5} \text{ rad/s, logo,}$$

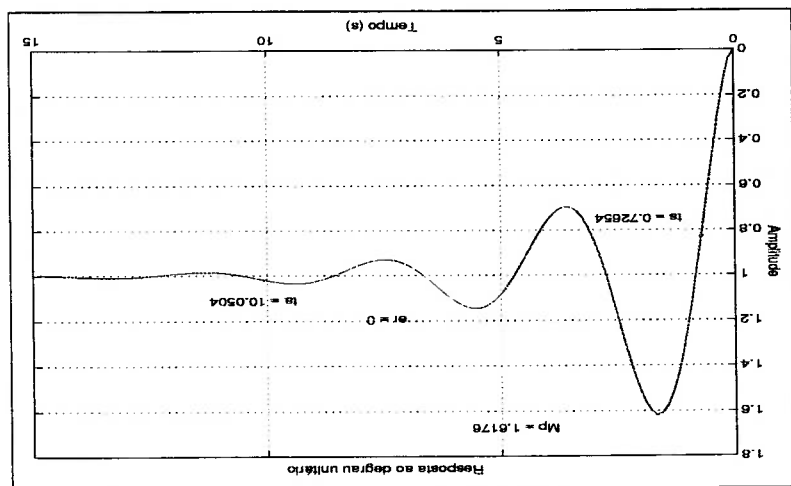
$$P_{cr} = \frac{2\pi}{\sqrt{5}} = 2,8099$$

Pela Tabela 4.1, determinamos os valores K_p , T_i e T_d ,



A resposta do sistema com o controlador, representado pela equação (4.6), é mostrada na Figura 4.5. Ela não é uma resposta satisfatória, pois o sobre-

Figura 4.5: Resposta em malha fechada



$$G_c = \frac{6,3223}{s} (s + 1,4235)^2$$

Rearranjando a equação (4.6), obtemos:

$$G_c = 18 \left(1 + \frac{1,405s}{1} + 0,35124s \right) \quad (4.6)$$

A função de transferência do controlador PID, é dada por:

$$T_d = 0,125P_{cr} = 0,35124$$

$$T_i = 0,5P_{cr} = 1,405$$

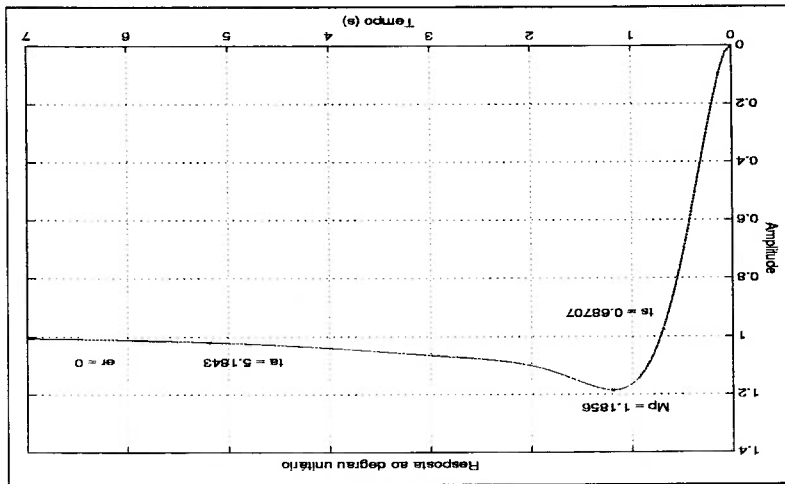
$$K_p = 0,6K_{cr} = 18$$

Deslocando o zero duplo de $s = -1,4235$ para $s = -0,65$, temos o seguinte controlador PID:

$$G_c(s) = 13,846 \frac{s}{(s + 0,65)^2}$$

Ajustando o ganho para 39,2 teremos uma resposta mais rápida, como mostra a Figura 4.7, porém com um sobre-sinal maior do que fora apresentado no caso da Figura 4.6.

Figura 4.6: Resposta do sistema - Primeira sintonia



Os três valores são inseridos no controlador dentro da malha do sistema que por sua vez gera uma resposta ao degrau unitário e como saída temos os

$$1001|0101|0111$$

$$K_p \quad K_d \quad K_i$$

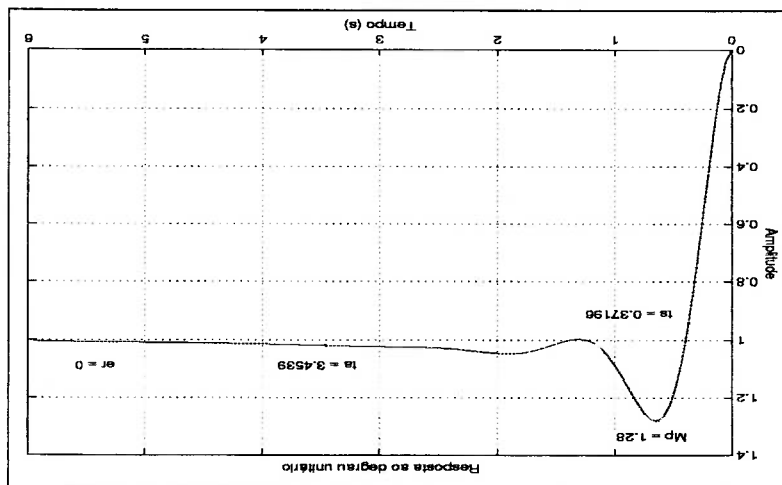
partes iguais, para obtenção dos três ganhos.

Consideramos um cromossomo 100101010111, que é dividido em três mossonno em três partes, como no exemplo a seguir:

Os ganhos para o controlador PID são determinados pela divisão do cromossomo em três partes, como no exemplo a seguir: porcional, integral e derivativo pelo procedimento ilustrado na Figura 4.8. anterior, correspondente a planta através da determinação dos ganhos pro- Utilizamos o AG para sintonizar um controlador PID, para o exemplo

4.3.2 Projeto do controlador PID utilizando o AG

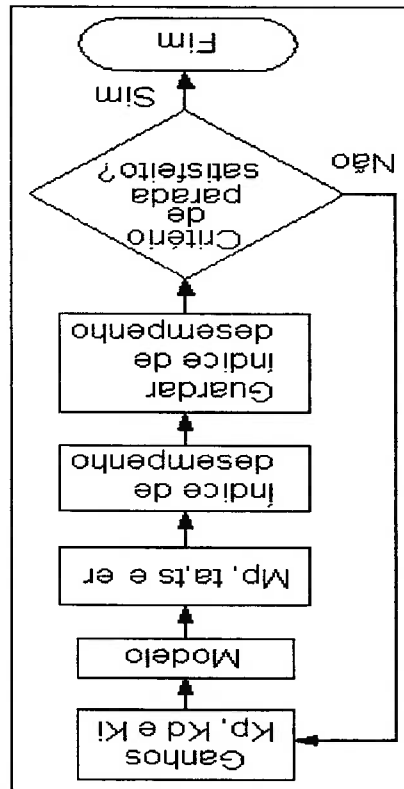
Figura 4.7: Resposta do sistema com sintonia fina



São apresentadas 4 soluções distintas para os controladores PID sintoniza-
 xiliado pelo AG, que são abordados no presente trabalho.
 Este procedimento é utilizado em todos os casos de sintonia do PID au-
 população.

tão o critério de parada que utilizamos é o número de indivíduos em uma
 A Figura 4.8 refere-se ao procedimento realizado à cada geração. En-
 de desempenho do AG.

Figura 4.8: Diagrama do processo de determinação do controlador PID



dos com o auxílio do AG.

Em todas as soluções utilizamos os seguintes valores para os parâmetros

do AG:

• Número de indivíduos por geração = 21;

• Tamanho do cromossomo = 126;

• Probabilidade de mutação = 0,001;

• Probabilidade de cruzamento = 0,95;

• Pontos de cruzamento = 2;

• Número de gerações = 20;

• Método de seleção por torneio.

O índice de desempenho considerado neste trabalho é da forma:

$$ID = k_{2t_a} + k_{3t_s} + k_4 M_p + k_{5er} \quad (4.7)$$

sendo os coeficientes

$$k_2 = k_3 = 1, k_4 = k_3 = 4$$

O tamanho do cromossomo, o número de pontos de cruzamento, o número

de gerações e o número de indivíduos, foram determinados por um processo

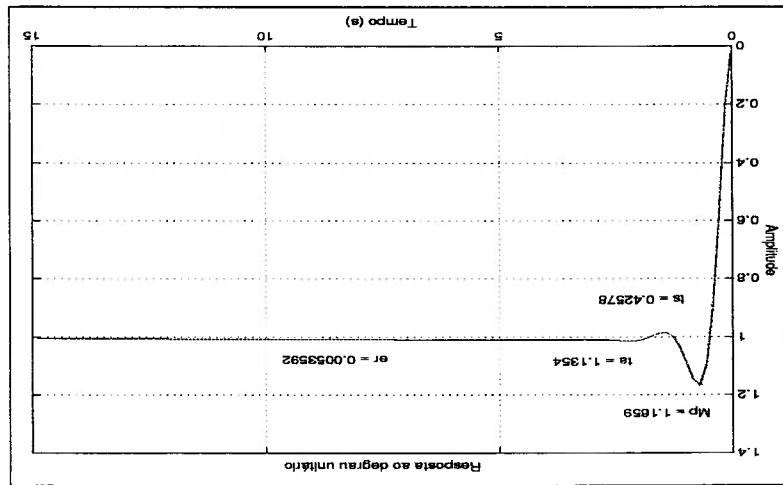
Podemos observar que o sistema responde rapidamente, $t_s = 0,42578$ s,

$$G_c(s) = \frac{s}{(24,5s^2 + 25s + 1,5)}$$

PID:

A Figura 4.9 mostra a resposta do sistema com o seguinte controlador

Figura 4.9: Resposta com PID sintonizado pelo AG



Simulação I

de busca orientada para a obtenção de resultados satisfatórios. A probabilidade de mutação, cruzamento foram ajustados baseando-se em valores experimentados, KRISHNAKUMAR (1994) e MITCHEL (1999). O algoritmo genético, por incorporar características probabilísticas, apresenta resultados diferentes para cada simulação. Eventualmente este método, pode até apresentar resultados ruins, quando o algoritmo não converge.

à excitação degrau na entrada, porém, com um tempo maior em relação à

resposta da Figura 4.7.

Os valores de sobre-sinal, $M_p = 1,1659$ e tempo de acomodação,

$t_a = 1,1354$ s obtidos com este controlador, são valores menores que os

obtidos usando o método de Ziegler-Nichols, ver Figura 4.7. No entanto,

há um erro em regime permanente para a resposta com este controlador,

$er = 0,53592\%$, que no caso da resposta da Figura 4.7 é nulo.

O sistema com o controlador Ziegler-Nichols, oscila com amplitudes maio-

res, menor amortecimento, mas tem uma resposta transitória menor que a

resposta do sistema, cujo controlador foi projetado pelo AG, onde há um

maior amortecimento, evidenciado pelas pequenas amplitudes na oscilação.

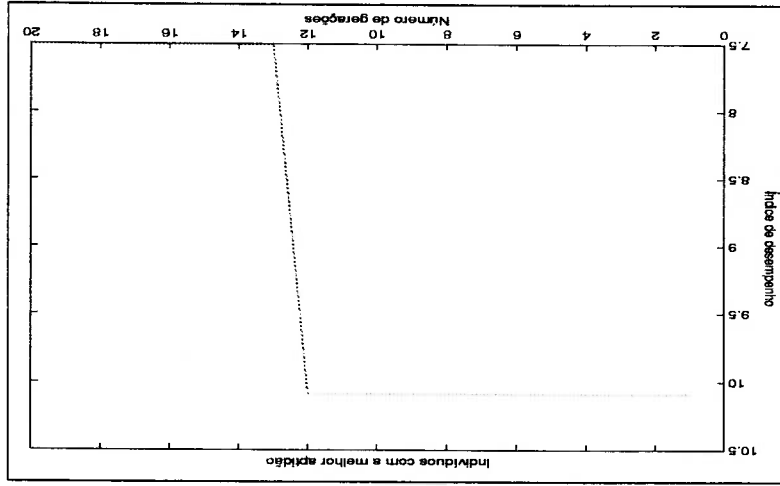


Figura 4.10: Evolução do índice de desempenho

Utilizamos 20 gerações para possibilitar que o AG convergisse para um

resultado de boa qualidade, isto é, caso o número de gerações fosse menor, poderíamos cometer o erro de utilizar valores obtidos quando o AG, ainda não tivesse convergido para um determinado valor. Observamos pela Figura 4.10 que o AG mantém um valor fixo em torno de 10, até a geração de número 12, quando então, o AG converge para um valor de índice de desempenho melhor, próximo de 7,5. Mostrando que o índice de desempenho foi minimizado como pretendíamos.

Simulação 2

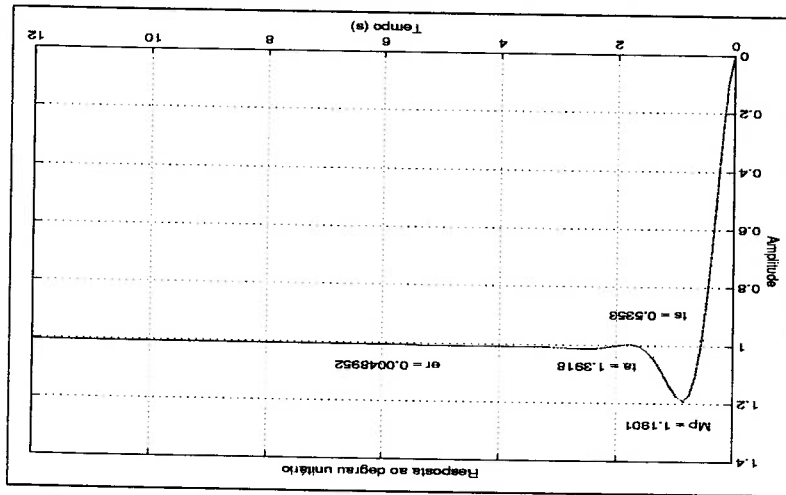


Figura 4.11: Resposta com PID sintonizado pelo AG

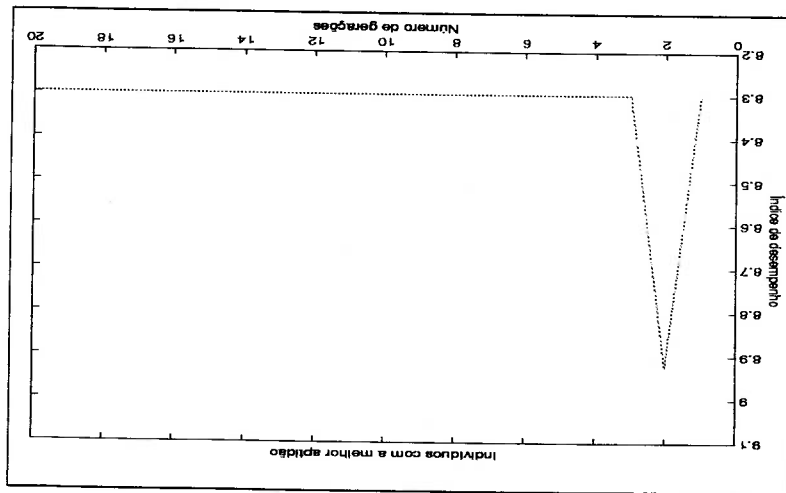
A resposta obtida pelo sistema, Figura 4.11, utilizando o controlador,

$$G_c(s) = \frac{19,5s^2 + 26s + 1}{s}$$

mostra que o sistema responde mais lentamente $t_s = 0,5353$ s e com um pequeno erro em regime permanente, $er = 0,48952\%$, porém, na Figura 4.7

O gráfico da Figura 4.12 que mostra os indivíduos com o melhor índice de desempenho em cada geração, indica que ocorreu uma divergência da primeira para a segunda geração, isto se deve à perda do indivíduo com bom índice de desempenho na segunda geração, mas na geração posterior ocorre a recuperação desse indivíduo, fazendo o índice de desempenho convergir para um valor em torno de 8,3.

