

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DE  
MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA  
UTILIZANDO ALGORITMOS  
GENÉTICOS**

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

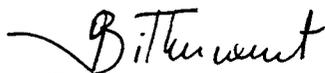
**CARLOS OGAWA**

Florianópolis, Dezembro de 2001.

# OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DE MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

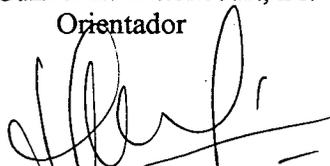
Carlos Ogawa

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Controle, Automação e Informática Industrial em que foi realizado o trabalho*, e aprovada em sua forma final pelo Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’



---

Prof. Guilherme Bittencourt, Dr.  
Orientador



---

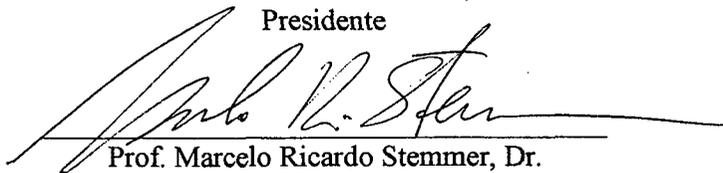
Prof. Edson Roberto De Pieri, Dr.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



---

Prof. Guilherme Bittencourt, Dr.  
Presidente



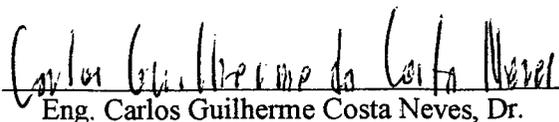
---

Prof. Marcelo Ricardo Stemmer, Dr.



---

Prof. Jorge Muniz Barreto, D.Sc.



---

Eng. Carlos Guilherme Costa Neves, Dr.

Dedico este trabalho à minha família  
em especial à minha mãe Hiroko Ogawa  
pai Keiichi Ogawa

## **Agradecimentos**

*À Deus, pela graça que de me conceder finalizar mais este trabalho;*

*À minha família pelo apoio e atenção nos momentos de dificuldades;*

*Hiroko Ogawa Eduardo Ogawa Angela Ogawa Chieko Ogawa*

*À minha namorada pelo carinho e compreensão;*

*Adriana Moro*

*Ao meu orientador pela paciência, dedicação e ensinamento;*

*Guilherme Bittencourt*

*Aos meus amigos do laboratório que muito contribuíram neste trabalho;*

*César Cris Eder Fred Jerusa Karina Llanos Michele Rafael Renato Torrico Terezinha Vinicius*

*Aos meus colegas de trabalho da WEG pelo apoio;*

*Alcides Fredemar Guilherme Marli Nilson Ortiz*

*A todos os meus amigos, pelo incentivo e apoio;*

*Ao CNPq pelo financiamento inicial do curso de mestrado.*

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

# **OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DE MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS**

**Carlos Ogawa**

12/2001

Orientador: Guilherme Bittencourt.

Área de Concentração: Controle, Automação e Informática Industrial.

Palavras-chave: Algoritmos Genéticos, Máquinas de corrente contínua, Inteligência Artificial.

Número de Páginas: 98

O projeto eletromagnético das máquinas elétricas, nem sempre trivial pode ser analisado como um problema de otimização. Dentro deste contexto, os Algoritmos Genéticos se apresentam como proposta para se alcançar uma boa solução para a área de projetos de máquinas de corrente contínua. Os Algoritmos Genéticos consistem numa técnica da Inteligência Artificial (IA) que utiliza um método computacional adaptativo de busca e otimização baseado na evolução natural das espécies. Através de mecanismos operadores inspirados na genética e critérios de seleção, o algoritmo evolui indivíduos a cada geração e, assim como no ambiente natural, acaba por evoluir na maioria dos casos para uma nova população com indivíduos cada vez mais próximos da solução global do sistema. Assim, quando empregado no cálculo de máquinas elétricas, o algoritmo é capaz de “evoluir” um grupo de parâmetros para uma das melhores configurações eletromagnéticas da máquina. A utilização desta técnica da IA, abrange as áreas onde não existem métodos exatos para otimização ou onde os métodos existentes são precários e insatisfatórios. Nas máquinas de corrente contínua, as inúmeras combinações de fatores elétricos, mecânicos, térmicos e magnéticos dificultam o desenvolvimento de uma seqüência de cálculo exata para todas as configurações de máquinas propostas. Este trabalho apresenta a utilização desta técnica da IA para o projeto de máquinas de corrente contínua. Através da análise dos resultados obtidos em comparação com um projetista e também com o próprio ensaio do motor em laboratório é possível se justificar sua utilização nesta área de desenvolvimento.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

## **DIRECT CURRENT MACHINES DESIGN OPTIMIZATION USING GENETIC ALGORITHMS**

**Carlos Ogawa**

December / 2001

Advisor: Prof. Guilherme Bittencourt, Dr.