Figura 4.12: Evolução do índice de desempenho



do sistema com o controlador Ziegler-Nichols, Figura 4.7. acomodação $t_a = 1,3918$ s são menores que os valores mostrados na resposta o erro é inexistente. No entanto o sobre-sinal $M_p = 1,1901$ e o tempo de

Simulação 3

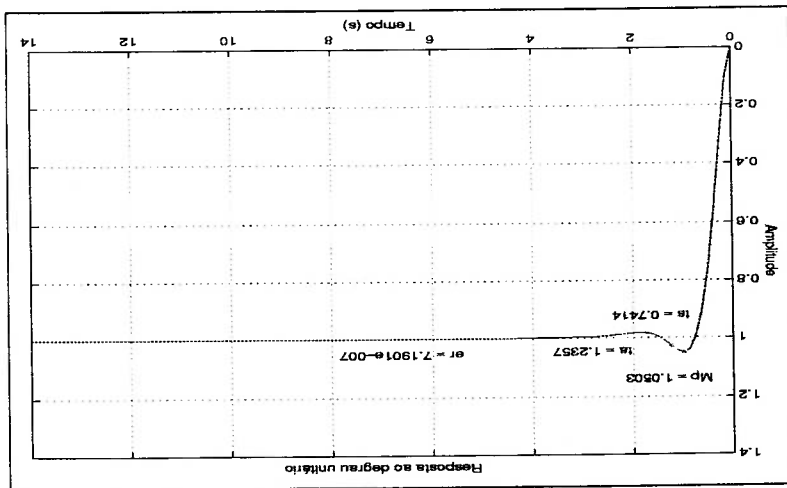


Figura 4.13: Resposta com PID sintonizado pelo AG

Para esta simulação obtivemos o controlador PID da seguinte forma:

$$G_c(s) = \frac{s}{(30s^2 + 27,5s + 0,5)}$$

Com este controlador observamos que o sistema responde oscilando pouco,

Figura 4.13, o sobre-sinal, $M_p = 1,050$ é menor que o obtido pela resposta

da Figura 4.7, assim como o tempo de acomodação, $t_a = 1,2357$ s, porém

com um tempo de subida $t_s = 0,7414$ s e um erro em regime permanente

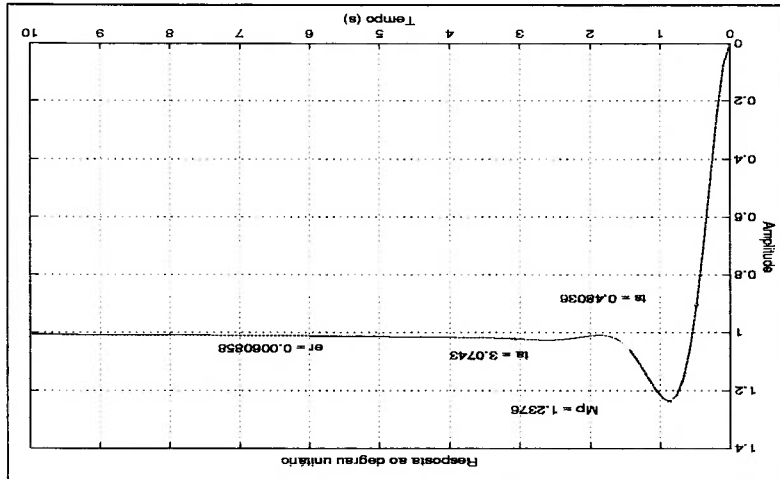
$er = 7,1901 \times 10^{-5}\%$ maiores, mas irrisório.

Caso tivéssemos um sistema onde fosse relevante um sobre-sinal e um

tempo de acomodação mínimos, em detrimento do tempo de resposta, o

controlador apresentado nesta simulação seria o indicado para este sistema.

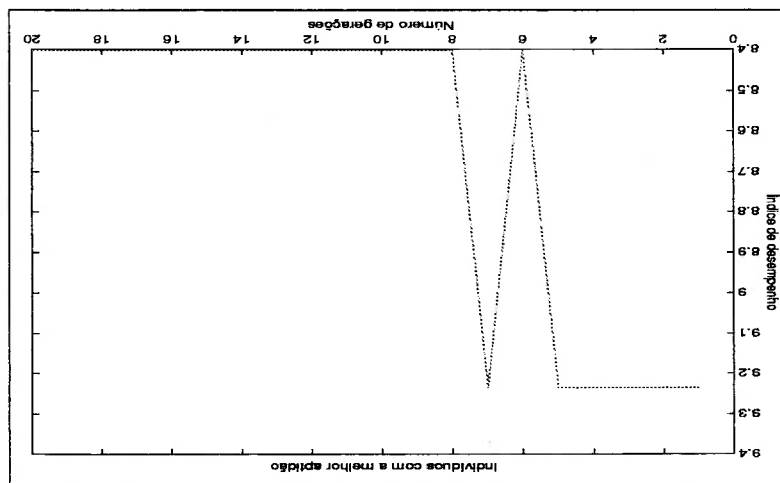
Figura 4.15: Resposta com PID sintonizado pelo AG



Simulação 4

após ocorrer uma divergência entre as gerações 6 e 7, Figura 4.14, em torno de 9,25 até convergir próximo de 8,4, na geração de número 8, O índice de desempenho tem o seu valor inicial minimizado, de um valor

Figura 4.14: Evolução do índice de desempenho



A função de transferência do controlador, apresentado a seguir:

$$G^c(s) = \frac{s}{(19s^2 + 29s + 4)}$$

faz o sistema responder com os seguintes valores característicos:

$$t_s = 0,48036 \text{ s}; M_p = 1,2376; t_a = 3,0743 \text{ s}; e_r = 0,60858\%.$$

Estes valores dinâmicos estão próximos dos valores obtidos na resposta da

Figura 4.7, sendo que o tempo de acomodação e o sobre-sinal são melhores,

poem o sistema responde mais lentamente ao degrau e observamos, também,

a ocorrência de um erro em regime permanente.

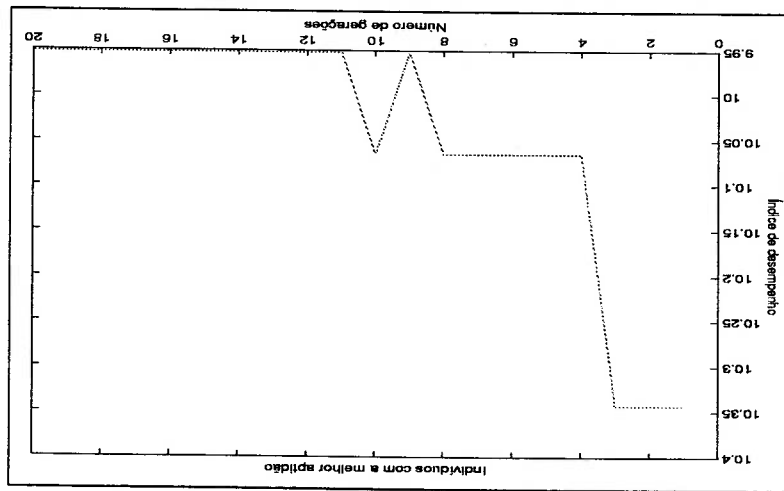


Figura 4.16: Evolução do índice de desempenho

O AG converge, depois de iniciar com índice de desempenho alto, 10,35 aproximadamente, para um valor próximo de 9,95 na geração de número 11,

Figura 4.16.

Os valores da última linha da Tabela 4.3, correspondem aos valores médios do tempo de subida, sobre-sinal, tempo de acomodação e erro em regime permanente obtidos pelos controladores projetados com o auxílio do AG. Observamos que estes valores médio estão próximos dos valores obtidos pelo controlador projetado pelo método Ziegler-Nichols. Sendo que os valores dinâmicos obtidos pelos controladores sintonizados pelo AG foram superiores ao método tradicional, com exceção do tempo de subida e do erro em regime permanente.

Ao compararmos os índices de desempenho das 4 simulações, observamos que o menor é o índice de desempenho da simulação 1, portanto o controlador

Tabela 4.3: Tabela comparativa de valores

Método aplicado	Tempo de subida t_s (s)	Sobre-sinal M_p	Tempo de acomodação t_a (s)	Erro em regime permanente er (%)
Ziegler-Nichols	0,37196	1,28	3,4539	0
AG (controlador1)	0,42578	1,1659	1,1354	0,53592
AG (controlador2)	0,5353	1,1901	1,3918	0,48952
AG (controlador3)	0,7414	1,0503	1,2357	$7,1901 \times 10^{-5}$
AG (controlador4)	0,4836	1,2376	3,0743	0,60858
Média	0,5465	1,1610	1,7093	0,4103

Para consolidar a validação do AG na busca dos ganhos do controlador PID, mostramos a seguir um exemplo do projeto de controle para um sistema de segunda ordem.

Neste exemplo adotamos as seguintes características dinâmicas: tempo de acomodação (t_a) na faixa $\pm 2\%$, tempo de subida (t_s) de 10 – 90% do valor final, sobre-sinal máximo (M_p) e o erro em regime permanente (er) da resposta para uma entrada à degrau unitário.

Primeiro ajustamos os ganhos do controlador utilizando o critério ITAE e em seguida, como no exemplo 1, utilizamos o AG para auxiliar no ajuste dos ganhos do controlador PID.

4.4 Exemplo 2

controladores projetados para o sistema considerado.

A Figura 4.28, apresenta um panorama das respostas obtidas com os 5 mais adequados ao índice de desempenho estabelecido é o controlador 1.

4.4.1 Critério ITAE

Sistemas projetados com o critério ITAE (iniciais em inglês para 'integral of time multiplied by absolute error') têm como características: sobre-sinal pequeno e um erro em regime permanente nulo para entradas a degrau, DORF (1993).

O procedimento de projeto consiste em três etapas:

1. Selecionar a frequência natural ω_n do sistema em malha-fechada para obter o tempo de acomodação requerido;

2. Determinar os três coeficientes usando a equação ótima apropriada, Tabela 4.4, e o valor de ω_n para obter $G_c(s)$.

3. Determinar um pré-filtro $G_p(s)$ para que a função de transferência de malha fechada não contenha zeros como requer a equação (4.11), DORF (1993).

Para um sistema cuja a função de transferência é de segunda ordem, utilizamos a relação,

$$t_a = \frac{\zeta\omega_n}{4}$$

para determinar o valor de ω_n para o tempo de acomodação requerido.

Determinando a função transferência em malha fechada pela relação,

No diagrama da Figura 4.17, o sinal $R(s)$ é o valor da velocidade desejada, este sinal é transmitido via rádio para o veículo, $D(s)$ é um distúrbio que

lo remotamente controlado, utilizado em campo de batalha.

A Figura 4.17 ilustra um sistema de controle de velocidade para um veicu-
degrau.

Tabela 4.4: Coeficientes ótimos de $T(s)$ no critério ITAE para uma entrada

$$s^6 + 3,25\omega_n s^5 + 6,60\omega_n^2 s^4 + 8,60\omega_n^3 s^3 + 7,45\omega_n^4 s^2 + 3,95\omega_n^5 s + \omega_n^6$$

$$s^5 + 2,8\omega_n s^4 + 5,0\omega_n^2 s^3 + 5,5\omega_n^3 s^2 + 3,4\omega_n^4 s + \omega_n^5$$

$$s^4 + 2,1\omega_n s^3 + 3,4\omega_n^2 s^2 + 2,7\omega_n^3 s + \omega_n^4$$

$$s^3 + 1,75\omega_n s^2 + 2,15\omega_n^2 s + \omega_n^3$$

$$s^2 + 1,4\omega_n s + \omega_n^2$$

$$s + \omega_n$$

obtemos a equação característica do sistema.

$$(4.8) \quad T_1(s) = \frac{C(s)}{G(s)} = \frac{R(s)}{1 + G_c G(s) H(s)}$$

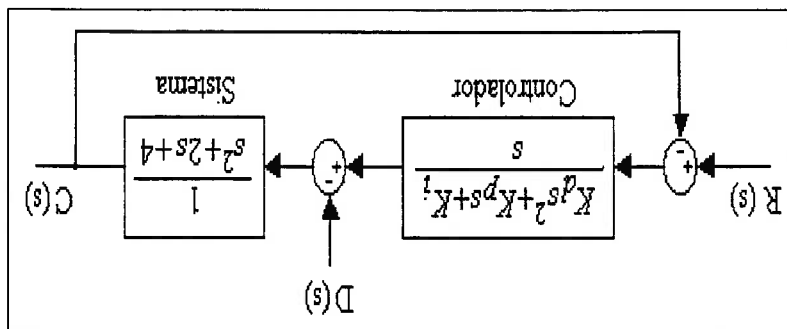


Figura 4.17: Sistema de controle de velocidade

DORF (1993)

representa a presença de pedras, colinas e depressões e $C(s)$ é a velocidade

obtida.

Desejamos encontrar valores de K_p , K_d , K_i , para que o sistema responda

com baixo sobre-sinal e baixo erro em regime permanente.

É requerido que:

$$t_n = \frac{4}{\zeta \omega_n} \leq 3,3s$$

Dado $\zeta = 0,34$, obtemos $\omega_n = 3,57$.

O sistema de controle de velocidade é dado por, DORF (1993).

$$(4.9) \quad G(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 4}$$

Neste caso, obtemos a seguinte FTMF:

$$(4.10) \quad T_1(s) = \frac{s^3 + (2 + K_d)s^2 + (4 + K_p)s + K_i}{K_d s^2 + K_p s + K_i}$$

$$T_1(s) = \frac{4,25s^2 + 23,4s + 45,5}{s^3 + (6,25)s^2 + (27,4)s + 45,5} \quad (4.13)$$

Substituindo estes ganhos na equação (4.10) temos,

$$K_i = 45,5$$

$$K_p = 4,25$$

$$K_v = 23,4$$

seguintes valores de ganho, para o controlador:

a equação característica da função de transferência, equação (4.10) temos os

Substituindo o valor de ω_n por 3,57 na equação (4.12) e comparando com

$$(s^3 + 1,75\omega_n s^2 + 2,15\omega_n s + \omega_n^3) \quad (4.12)$$

por:

Neste caso, a equação característica ótima é dada segundo a Tabela 4.4

$$T(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_0}{s^n + b_{n-1}s^{n-1} + \dots + b_1s + b_0} \quad (4.11)$$

forma:

ser determinados para uma função de transferência em malha fechada, na

Os coeficientes que minimizam o índice de desempenho, Tabela 4.4, devem

Devido aos zeros da função de transferência, equação (4.13), necessitamos

projetar um pré-filtro para o sistema.

O pré-filtro deve ser projetado obedecendo a relação,

$$T_1(s) = \frac{(4,25s^2 + 23,4s + 45,5)G_p(s)}{45,5} = \frac{s^3 + (6,25)s^2 + (27,4)s + 45,5}{45,5}$$

pois desejamos eliminar os zeros da função de transferência.

Portanto o pré-filtro requerido é:

$$G_p(s) = \frac{45,5}{4,25s^2 + 23,4s + 45,5}$$

Dividindo o numerador e o denominador por 4,25 temos,

$$G_p(s) = \frac{10,71}{s^2 + 5,51s + 10,71}$$

A Figura a seguir ilustra o sistema com o controlador e o pré-filtro pro-

jetados.

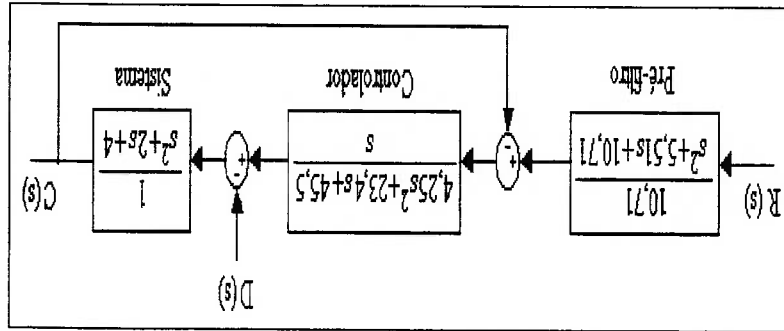


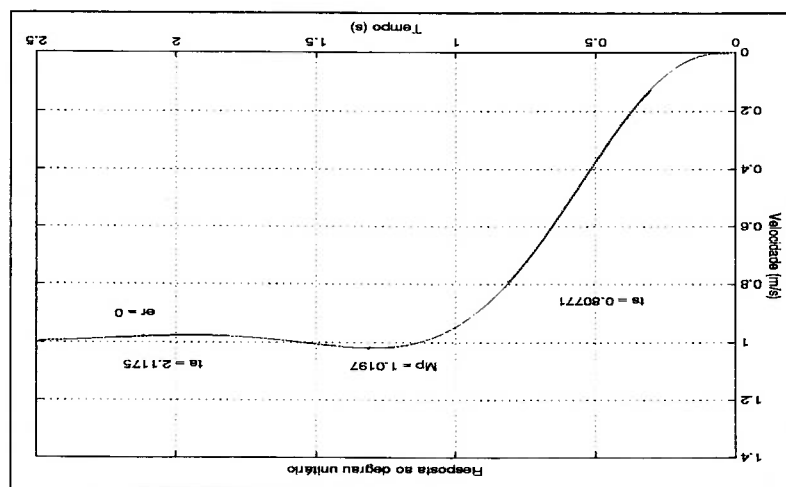
Figura 4.18: Sistema de controle de velocidade

A Figura 4.19 mostra a resposta do sistema com o controlador PID e o

pré-filtro projetados.

Observamos que as exigências de projeto foram satisfeitas, pois o sobre-sinal é muito pequeno $M_p = 1,0197$, o erro em regime estacionário é nulo e o tempo de acomodação $t_a = 2,1175$ s está dentro do que fora requerido, e o tempo de subida é $t_s = 0,80771$ s.

Figura 4.19: Resposta do sistema ao degrau unitário



4.4.2 Projeto do controlador PID utilizando o AG

Foram utilizados os seguintes valores para os parâmetros do AG desen-

volvido para o projeto do controlador PID:

- Número de indivíduos por geração = 21;

- Tamanho do cromossomo = 105;

- Probabilidade de mutação = 0,001;

- Probabilidade de cruzamento = 0,95;

- Pontos de cruzamento = 2;

- Número de gerações = 20;

- Método de seleção por torneio.

Para este exemplo foram utilizados os seguintes coeficientes para a equação

(4.7) do índice de desempenho:

$$k_2 = 5$$

$$k_3 = 10$$

$$k_4 = 0,9$$

$$k_5 = 10$$

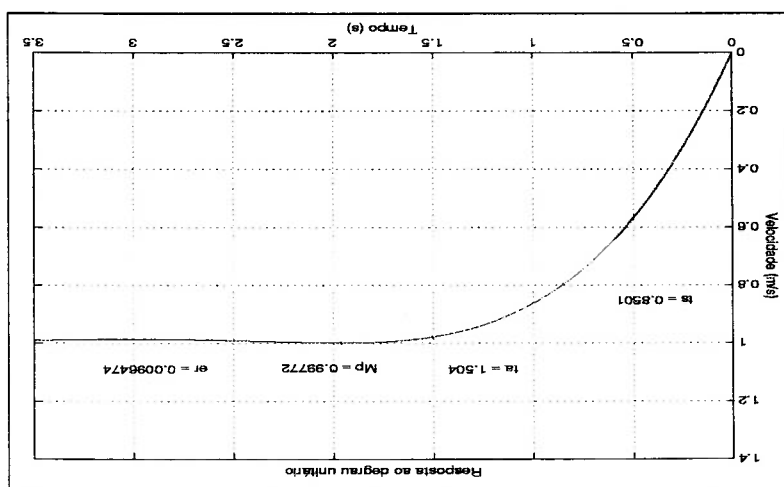
Portanto temos o seguinte índice de desempenho:

ITAE, Figura 4.19, mas é aceitável. um pouco maior que o tempo de subida obtido pelo controlador do critério requerido, $t_u = 1,504$ s. Porém o valor do tempo de subida $t_s = 0,8501$ s, é permanente $er = 0,96474\%$ e com tempo de acomodação bem menor que o faz o sistema responder sem sobre-sinal, $M_p = 0,99772$, com erro em regime

$$G^c(s) = \frac{s}{(1,5s^2 + 3,5s + 7,5)}$$

A resposta mostrada pela Figura 4.20, obtida com o controlador

Figura 4.20: Resposta ao degrau unitário

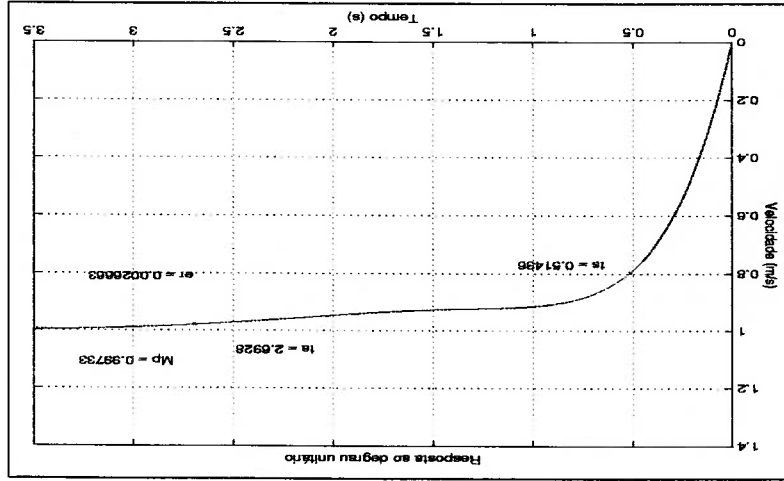


Simulação 1

Simulamos o AG e obtivemos quatro controladores, apresentados a seguir.

$$ID = 5t_a + 10t_s + 0,9M_p + 10er$$

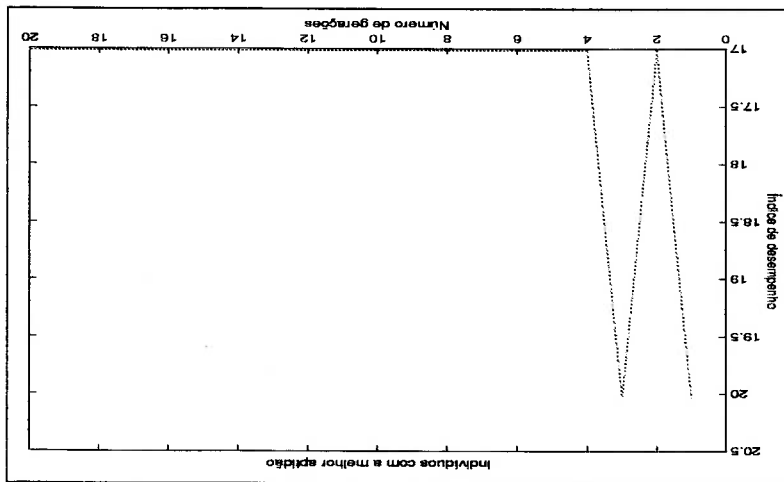
Figura 4.22: Resposta ao degrau unitário



Simulação 2

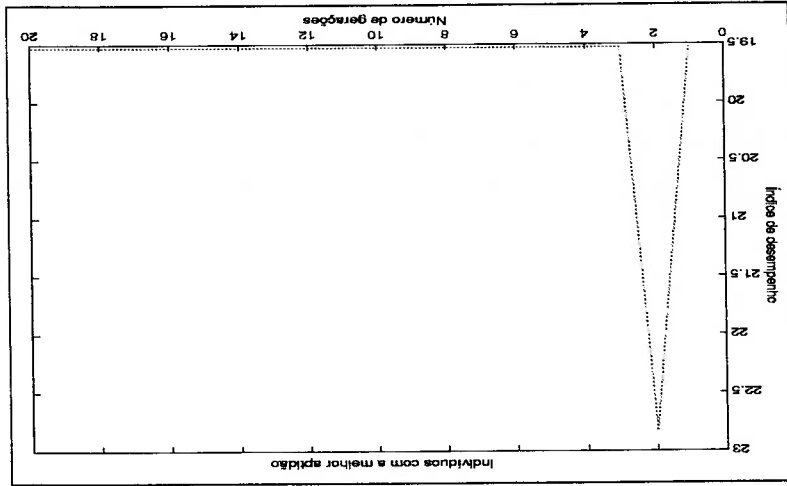
A Figura 4.21 mostra o comportamento da curva que representa os menores índices de desempenho de cada geração. O AG converge para um valor próximo de 17, após divergir nas primeiras gerações.

Figura 4.21: Evolução do índice de desempenho



A curva do índice de desempenho, mostra no gráfico da Figura 4.23, que há uma rápida divergência no valor do índice de desempenho, pela perda de

Figura 4.23: Evolução do índice de desempenho



verifica na resposta com o controlador projetado pelo critério ITAE. Figura 4.19, o tempo de acomodação é maior e o erro em regime permanente, O sistema responde mais rápido que o controlador do critério ITAE,

$er = 0,26663\%$. seguintes características: $t_s = 0,51436$ s, $M_p = 0,99733$, $t_v = 2,6928$ s e rado, com o controlador apresentado. Observamos que esta resposta tem as A Figura 4.22 é a resposta ao degrau unitário aplicado no sistema conside-

$$G_c(s) = \frac{s}{(3s^2 + 7s + 9,5)}$$

O segundo controlador PID sintonizado pelo AG é:

um bom indivíduo, com a consequente convergência para um valor em torno

de 19,5, na geração 3.

Simulação 3

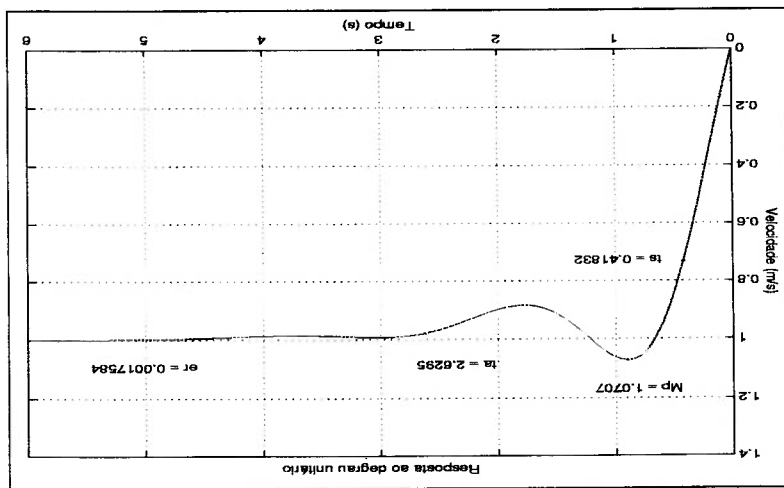


Figura 4.24: Resposta ao degrau unitário

O terceiro controlador obtido está apresentado a seguir:

$$G_c(s) = \frac{s}{(1,5s^2 + 9,5s + 10)}$$

Os valores dinâmicos registrados na resposta da Figura 4.24, são

$t_s = 0,41832$ s, $M_p = 1,0707$, $t_a = 2,6295$ s e $er = 0,17584$ %. Comparando

esta resposta com a que fora apresentada na Figura 4.19, podemos verificar que o tempo de subida do presente caso é menor, mas o sobre-sinal, o tempo de acomodação e o erro em regime permanente são maiores. Apesar disto, com relação aos critérios de projeto, este controlador apresenta uma resposta

satisfatória.

ficamos que o sistema responde rapidamente ao degrau na entrada, com
 Com base nos dados obtidos pela resposta mostrada na Figura 4.26, veri-

$$M_p = 1,0089, t_a = 2,0217s \text{ e } er = 0,88556\%.$$

Com este controlador temos os seguintes valores dinâmicos: $t_s = 0,63979s$,

$$G_c(s) = \frac{s}{(3s^2 + 5s + 9,5)}$$

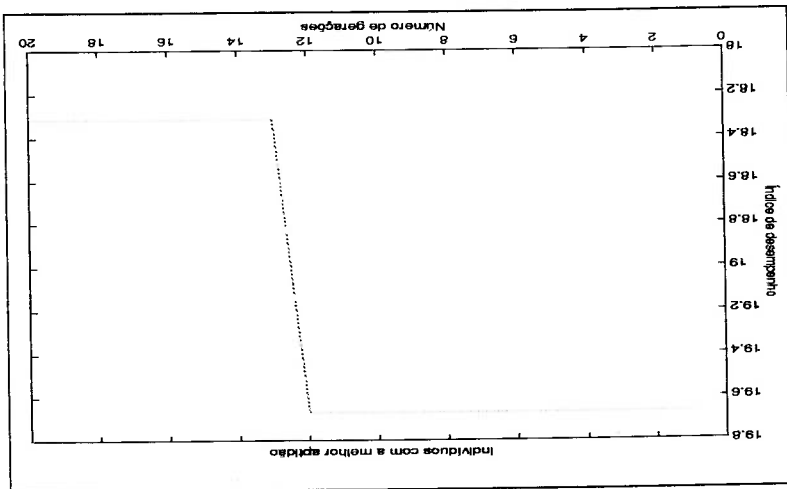
da a seguir:

Neste caso obtivemos um controlador com função de transferência, mostra-

Simulação 4

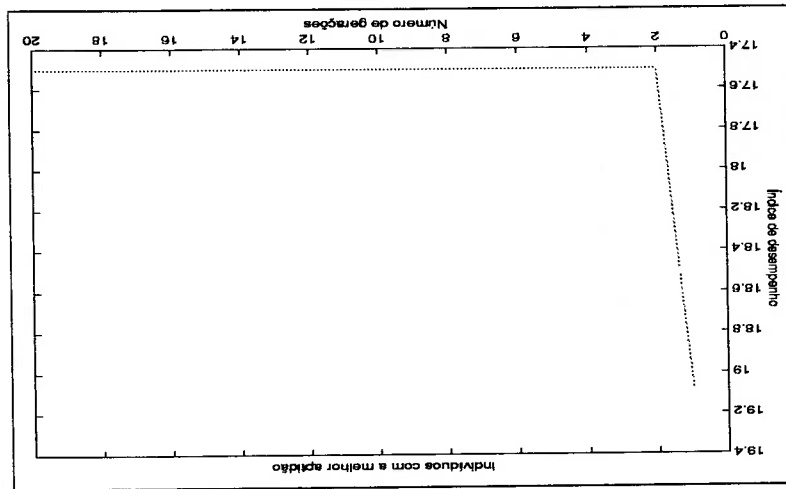
de desempenho menor, em torno de 18,3, de número 12, ocorrendo posteriormente uma convergência para um índice
 penho se estabelece inicialmente, num valor próximo de 19,7, até a geração
 Observamos no gráfico da Figura 4.25, que a curva do índice de desem-

Figura 4.25: Evolução do índice de desempenho



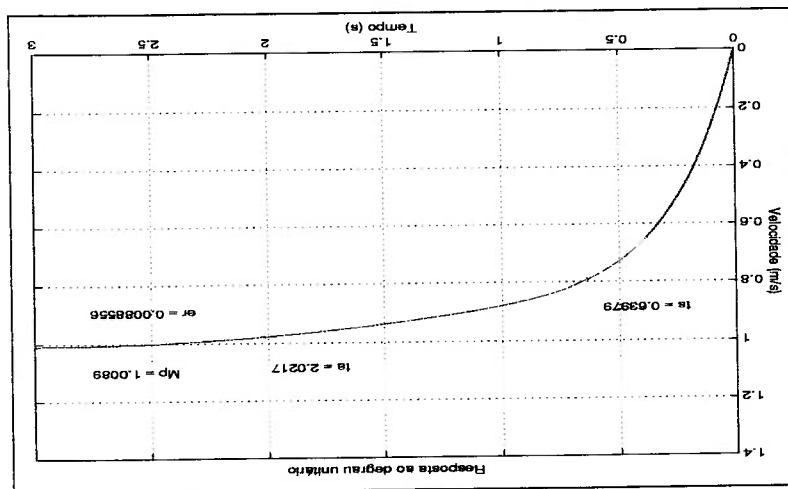
Na segunda geração, notamos que o AG converge estacionando num valor próximo de 17,5. Portanto o AG minimizou o índice de desempenho.

Figura 4.27: Evolução do índice de desempenho



4.19. Os valores são melhores, com exceção do erro em regime permanente. sobre-sinal e com um tempo de acomodação menor que o obtido na Figura

Figura 4.26: Resposta ao degrau unitário



Verificamos que o índice de desempenho da simulação 1 é o menor das quatro simulações e portanto este controlador é o mais adequado e de fato, verificamos que apesar do erro em regime permanente $er = 0,96474\%$, a resposta da Figura 4.22 tem valores menores que a resposta obtida com o controlador projetado pelo critério ITAE.

Observamos, no critério ITAE, a necessidade do projeto de um pré-filtro ao passo que no projeto do controlador utilizando o AG não houve a necessidade de tal projeto, em decorrência disto o projeto pode eventualmente ter

Na Tabela 4.5, comparamos os resultados gerados pelos controladores,

obtidos por AG e pelo critério ITAE.

Tabela 4.5: Tabela comparativa de valores

Método	Tempo de subida $t_s(s)$	Sobre-sinal M_p	Tempo de acomodação $t_a(s)$	Erro em regime permanente $er(\%)$
ITAE	1,1133	1,0197	2,1175	0
AG (controlador1)	0,8501	0,99772	1,504	0,96474
AG (controlador2)	0,51436	0,99733	2,6928	0,26663
AG (controlador3)	0,41832	1,0707	2,6295	0,17584
AG (controlador4)	0,63979	1,0089	2,0217	0,88556
Média	0,60564	1,01866	2,212	0,57319

o seu custo reduzido com a eliminação deste componente.

Na Figura 4.29 apresentamos um comparativo das respostas obtidas pelos vários controladores projetados.

Os resultados apresentados pelo dois exemplos, nos leva a concluir que o AG pode ser um bom recurso no auxílio de projetos de controladores PID e são muitas vezes de qualidade superior aos métodos Ziegler-Nichols e ITAE, no entanto, o AG apresenta como desvantagem, o tempo despendido para a obtenção de bons resultados, quando comparado aos outros dois métodos aqui considerados. Isto se deve ao ajuste dos vários parâmetros mencionados, além dos parâmetros do índice de desempenho.

Figura 4.29: Resposta dos controladores ao degrau unitário

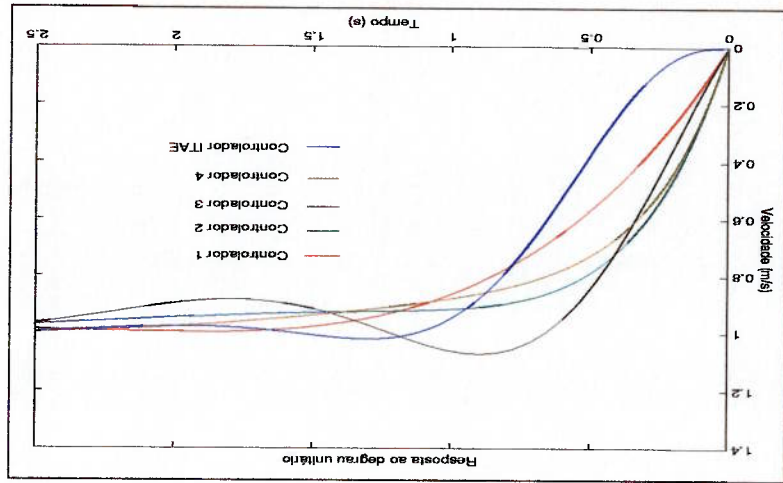
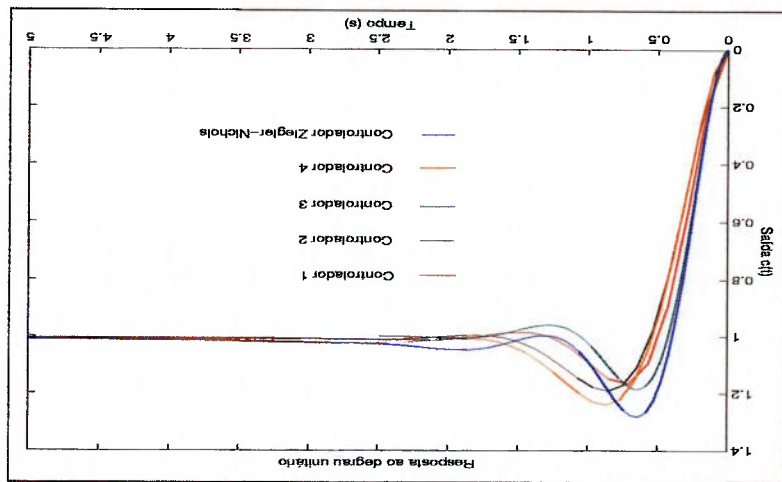


Figura 4.28: Resposta dos controladores ao degrau unitário



Capítulo 5

Projeto de um controlador para turbina eólica

Neste capítulo apresentamos o desenvolvimento de um controlador PID sintonizado por um AG para o controle de uma turbina eólica, cujo modelo matemático foi apresentado no capítulo 3.

Os resultados das simulações são apresentados e analisados. Paralelamente apresentamos comparações do desempenho do controlador projetado com auxílio do AG, frente ao controlador PI projetado originalmente em GRIMBLE et al. (1992).

Apresentamos, inicialmente, os resultados obtidos com o modelo dinâmico da turbina eólica, sem os distúrbios e ruídos.

São apresentadas simulações para os seguintes casos de velocidade do

vento: 15, 706 m/s, 12, 654 m/s e 18, 845 m/s.

Destacamos que as mudanças na velocidade do vento são simuladas pela alteração do parâmetro K_φ no modelo da turbina, conforme a Tabela 3.2.

O objetivo de controle é manter a potência produzida, a despeito das alterações da velocidade do vento.

Para todos os controladores obtidos, utilizamos os seguintes valores para os parâmetros do AG.

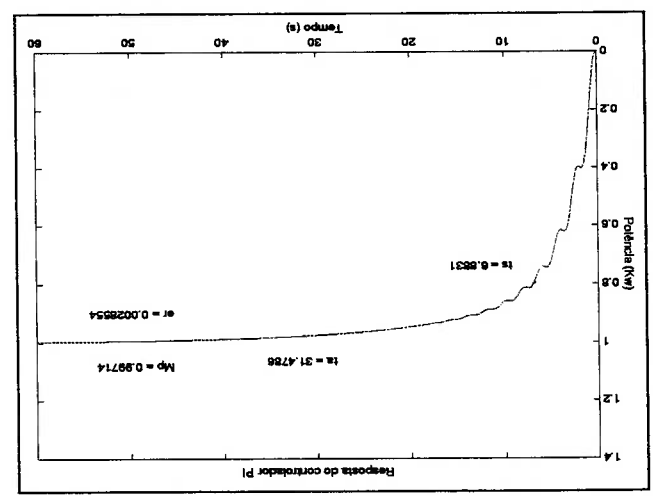
- Número de indivíduos por geração = 21;
- Tamanho do cromossomo = 126;
- Probabilidade de mutação = 0,001;
- Probabilidade de cruzamento = 0,97;
- Pontos de cruzamento = 2;
- Número de gerações = 30;
- Método de seleção por torneio.

O índice de desempenho definido é: $ID = k_2 t_a + k_3 t_s + k_4 M_p + k_5 e_r$ e os valores dos coeficientes para presente caso são os seguintes: $k_2 = 1$, $k_3 = 1$, $k_4 = 50$ e $k_5 = 200$.

Portanto, temos o seguinte índice de desempenho:

A Figura 5.1 ilustra a alteração da potência produzida para um novo patamar. Observamos na resposta, um tempo de subida $t_s = 6,8831$ s, um tempo de acomodação $t_a = 31,4786$ s e um erro em regime permanente

Figura 5.1: Resposta ao degrau unitário: PI



do projeto original, GRIMBLE et al. (1992). Reproduzimos inicialmente a resposta da turbina utilizando o controlador PI

5.1 Caso 1: Velocidade do vento - 15,706 m/s

vento. Este índice de desempenho será utilizado para todas as velocidades de

$$ID = t_a + t_s + 50M_p + 200e_r$$

$er = 0,28554\%$. Verificamos ainda, um subssinal $M_p = 0,99714$, que pode ser considerado desprezível para o projeto em questão. A resposta converge para o valor unitário, entretanto responde lentamente ao degrau na entrada. Apresentamos a seguir os resultados dos controladores obtidos com o auxílio do AG.

Caso 1: Simulação 1

Para a primeira simulação, obtivemos o controlador apresentado a seguir:

$$G_c(s) = \frac{s}{(2,7 \times 10^{-3}s^2 + 2,7 \times 10^{-3}s + 4,7 \times 10^{-3})}$$

cujas resposta é ilustrada na Figura 5.2, para a mesma condição de velocidade

do vento da Figura 5.1.

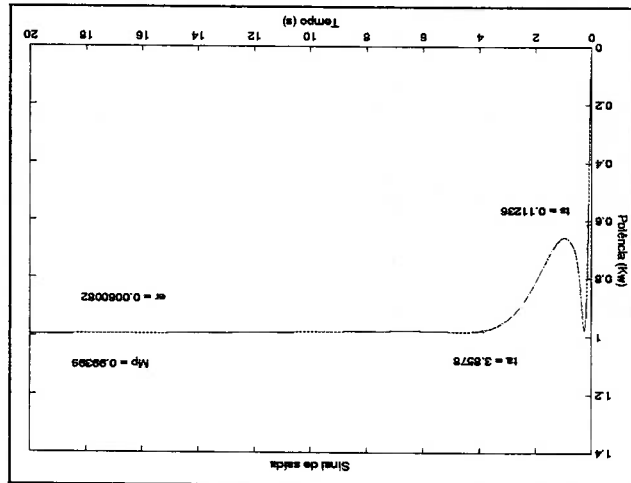
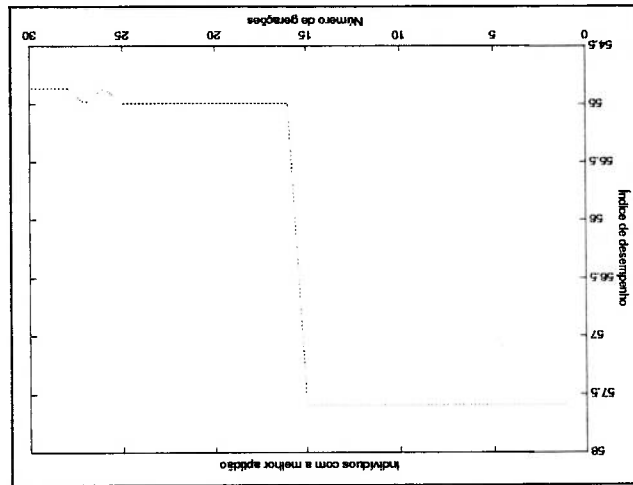


Figura 5.2: Resposta ao degrau unitário: AG

Analisando a Figura 5.2, observamos a rápida resposta com um tempo de subida, $t_s = 0,11236$ s e um tempo de acomodação, $t_a = 3,8578$ s, inferiores

A Figura 5.3 mostra o comportamento do ID para 30 gerações. Podemos observar uma pequena degradação no índice de desempenho, próximo à geração de número 25, natural em AGs, indicando provavelmente a perda de uma boa solução. Observamos que o AG recupera a solução e a melhora em seguida.

Figura 5.3: Evolução do índice de desempenho



igualmente desprezível. Observamos também um subsinal, $M_p = 0,99399$, que pode ser considerado perante $er = 0,60082\%$ é maior do que na resposta ilustrada na Figura 5.1. aos obtidos pelo uso do controlador PI original. O erro em regime perma-

Caso 1: Simulação 2

Nesta simulação, o controlador PID obtido pelo AG é:

$$G_c(s) = \frac{(2,1 \times 10^{-3}s^2 + 2,2 \times 10^{-3}s + 5,3 \times 10^{-3})}{s}$$

A resposta ao degrau, Figura 5.4, para este controlador mostra que o

sistema responde rapidamente $t_s = 0,18113$ s, com um tempo de acomodação

$t_a = 2,9239$ s, com um erro $er = 0,86576\%$ e sem sobre-sinal $M_p = 0,99134$.

Comparando à simulação 1, podemos notar que o tempo de subida obtido

é maior, bem como o erro em regime permanente. No entanto, o transitório

na simulação 2 é menor que o transitório da simulação 1.

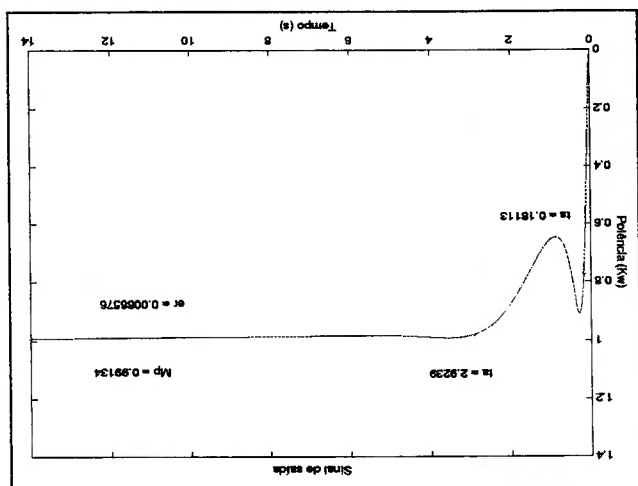


Figura 5.4: Resposta ao degrau unitário: AG

Na Figura 5.5, observamos que o índice de desempenho é minimizado de

um valor em torno de 57,8 para um valor próximo de 54,4 em 23 gerações.

$M_p = 0,99366$, desprezível.

5.2. Do mesmo modo que nas simulações anteriores, neste caso há subsinal, na Figura 5.4 e equivalente ao erro da primeira simulação com AG, Figura erro em regime permanente $er = 0,63369\%$ é menor que o erro apresentado nas simulações anteriores, assim como o tempo de acomodação $t_a = 7,0063$ s. O tempo de subida, $t_s = 0,35227$ s, maior do que fora apresentado nas Este controlador faz o sistema responder, como mostra a Figura 5.6, com

$$G^c(s) = \frac{s}{(9 \times 10^{-4}s^2 + 2,6 \times 10^{-3}s + 4,5 \times 10^{-3})}$$

Na simulação 3 o AG sintonizou o seguinte controlador:

Caso 1: Simulação 3

Figura 5.5: Evolução do índice de desempenho

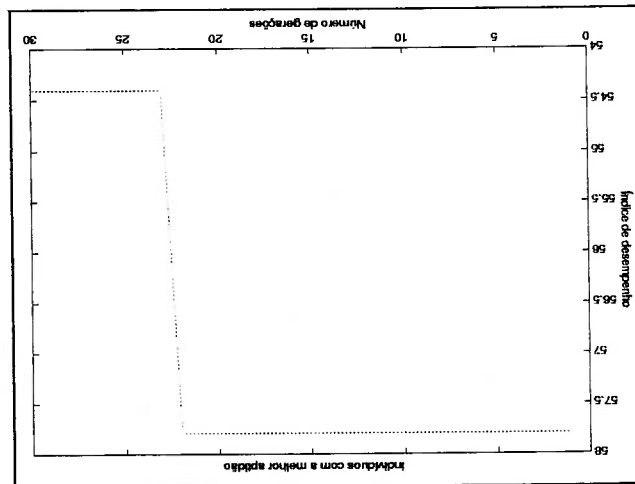
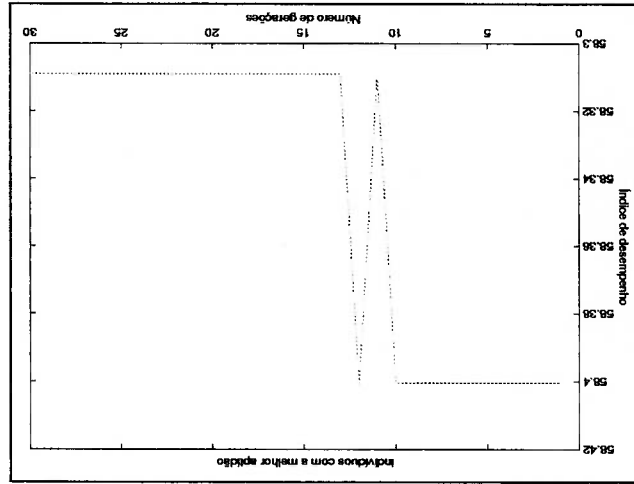
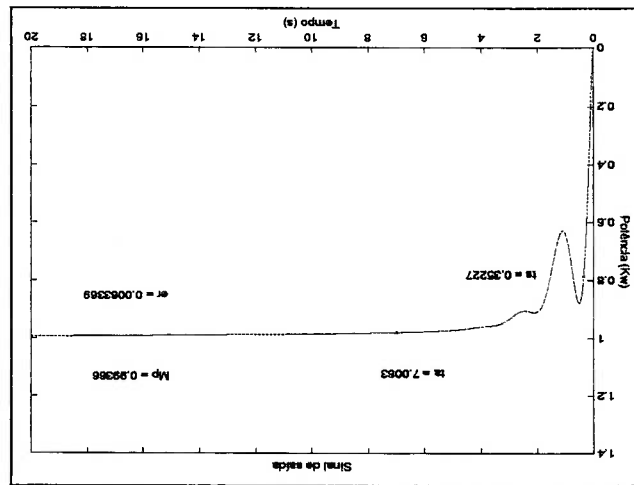


Figura 5.7: Evolução do índice de desempenho



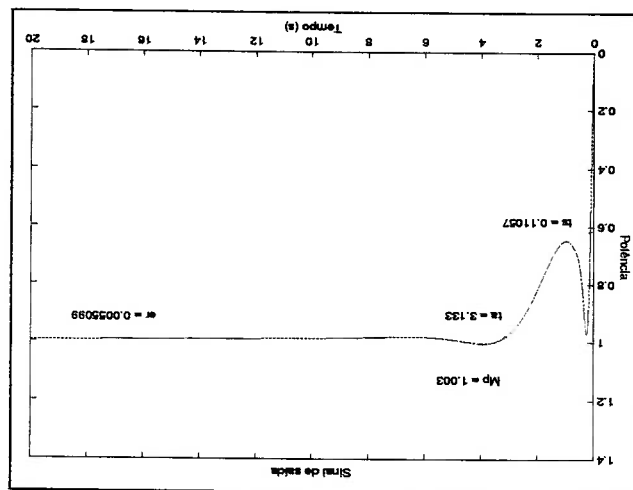
A Figura 5.7 mostra que ocorre uma degradação, entre as gerações 11 e 13, causada pela perda de um indivíduo com um bom índice. Porém, o índice de desempenho é minimizado para um valor próximo 58,31.

Figura 5.6: Resposta ao degrau unitário: AG



A Figura 5.8 mostra a resposta do sistema com o controlador sintonizado pelo AG. Obtivemos os valores dinâmicos, $t_s = 0,11057$ s, $t_a = 3,133$ s, $er = 0,55099\%$ e $M_p = 1,003$. Os valores de tempo de subida e erro em regime permanente são menores que os anteriores. O tempo de acomodação apresentado na Figura 5.8 é o menor, com exceção do valor obtido na resposta da Figura 5.4. Na Figura 5.8, observamos a ocorrência de um sobre-sinal $M_p = 1,003$, diferentemente do que ocorre nas respostas das outras simulações.

Figura 5.8: Resposta ao degrau unitário: AG



$$G_c(s) = \frac{(2,8 \times 10^{-3}s^2 + 2,1 \times 10^{-3}s + 5,0 \times 10^{-3})}{s}$$

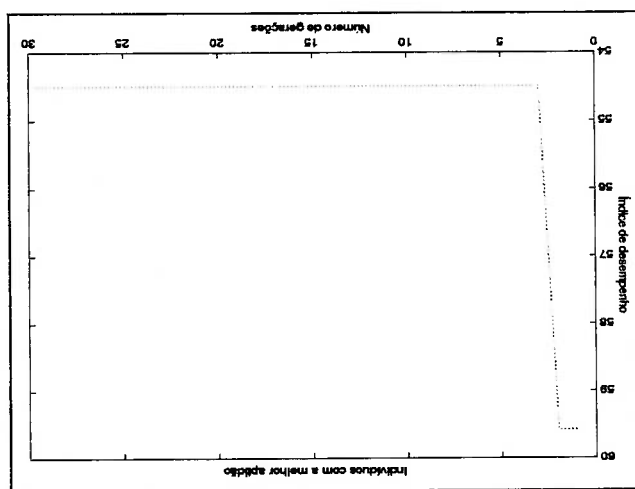
O controlador sintonizado, nesta simulação, pelo AG é:

Caso 1: Simulação 4

A Figura 5.9, apresenta uma rápida convergência, da geração 2 para a 3, onde o AG minimiza o índice de desempenho. Notamos ainda, que após a convergência não há a tendência de minimizar o índice. Comparando as quatro simulações pelo índice de desempenho, podemos concluir que o controlador da simulação 2 tem o menor índice, 54,4, comparável ao índice de desempenho obtido na simulação 4, que é de 54,5. Portanto, o controlador da simulação 2 é o mais adequado das quatro simulações apresentadas.

Nas simulações 5 e 6 que apresentamos a seguir, foi alterado apenas o número de gerações, de 30 para 500 gerações, a fim de investigar o comportamento do AG na busca do valor ótimo global.

Figura 5.9: Evolução do índice de desempenho



Caso 1: Simulação 5

O controlador obtido nesta simulação, gera a resposta apresentada na

Figura 5.10.

$$G_c(s) = \frac{s}{(1,2 \times 10^{-3} s^2 + 1,1 \times 10^{-3} s + 5,2 \times 10^{-3})}$$

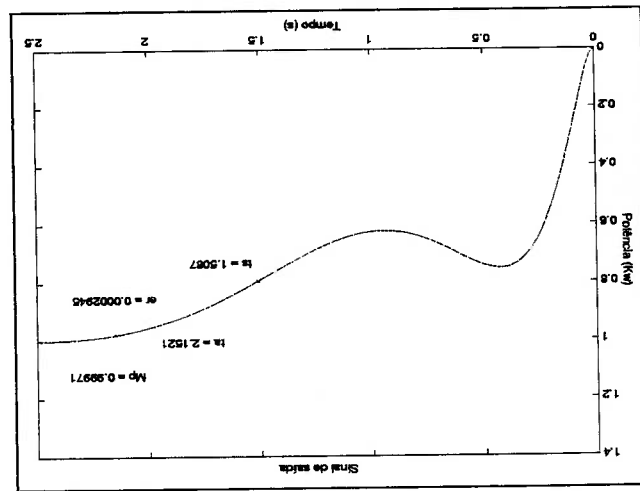


Figura 5.10: Resposta ao degrau unitário: AG

Da Figura 5.10 verificamos que o tempo de subida $t_s = 1,5087$ s é maior do que fora apresentado nas simulações anteriores, porém, o tempo de acomodação $t_a = 2,1521$ s é menor, assim como o erro em regime permanente, $er = 0,02945$ %. E igualmente aos casos anteriores, apresenta um subsinal $M_p = 0,99971$.

Observamos pela Figura 5.11, que o AG converge para um valor em torno de 54 até a geração de número 338, quando então o índice é novamente

Nesta simulação, o controlador PID obtido faz o sistema responder com os seguintes valores dinâmicos: $t_s = 0,12151$ s, $t_a = 3,5644$ s, $M_p = 0,99594$ e $er = 0,40613$ %, conforme é apresentado na Figura 5.12.

O sistema responde com um erro em regime permanente maior quando comparado à simulação 5, mas comparando aos demais casos verificamos que esta simulação apresenta um erro menor. O tempo de acomodação, com exceção da resposta apresentada na simulação 3, é similar às simulações

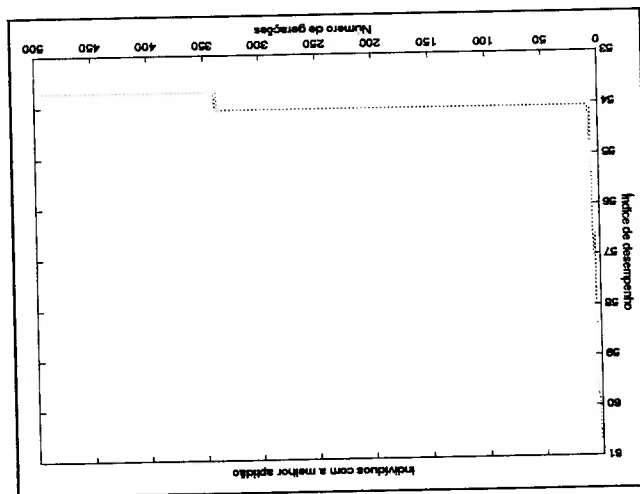
$$G_c(s) = \frac{(2,9 \times 10^{-3}s^2 + 2,2 \times 10^{-3}s + 4,5 \times 10^{-3})}{s}$$

Caso 1: Simulação 6

500, sem a tendência de minimizá-lo.

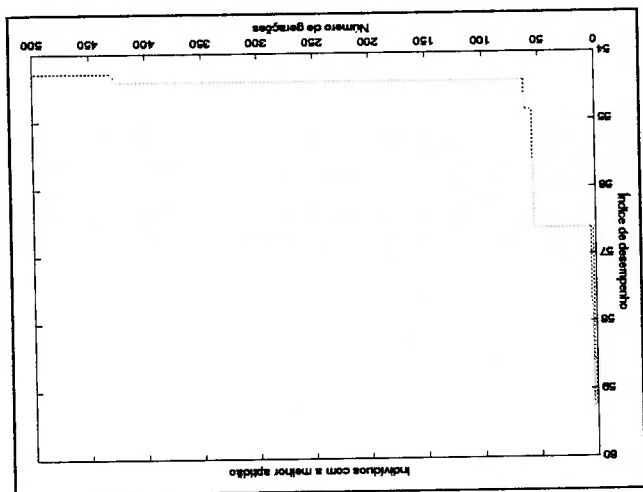
minimizado para o valor 53, 7, mantendo este índice até a geração de número

Figura 5.11: Evolução do índice de desempenho



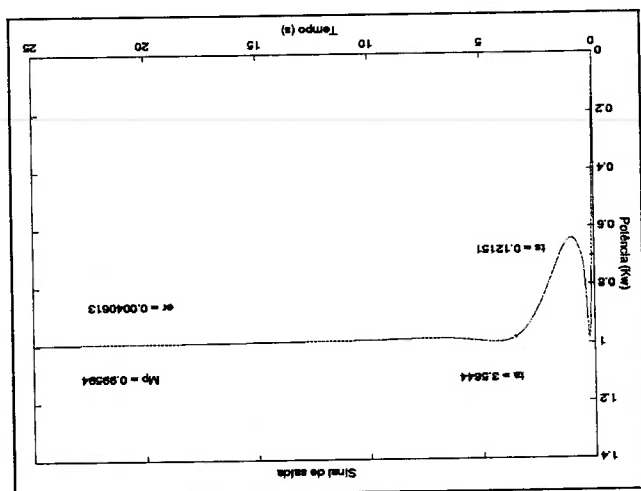
Na Figura 5.13, verificamos que o AG minimiza o índice de desempe-

Figura 5.13: Evolução do índice de desempenho



observar que na maioria dos casos, os sistemas respondem sem sobre-sinal, porém comparável aos demais casos. Assim como na Figura 5.12, podemos anteriores. O tempo de subida é maior do que o resultado da simulação 5,

Figura 5.12: Resposta ao degrau unitário: AG



ho, mantendo um determinado índice, por algumas gerações, porém ocorre seguidas melhorias nesse índice, isto deve-se a característica do AG, de não ficar "preso" a mínimos locais. Finalmente podemos destacar que o AG mini- mizou o índice de desempenho de 59,3, aproximadamente, para um valor em torno de 54,4.

Nas simulações 5 e 6 podemos verificar a melhoria no valor do índice de desempenho, principalmente na simulação 5, porém o tempo de simulação eleva-se de 55-57 segundos, em 30 gerações, para 14-15 minutos, em 500 gerações.

Caso desejássemos determinar o melhor controlador pelo índice de desempenho em tempo real, o processo ficaria prejudicado pelo longo tempo de simulação despendido para sintonizar o controlador.

Tabela 5.1: Tabela comparativa de valores: Caso 1

Controlador	PI	1	2	3	4	5	6
Gerações	-	30	30	30	30	500	500
t_s (s)	6,8831	0,11236	0,18113	0,35227	0,11057	1,5087	0,12151
t_a (s)	31,4786	3,8578	2,9239	7,0063	3,133	2,1521	3,5644
M_p	0,99714	0,99399	0,99134	0,99366	1,003	0,99971	0,99594
er (%)	0,028554	0,60082	0,86576	0,63369	0,55099	0,02945	0,40613
ID	-	54,87	54,40	58,30	54,49	53,8	54,28

Comparando finalmente as seis simulações realizadas, Tabela 5.1, podemos concluir analisando o índice de desempenho mínimo, que o controlador da simulação 5, foi o melhor que obtivemos, pois o seu índice de desempenho é o menor de todos, 53,8.

Analisando os valores dinâmicos considerados, destacamos aqui, que os resultados obtidos pelos controladores PID, projetados com auxílio do AG, são sempre superiores ao controlador PI original.

5.2 Caso 2: Velocidade do vento - 12,654 m/s

Na sequência, simulamos dois casos para a velocidade de vento igual a 12,654 m/s.

Inicialmente apresentamos a resposta com o controlador PI original, onde se faz necessária a consulta da Tabela 3.1, para obter o valor de 0,4536, usado para modificar os ganhos do controlador para a velocidade de vento considerada.

A resposta do controlador PI neste caso é mostrada na Figura 5.14.

Observamos valores elevados para o tempo de subida, $t_s = 43,2855$ s e o tempo de acomodação, $t_a = 115,1834$ s. Porém, verificamos uma resposta com um erro em regime permanente pequeno, $er = 0,25131\%$ e novamente observamos um sub-sinal, $M_p = 0,99749$.

casos. Há a degradação do índice de desempenho entre as gerações 1 e 3, na A Figura 5.16 ilustra a evolução do índice de desempenho para 30 gerações.

Na Figura 5.15, observamos os seguintes valores dinâmicos da resposta ao degrau, $t_s = 0,21504$ s, $t_a = 16,9348$ s, $M_p = 0,99316$ e $er = 0,68379$ %. Comparamos estes valores com os valores obtidos na resposta da Figura 5.14 e verificamos que a resposta da Figura 5.15 apresenta melhores resultados, com exceção do erro em regime permanente, que é desprezível em ambos os

$$G_c(s) = \frac{(4,6 \times 10^{-3}s^2 + 4 \times 10^{-4}s + 4,5 \times 10^{-3})}{s}$$

a Figura 5.15.

O controlador PID sintonizado, faz o sistema responder conforme mostra

Caso 2: Simulação 1

Figura 5.14: Resposta ao degrau unitário: PI

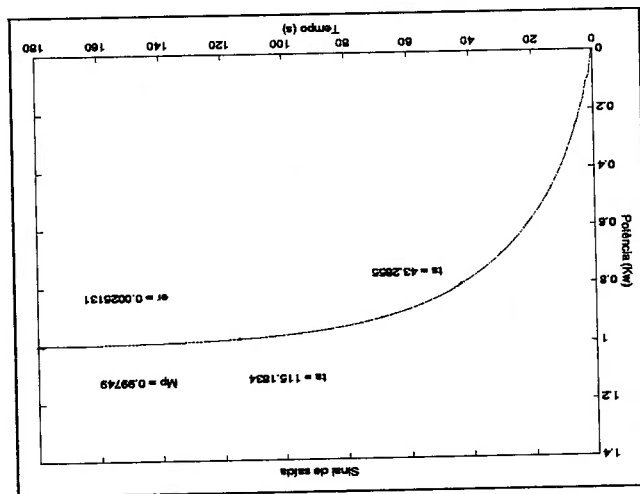
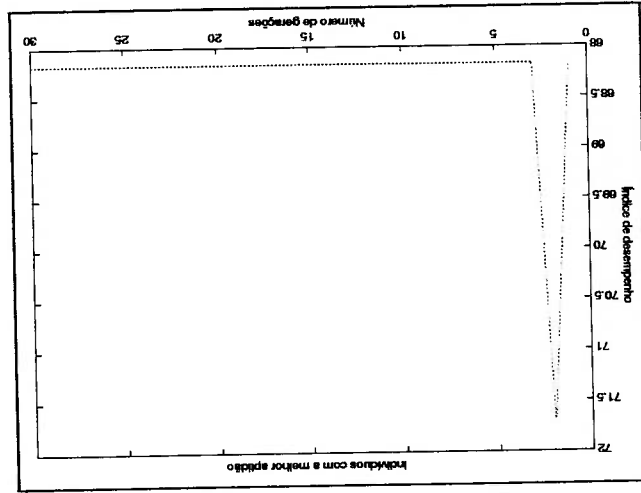


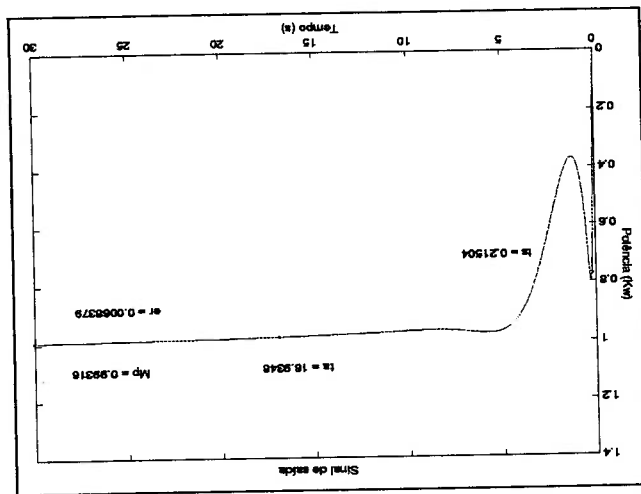
Figura 5.16: Evolução do índice de desempenho



de índice de desempenho.

nas gerações seguintes, nenhuma tendência do AG para minimizar este valor seqüência o índice converge para um valor próximo de 68,2, não observamos,

Figura 5.15: Resposta ao degrau unitário: AG

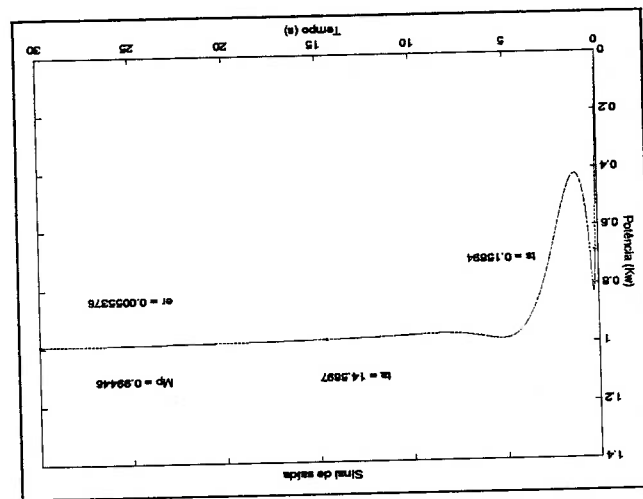


de desempenho de um valor em torno de 68,47 para 68,14, aproximadamente. sempre apresentado na Figura 5.18, notamos que o AG minimiza o índice de desempenho. Podemos verificar as segundas convergências que ocorrem no índice de de-

Verificamos ainda, que não há sobre-sinal na resposta da Figura 5.17. a esta simulação, são menores, assim como o erro em regime permanente. podemos observar que o tempo de subida e o tempo de acomodação, relativos, $er = 0,55376\%$. Comparando-os aos valores obtidos na simulação anterior, seguintes valores dinâmicos: $t_s = 0,15894$ s, $t_a = 14,5697$ s, $M_p = 0,99446$ e

A resposta do sistema com o controlador obtido, Figura 5.17, mostra os

Figura 5.17: Resposta ao degrau unitário: AG



$$G_c(s) = \frac{(4,9 \times 10^{-3} s^2 + 8 \times 10^{-4} s + 5,3 \times 10^{-3})}{s}$$

Para esta simulação o AG sintonizou o controlador apresentado a seguir:

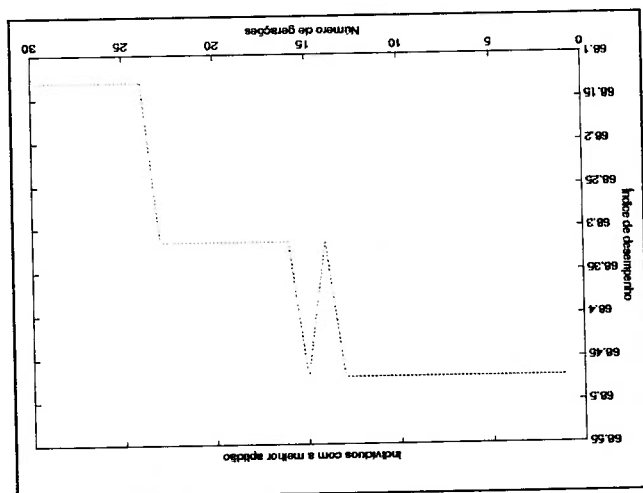
Caso 2: Simulação 2

Realizando uma análise pelo índice de desempenho das duas simulações, com os valores de índice de desempenho. lador PI original e com os dois controladores obtidos via AG, juntamente Na Tabela 5.2, apresentamos os valores dinâmicos obtidos com o contro-

Tabela 5.2: Tabela comparativa de valores: Caso 2

Controlador	PI	1	2
Gerações	-	30	30
t_s (s)	43,2855	0,21504	0,15894
t_a (s)	115,1834	16,9348	14,5697
M_p	0,99749	0,99316	0,99446
er (%)	0,25131	0,68379	0,55376
ID	-	68,18	68,13

Figura 5.18: Evolução do índice de desempenho



verificamos que o índice na simulação 2 é menor, então o controlador sin-tonizado nessa simulação é o mais adequado ao nosso objetivo, já que dese-jamos minimizar o índice de desempenho estabelecido.

Para este valor de velocidade do vento, utilizamos o valor 1,4655 para

adaptar o controlador PI, analogamente ao procedimento utilizado anterior-

mente.

5.3 Caso 3: Velocidade do vento - 18,845 m/s

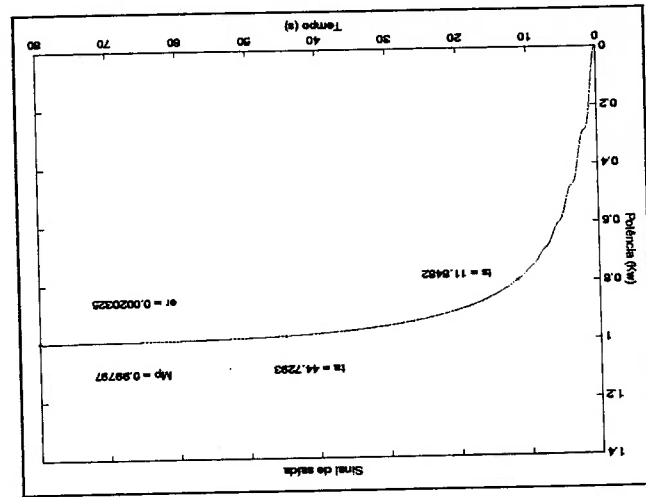


Figura 5.19: Resposta ao degrau unitário: AG

A resposta obtida com o controlador PI do projeto original, ilustrado na Figura 5.19, apresenta os seguintes valores dinâmicos: $t_s = 11,8482$ s, $t_a = 44,7293$ s, $M_p = 0,99797$ e $er = 0,20325$ %. Observamos valores altos para o tempo de subida e o tempo de acomodação, no entanto o erro em

regime permanente é pequeno.

Caso 3: Simulação 1

Nesta simulação, o AG sintonizou o seguinte controlador PID:

$$G^c(s) = \frac{1}{(1,5 \times 10^{-3}s^2 + 2,4 \times 10^{-3}s + 4,8 \times 10^{-3})}$$

Na Figura 5.20 verificamos que o transitório é pequeno comparado à res-

posta anterior. O tempo de subida, $t_s = 0,15547$ s e tempo de acomodação,

$t_a = 2,7293$ s, são melhores que os valores obtidos na Figura 5.19, ao con-

trário do erro em regime permanente, $er = 0,98964\%$ que é maior neste caso.

Há a ocorrência de um subsinal, $M_p = 0,9901$, igual ao que fora mostrado

na Figura 5.19.

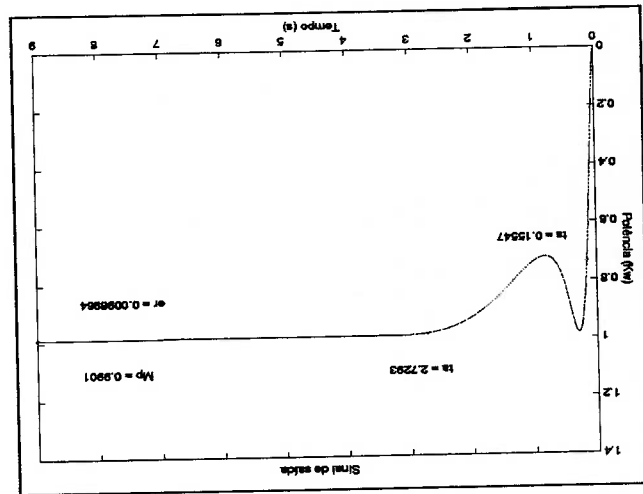


Figura 5.20: Resposta ao degrau unitário: AG

Pela Figura 5.21 notamos a rápida convergência efetuada pelo AG, sendo

Os valores característicos de tempo de subida, $t_s = 1,575$ s, tempo de acomodação, $t_a = 6,9544$ s e erro em regime permanente, $er = 1,0869$ % são superiores aos valores apresentados na resposta da simulação anterior. Não há a ocorrência de sobre-sinal, $M_p = 0,98913$. Em relação à resposta do controlador PI, que fora mostrada anteriormente, os valores obtidos nesse

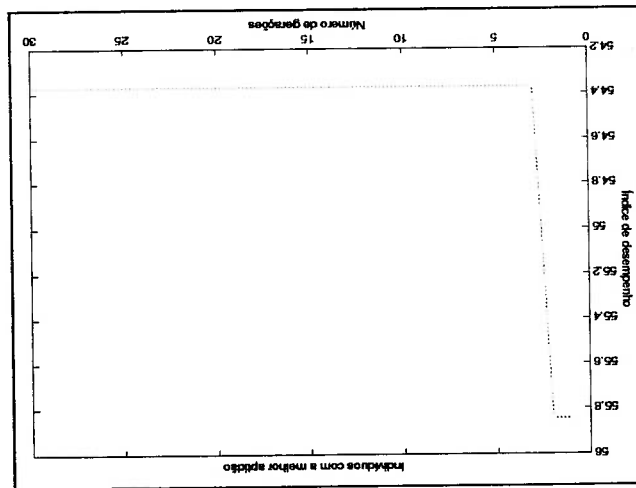
$$G_c(s) = \frac{s}{(5 \times 10^{-4}s^2 + 5 \times 10^{-4}s + 2,9 \times 10^{-3})}$$

AG e a análise da resposta do sistema com este controlador PID.

A seguir apresentamos o controlador cujo ganho foram determinados via

Caso 3: Simulação 2

Figura 5.21: Evolução do Índice de desempenho



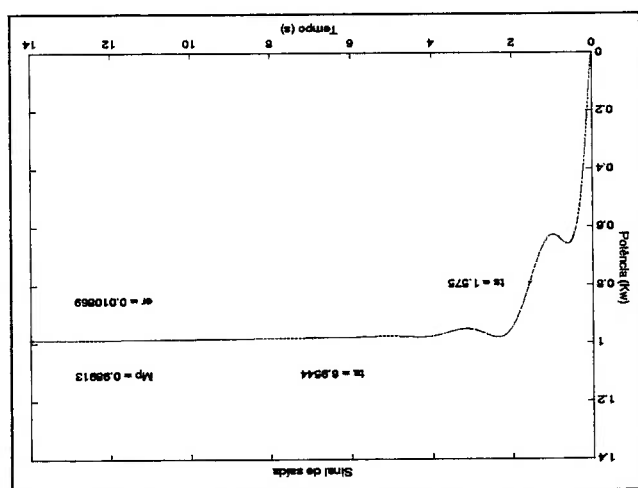
que nas gerações seguintes não observamos qualquer tendência para minimizar o valor de 54,4, obtido logo na terceira geração.

de subida e tempo de acomodação. Porém os erros em regime permanente parados à resposta da Figura 5.19, assim como os valores dinâmicos de tempo As duas simulações apresentadas, mostram transitórios menores se com- é maior do que o índice obtido na simulação anterior.

não convergiu satisfatoriamente, já que, o índice apresentado nesta simulação e pela evolução do índice de desempenho notamos que para este caso o AG Observamos que o AG inicia o processo de busca com um valor alto, 61, 4, igualmente entre as gerações 15 e 17.

degradação no índice de desempenho, devido a perda de um bom indivíduo, Notamos pela Figura 5.23, que nas primeiras 4 gerações ocorre uma

Figura 5.22: Resposta ao degrau unitário: AG



valor alto.

caso são menores, com exceção do erro em regime permanente que tem um

Pela Tabela 5.3, verificamos que os valores dinâmicos obtidos pelos controladores projetados com auxílio do AG são menores, se comparados ao-

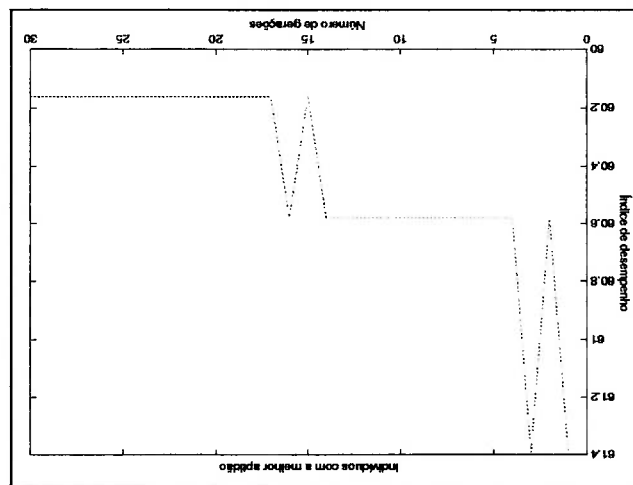
Tabela 5.3: Tabela comparativa de valores: Caso 3

Controlador	PI	1	2
Gerações	-	30	30
t_s (s)	11,8482	0,15547	1,575
t_a (s)	44,7293	2,7293	6,9544
M_p	0,99797	0,9901	0,98913
er (%)	0,20325	0,98964	1,0869
ID	-	54,37	60,16

resposta da Figura 5.19.

apresentados nas duas simulações, são maiores do que fora apresentado na

Figura 5.23: Evolução do índice de desempenho



obtido para este caso é o índice do controlador número 1. controlador PI original. Observamos que o menor índice de desempenho

5.4 Rejeição ao distúrbio

A seguir apresentamos uma comparação entre o controlador PI original e o PID sintonizado pelo AG na presença de distúrbios, modelados como ruídos brancos.

A Figura 5.24 apresenta as respostas da turbina eólica para a velocidade do vento igual a $15,706 \text{ m/s}$ na presença de distúrbios para o controlador PI original e para dois casos sob o controle de diferentes controladores PID

sintonizados pelo AG.

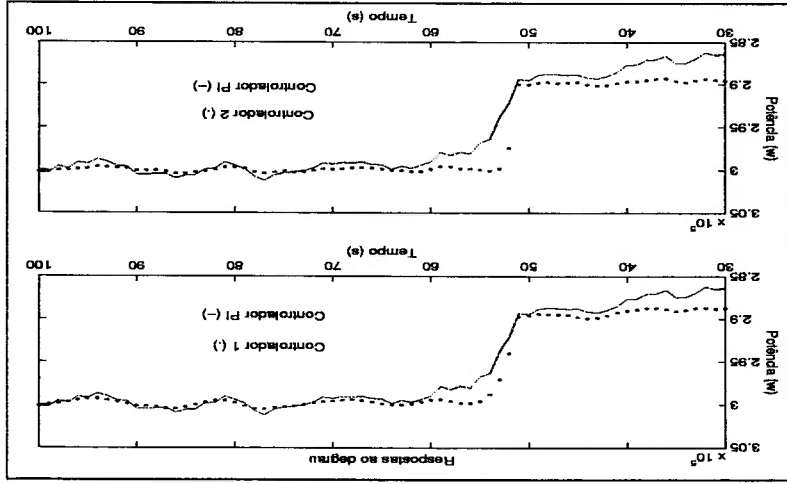


Figura 5.24: Sinais de saída da turbina eólica

Observamos que nas Figuras 5.24, 5.25 e 5.26 os controladores projetados

com auxílio do AG tem uma estabilização mais rápida, além de proporcionar uma maior rejeição dos distúrbios nas respostas.

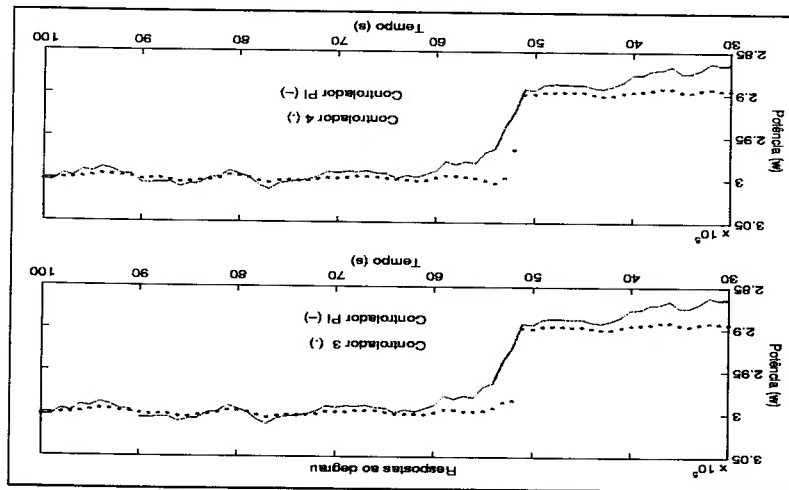


Figura 5.25: Sinais de saída da turbina eólica

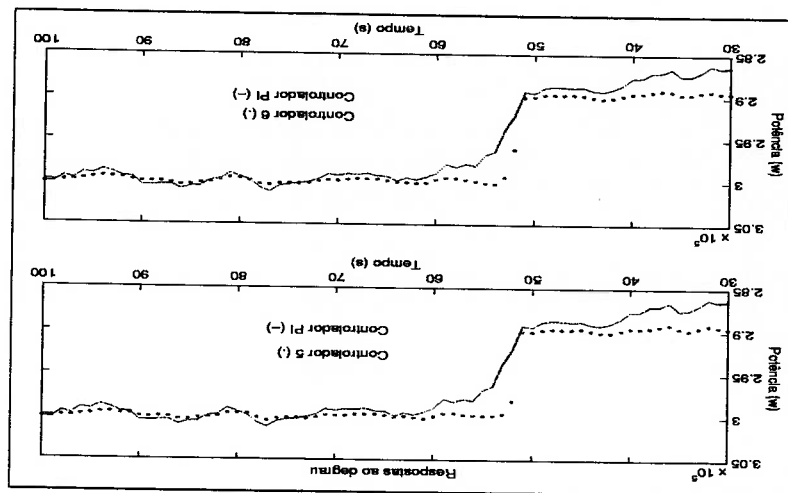
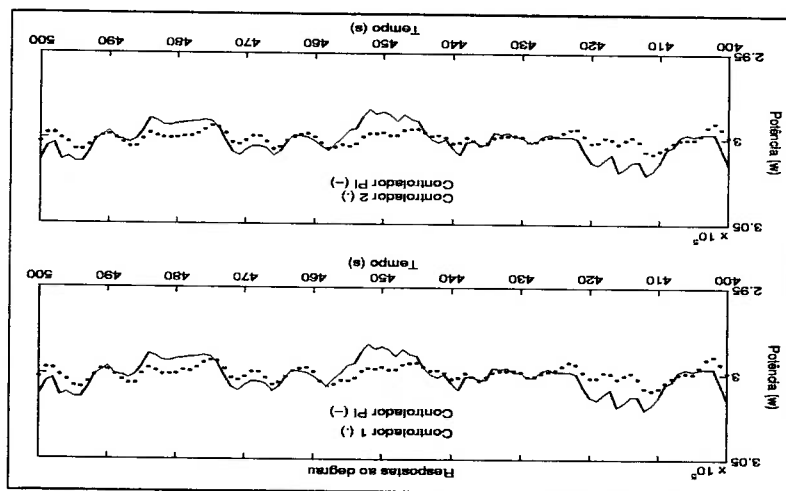


Figura 5.26: Sinais de saída da turbina eólica

A Figura 5.27 apresenta novas comparações entre os controladores, agora para a velocidade de vento de 12,654 m/s. Observamos, novamente, que

A Figura 5.28 ilustra as respostas relativas aos controladores sincronizados pelo AG, para a velocidade do vento igual a 18,845 m/s. Observamos que os controladores 1 e 2, sincronizados pelo AG, têm uma melhor rejeição à distúrbios se comparados ao controlador PI. Observamos, porém, que as análises anteriores não são suficientes para determinar a sua condição de rejeição aos distúrbios, uma vez que foram feitas por inspeção visual das respostas do sistema, para casos particulares. Portanto, faz-se necessária uma análise mais criteriosa.

Figura 5.27: Sinais de saída da turbina eólica

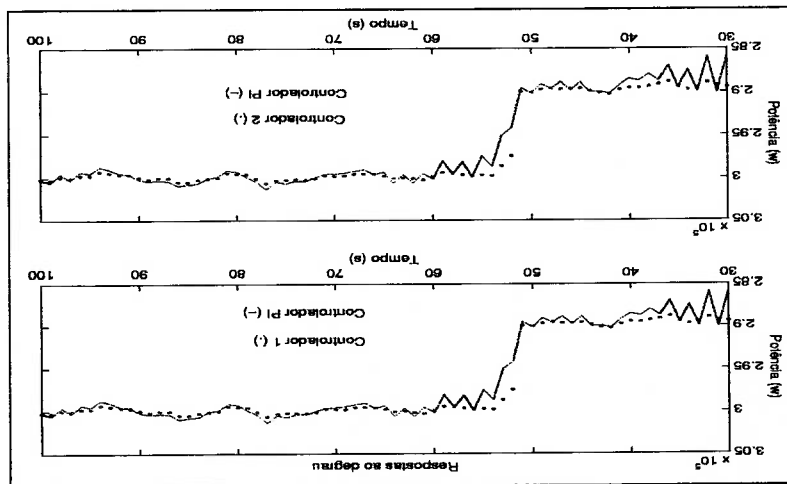


PI.

as respostas obtidas com os controladores sincronizados pelo AG, são menos ruidosas e de menor amplitude do que a resposta obtida com o controlador

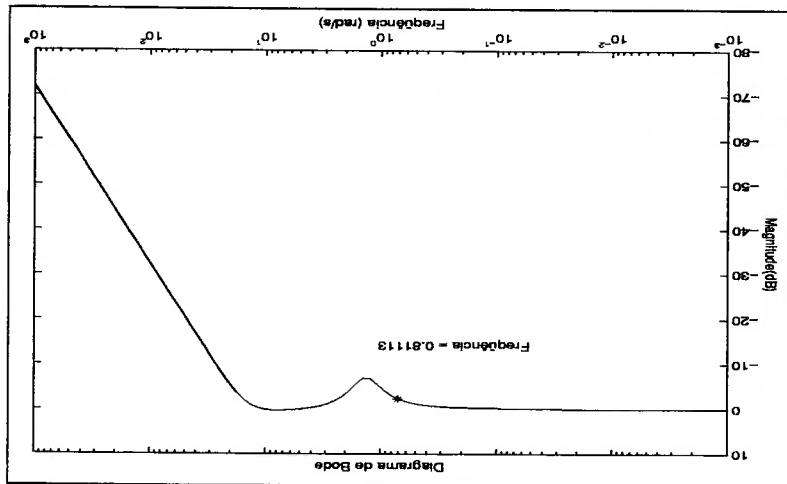
Utilizamos para isto, os diagramas de Bode apresentados a seguir. Apresentamos os diagramas de Bode, em malha fechada, para os controladores PI e PID com o modelo, para os casos 1 e 3.

Figura 5.28: Sinais de saída da turbina eólica



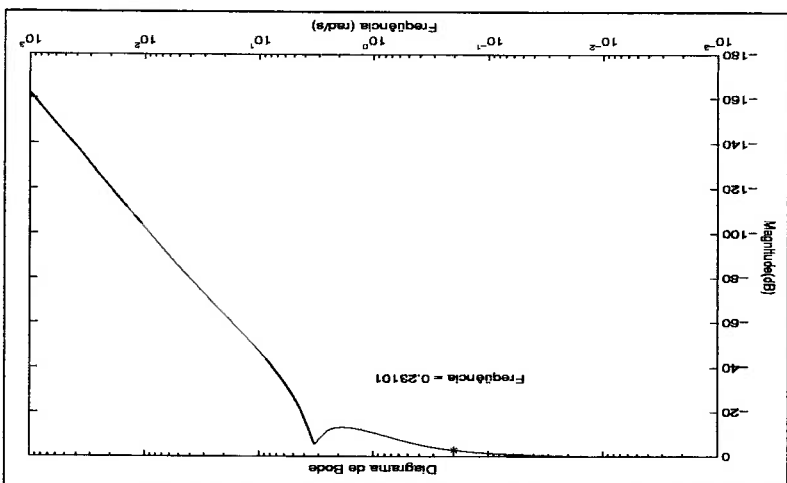
Pela observação das Figuras 5.29 e 5.30, verificamos que o controlador PI tem uma frequência de corte, $\omega_c=0.23101 \text{ rad/s}$, menor que a frequência

Figura 5.30: Diagrama de Bode do sistema: PID



Caso 1 - Controlador PID 4.

Figura 5.29: Diagrama de Bode do sistema: PI



Caso 1 - Controlador PI original.

de corte do controlador PID, $\omega_c=0.81113 \text{ rad/s}$, isto é, a largura de faixa do primeiro é menor. Isto indica que o controlador PID responde melhor a entradas arbitrárias. Porém, com uma largura de faixa maior, está mais propenso a interferências ruidosas.

Caso 3 - Controlador PI.

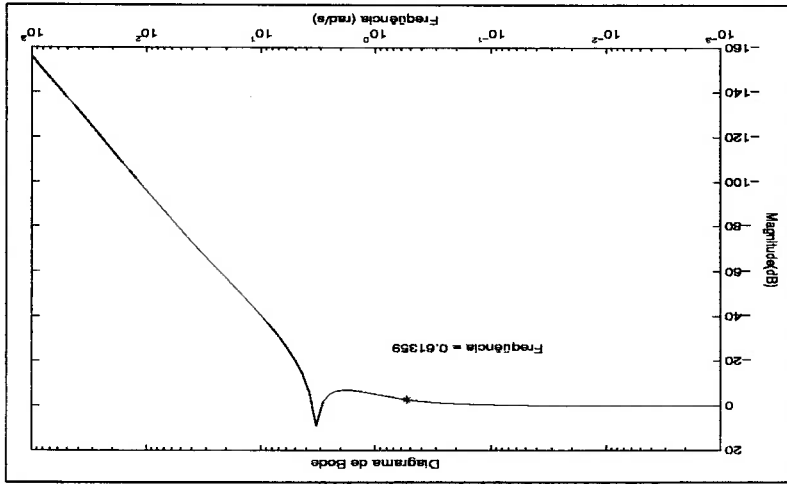
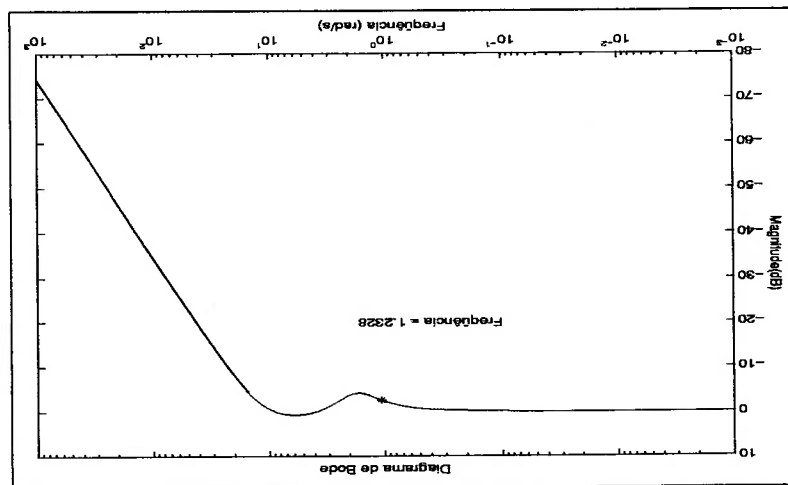


Figura 5.31: Diagrama de Bode do sistema: PI

No presente trabalho não levamos em consideração a largura de faixa, uma vez que o índice de desempenho estabelecido considera, apenas, as características das respostas no domínio do tempo. Porém é possível, em trabalhos

semelhante ao caso anterior, verificamos que o controlador PI, Figura 5.31, tem uma frequência de corte, $\omega_c=0.61359 \text{ rad/s}$, que é menor que a frequência de corte do controlador PID, $\omega_c=1.2328 \text{ rad/s}$, ver Figura 5.32, mostrando que este último tem uma largura de faixa maior e, portanto, observamos que esta mais sujeito a ruídos, se comparado ao controlador PI. Finalmente, com base na análise da largura de faixa, observamos que o controlador PI tem melhor rejeição a distúrbios, se comparado ao controlador PID.

Figura 5.32: Diagrama de Bode do sistema: PID



Caso 3 - PID (simulação 1)

futuros, incluir a largura de faixa, como critério a ser minimizado pelo AG.

Capítulo 6

Conclusão

6.1 Análise do trabalho realizado

Os resultados apresentados evidenciam que a técnica de sintonia com

auxílio do AG, se mostra superior às técnicas consagradas. No entanto,

a sintonia de controladores via AG apresenta desvantagens com relação ao

tempo despendido para ajustar os parâmetros do AG.

O AG foi utilizado em três sistemas dinâmicos distintos, incluindo sis-

temas amortecidos e sub-amortecido, com resultados satisfatórios em todos

eles, isto mostra a flexibilidade da técnica abordada neste trabalho e a vali-

dação do índice de desempenho proposto.

A seguir, destacamos todas as realizações deste trabalho:

- Levantamento bibliográfico sobre as turbinas eólicas, AGs e teoria de controle pertinente.
- Adaptação de um modelo matemático, pesquisado na literatura, para uma turbina eólica.
- Elaboração de rotinas (em código para Matlab) para a caracterização dinâmica das respostas às perturbações.
- Estudo da dinâmica da turbina eólica, por meio do modelo matemático específico.
- Adaptação de uma rotina de algoritmo genético para resolução de funções matemáticas.
- Adaptação de uma rotina de algoritmo genético para uma população com valores decimais.
- Elaboração de uma rotina para o algoritmo genético utilizado na simulação de controladores PID.
- Pesquisa e adaptação de modelos dinâmicos para validação do algoritmo genético.
- Projeto de controle, utilizando o critério ITAE, para um sistema dinâmico pesquisado na literatura.

6.2 Proposta de continuidade

- Sintonia de controladores PID por AG, aplicados à uma turbina eólica.

O trabalho em questão pode ser continuado de várias maneiras. No âmbito do AG e a curto prazo podemos por exemplo aplicar e analisar comparativamente outros índices de desempenho para o AG ou a combinação deles, como é mostrado em QI; CHIN (1997), que estabelece como índice de desempenho, para sistemas de altas ordens, a combinação de um índice da forma:

$$ID1 = k_2 T_0 + k_3 T_r$$

onde: T_0 é o sobre-sinal e T_r é o tempo de subida, com o critério da integral do erro quadrático multiplicado pelo tempo (ITSE), como é mostrado a seguir:

$$ID2 = \int_0^{T_r} t^{k_1} e^2(t) dt$$

onde: $k_1 = 0, 1, 2, \dots, n$ é uma constante de peso no tempo.

Os critérios de erro como o critério da integral do erro quadrático, critério da integral do erro absoluto e outros vários índices propostos na literatura, têm características distintas quanto à correção na resposta de um sistema e são sugestões de estudo para formar um índice de desempenho no AG.

Acréscitando a isto, um estudo para avaliar o desempenho do AG com população binária e com população decimal, na sintonia de controladores PID.

Neste trabalho a escolha dos controladores para a turbina eólica, obtidos com o auxílio do AG, foram escolhidos por inspeção dos valores dinâmicos da resposta e pelo índice de desempenho. Pretendemos em trabalhos futuros, introduzir a aplicação da lógica difusa ('fuzzy') para o auxílio na avaliação da resposta de saída e caracterização da função desempenho ('fitness').

É possível ainda desenvolver algoritmos para a sintonia de controladores em tempo real, onde o objetivo seria usar o AG para alterar os parâmetros do controlador conforme as variações da velocidade do vento. Finalmente, é possível aplicar uma metodologia similar para a sintonia de controladores ótimos (LQ, LQG) e robustos.

Referências Bibliográficas

- ANDERSON, C.; LEITHEAD, W. E., WILKIE, J. Modelling of wind turbines by simple models. Wind Engineering, Brentwood, Essex, United Kingdom, v.14, n.4, p.247 – 274, 1990.
- ANDERSON, C.; LEITHEAD, W. E., WILKIE, J. Simulation of wind turbines by simple models. Wind Engineering, Brentwood, Essex, United Kingdom, v.1, p.336 – 340, 1991.
- ASTRÖM, Karl J.; HAGGLUND, Tore. Automatic tuning of PID Controllers. Research Triangle Park, NC., Instrument Society of America, 1988. 141p.
- BARBOSA, Hélio J. C. Uma introdução aos algoritmos genéticos. Laboratorio Nacional de Computação Científica/CNPq, Rio de Janeiro, 1997. 50p.

- BULMER, Michael. Computers and Operations Research. Department of Mathematics University of Queensland, s.d. <<http://www.maths.uq.edu.au/mrb/mn314/gabasics.html>>
- CAMMARATA, G.; FICHERA, A.; MARLLETA, L. Using genetic algorithms and the exoronomic approach to optimize district heating networks. Journal of energy resources technology, Fairfield, NJ, v.120, n.3, p.241 – 246, set., 1998.
- CAO, Y. J.; Wu, Q. H. Teaching genetic algorithm using matlab. International journal engineering education, Manchester v. 36, n.2, p.139 – 153, 1999.
- COLEY, David A. An introduction to genetic algorithms for scientists and engineers, Singapore., World Scientific Publishing, 1999. 227p.
- COELHO, Leandro dos Santos; COELHO, Antonio Augusto Rodrigues. Algoritmos evolutivos em identificação e controle de processos: uma visão integrada e perspectivas. SBA controle & automação, Campinas, SP, v.10, n.1, p.13 – 30, 1999.
- Danish Wind Industry Association. s.d. <<http://www.windpower.org>>

- DE LA SALLE, S.A.; REARDON, D.; LEITHEAD, W.E., et al. Review of wind turbine control. International journal control, Basingstoke, United Kingdom, v.52, n.6, p.1295 – 1310, dez., 1990.
- DORF, Richard C. Modern control systems. 6.ed. Reading: Addison-Wesley, 1993. 717p.
- FERNANDES, Dimis; FARROLAS, Luis; BRITO, Pedro. Geração de trajetórias para robôs móveis usando algoritmos genéticos. s.n.t. Disponível em: <<http://www.geocities.com/igorypes>>
- GOLDBERG, David E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Reading: Addison-Wesley, 1989. 412p.
- GRIMBLE, M. J.; LEITHEAD, W. E.; REARDON, D.; DE LA SALLE, S.A. Classical control of active pitch regulation of constant speed horizontal axis wind turbines. International journal control, Basingstoke, Hants, v.55, n.4, p.845 – 876, 1992.
- GRIMBLE, M. J.; LEITHEAD, W. E.; REARDON, D.; DE LA SALLE, S. A. Role and objectives of control for wind turbines. IEEE proceedings: generation transmission and distribution, Stevenage, Herts, v.138, n.2, pt. C., p.135 – 148, março, 1991.

- HINRICHSSEN, E. N. Controls for pitch wind turbine generators. IEEE transactions on power apparatus and systems, v.103, n.4, abril, 1984.
- HOLLAND, John. Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 211p.
- HOLLAND, John. Genetic algorithms. Scientific American, New York, v.267, n. 1, p.44 – 50, julho, 1992.
- JAVID, S. H.; MURDOCK, A. J. ; WINKMAN, R. Control design and performance analysis of a 6 MW wind turbine-generator. IEEE transactions power apparatus and systems, New York, v.102, n.5, p.1340 – 1347, maio, 1983.
- JEON, YOG-SOO; LEE, Chung-Oh; HONG, Ye-Sun. Optimization of the control parameters of a pneumatic servo cylinder drive using genetic algorithms. Control engineering practice, The Boulevard, v.6, n.7, p.847 – 853, jul, 1998.
- JOHNSON, Craig C.; SMITH, Richard T. Dynamics of wind generators on electric utility networks. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, v.12, n.4, p.483 – 493, 1976.

- KRISHNAKUMAR, K.; GOLDBERG, David E. Control system optimization using genetic algorithms. Journal of guidance, control, and dynamics, Reston, VA v. 15, n.3, p.735 – 740, maio/jun., 1992.
- KRISHNAKUMAR, K. Genetic Algorithms: theory and control applications. In: Workshop, Grã-Bretanha, Agosto, 1994. s.n.t.
- LEITHEAD, W. E.; LEITH, D. J.; HARDAN, F. H. Direct regulation of large speed excursions for variable speed wind turbines. United Kingdom, University of Strathclyde, s.d. Disponível em: <<http://www.icc.strath.ac.uk/doug/reports.html>>
- MITCHEL, Melanie. An introduction to genetic algorithms. S.l.: MIT Press, 1999.
- MULJADI, E. ; PIERCE, K. ; MIGLIORE, P.A. Soft-stall control for variable-speed stall-regulated wind turbines. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, Amsterdam, v.85, n.3, p.277 – 291, 2000.
- MULJADI, E. ; PIERCE, K. ; MIGLIORE, P.A. Conservative control strategy for variable-speed stall-regulated wind turbines. National Wind Technology Center, s.d. Disponível em: <http://www.nrel.gov/wind/library.html>

- MULLAJADI, E.; BUTTERFIELD, C.P. Pitch-controlled variable-speed wind turbine generation. s.l.: National Wind Technology Center/ National Renewable Energy Laboratory, s.d. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/wind/library.html>>
- NOVAC, P.; ELEKUNDE, T., JOVIK, I., SCHMIDTBAUER, B. Modeling and control of variable-speed wind-turbine drive-system dynamics. IEEE control systems, p.28 – 38, agosto, 1995.
- OGATA, Katsuhiko. Engenharia de controle moderno. 2 ed. Rio de Janeiro: Prentice/Hall do Brasil, 1993. 781p.
- OGATA, Katsuhiko. Solução de problemas de engenharia de controle com Matlab. Rio de Janeiro: Prentice/Hall do Brasil, 1997. 330p.
- OLIVEIRA, Sandra Rita de. O algoritmo genético na otimização do projeto estrutural de embarcações. São Paulo, 1998. 86p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- PHILLIPS, Charles L.; HARBOR, Royce D s.l.: Makron Books do Brasil, 1996.
- Qi, X. M.; Chin, T. C. Genetic algorithms based fuzzy controller for high order systems. Fuzzy sets and systems, p.279 – 284, 1997.

- SELING, M. S.; COVERSTONE-CAROLL, L. Application of a genetic algorithm to wind turbine design. Journal of energy resources technology, Fairfield, NJ, v.118, n.1, p.22 – 28, mar, 1996.
- SIMÕES, Marcelo Godoy; FRANCESCETTI, N. N.; BOSE, Bimal K. Otimização de um sistema de geração de energia eólica através de controle fuzzy. SBA controle & automação, v.10, n.1, p.48 – 58, 1999.
- SPERA, David A. Wind turbine technology: fundamental concepts of wind turbine engineering. New York : Asme Press, 1994. 638p.
- TSUTSUI, Shigeyoshi; CORNE, David; FUJIMOTO, Yoshiji. A real coded genetic algorithm with an explorer and an exploiter populations. Proceedings of the 7th International conference on Genetic Algorithms (ICGA-97), p.238 – 245.
- WASYNGZUK, O; MAM, D. T.; SULLIVAN, J. P. Dynamic behavior of a class of wind turbine generators during random wind fluctuations. IEEE transactions power apparatus and systems, New York, v.100, n.6, p.2837 – 2845, jun., 1981.
- YEPES, IGOR. Algoritmos Genéticos. s.d. <<http://www.geocities.com/igorYepes>>


```

%
    pmIn=zeros(npop,1)-1; pres = zeros(npop,1)+1;
    end PI = rand(npop,1); pmax = zeros(npop,1)+1;

    npop = npop+1;

nop = 3; npop = 3; ngen = 3; if isempty(rem(npop,2))

%
    mm = +1;

%
    % mm = +1 para minimizar
    % mm = -1 para maximizar

    mini = 1; kp = [ ]; kd = [ ]; ki = [ ];

% Iniciação dos parâmetros do algoritmo genético

tic

pslope pc bestp mmim nmax pone Pimax popmax IP ts

global npop lchrom nop mm pmutate pcross ncross global nbits

clear all

close all

clc

%

```

```

range = (pmax-pmin)/pres; nbits = fix(log(range+1)/log(2));
pslope = pres; pc = pmin; lchrom = sum(nbits);
%
% Parâmetros dos operadores genéticos
pmutate = 0.001; pcross = 0.97; ncross = 2;
%
%
% gno = 1; genn(gno) = gno;
%
% Iniciar a população
oldpop = initpop;
%
% Estatística do índice de desempenho
[maxi(gno), mini(gno), avg(gno), sd(gno), nmax, nmin] = stats(PI);
%
% Pmin = 10000; popmin = fix(2*rand(1, lchrom));
%
for k = 1:nngen
    newpop = gen(oldpop, PI, popmin);
    gno = gno+1;
    if gno > 1 | Pmin < 0
        pmutate = 0.001;
    end
end

```

```

end
for i = 1:npop
%
% Decodificação dos parâmetros
p = abs(decode(olddpop(i,:)));
%
% Ajuste dos ganhos para o controlador
kp = p(1,1);
kd = p(1,2);
ki = p(1,3);
[Mp,ta,ts,tMp,va,vs,er] = modelo(kp,ki,kd);
PI = fo(Mp,ta,ts,er);
PIaux(i) = PI;
PI(i) = PIaux(i)*mm;
Pimm(k,i) = PI(i);
if PIaux(i) > Pimin
pone = p;
Pimin = PIaux(i);
popmin = oldpop(i,:);
Mpi = Mp;
tMpi = tMp;
end

```

```

val = va;
tal = ta;
vs1 = vs;
ts1 = ts;
er1 = er;

end

vmax(k) = max(PIaux);
vmin(k) = min(PIaux);
vmed(k) = mean(PIaux);
oldpop = newpop;

end

toc

k = 1:ngen;
p = abs(decode(popmin(1,:)))
kp = p(1,1);
kd = p(1,2);
ki = p(1,3);
grafico(kp,ki,kd,Mpl,tMpl,va1,tal,ts1,vs1,er1);
Pimin = PIaux(i)
popmin = popmin;

```


figure(2)

```
plot(k, vmin, 'g-')%,k, vmax, 'b-', k, vmed, 'g-')
```

```
title('Indivíduos com a melhor aptidão')
```

```
xlabel('Número de gerações')
```

```
ylabel('Índice de desempenho')
```

Os códigos dos operadores genéticos foram baseados em Krishnakumar,

K. (1994).

```

function [Mp,ta,ts,tMp,va,vs,er] = modelo(kp,kd,ki)
%
% Ganho dos controladores
global Mp ta ts er vs
kp = kp; kd = kd; ki = ki;
%
% Função de transferência do controlador
nc = [kd kp ki]; dc = [1 0]; C = tf(nc,dc);
% Função de transferência do sistema
np = [0 1]; dp = [1 6 5 0]; P = tf(np,dp); S1 = series(C,P);
S=feedback(S1,1,-1);
%
% Entrada à degrau unitário
[s,t] = step(S); i = length(s);
%
% Estipula a faixa de acomodação, com 2% ou 5% do valor final
vfm = s(i); vf = 1; fa1 = vf - 0.02; fa2 = vf + 0.02;

```

dinâmicos de controle.

Código para a determinação dos parâmetros

```

%
% Determina o máximo valor do sinal
[Mp,j] = max(s); tMp = t(j);
%
% Calcula o erro
er = abs(vfm-vf);
%
%
% Calcula o tempo de acomodação
for k = i:-1:1
    if s(k) > fa2 | s(k) < fa1
        ta = t(k);
        va = s(k);
        %plot(ta,va,'r.')
        break
    end
end
%
% Calcula o tempo de subida
for k = 2:1
    if s(k) > vf

```

```
ts = t(k-1);  
vs = s(k-1);  
break  
elseif s(k) == vt  
ts = t(k);  
vs = s(k);  
break  
end  
end
```