Area of Concentration: Control, Automation and Industrial Computing

Keywords: Genetic Algorithms, Direct Current Machines, Artificial Intelligence.

Number of Pages: 98

The electromagnetic design of electrical machines can be analysed as an optimization problem. At this point, Genetic Algorithms is presented in this work as a proposal to reach a good solution to dc machines design area. Genetic Algorithms is an Artificial Intelligence (AI) technique that uses a computational method of search and optimization based on the evolution of species. Through operators mechanisms inspired in genetic and selection rules, the algorithm is capable to evolve individuals at each generation that such as natural environment, finish evolving mostly cases to a new population composed of individuals more and more near of global solution of the system. Thus, when applied to electrical machines design, the algorithm is capable to evolve a set of parameters (correspondent to machine configurations) to one of the best electromagnetic configurations of the machine. The use of this Artificial Intelligence technique reaches areas where the existent optimization methods are uncertain or unsatisfactory. In electrical machines, the several combinations of electrical, mechanical, thermal and magnetic factors, turn the development of an exact calculation sequence difficult to all range of machines proposed by the customers. This work presents an utilisation of this AI technique to the design of direct current machines. Analysing the results obtained and comparing it with real projects designed by an experienced designer and also with a motor at test shop it is possible to justify its utilisation in this area.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ALGORITMOS GENÉTICOS.....</b>	<b>3</b>
2.1 INTRODUÇÃO.....	3
2.2 APLICAÇÃO .....	4
2.3 FUNDAMENTOS.....	5
2.4 CODIFICAÇÃO.....	7
2.5 FUNÇÃO DE AVALIAÇÃO .....	8
2.6 SELEÇÃO .....	9
2.6.1 <i>Método do sorteio da roleta</i> .....	9
2.6.2 <i>Método de seleção pelo rank</i> .....	10
2.6.3 <i>Amostragem Estocástica Universal</i> .....	11
2.6.4 <i>Método de seleção por torneio (Tournament Selection)</i> .....	12
2.7 OPERADORES GENÉTICOS.....	12
2.7.1 <i>Crossover simples</i> .....	13
2.7.2 <i>Crossover de pontos múltiplos</i> .....	13
2.7.3 <i>Crossover uniforme</i> .....	14
2.7.4 <i>Crossover parcialmente mapeado (PMX)</i> .....	14
2.7.5 <i>Mutação</i> .....	15
2.7.6 <i>Operador de Inversão</i> .....	15
2.8 REINSERÇÃO.....	16
2.9 CRITÉRIOS DE PARADA .....	17
2.10 FUNCIONAMENTO.....	17
2.10.1 <i>Hyperplanos e Hypercubos</i> .....	17
2.11 IMPLEMENTAÇÃO .....	19
2.12 IMPLEMENTAÇÕES PARALELAS.....	20

2.12.1	<i>Migração</i> .....	20
2.13	CONCLUSÃO .....	21
<b>3.</b>	<b>PROJETO DE MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA</b> .....	<b>23</b>
3.1	HISTÓRICO.....	23
3.2	CARACTERÍSTICAS DA MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA .....	23
3.3	ASPECTOS CONSTRUTIVOS .....	24
3.4	PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO.....	28
3.4.1	<i>Dados Característicos</i> .....	28
3.4.2	<i>Considerações Gerais</i> .....	30
3.4.3	<i>Curva de Conjugado e Potência</i> .....	33
3.4.4	<i>O efeito de reação da armadura</i> .....	34
3.4.5	<i>Comutação</i> .....	35
3.5	ESPECIFICAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DA MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA .....	36
3.5.1	<i>Análise eletromagnética</i> .....	36
3.5.2	<i>Considerações para o cálculo das grandezas elétricas</i> .....	37
3.5.3	<i>Cálculo das grandezas do enrolamento principal</i> .....	37
3.5.4	<i>Força Eletromotriz (f.e.m.)</i> .....	38
3.5.5	<i>Cálculo da rotação nominal</i> .....	39
3.5.6	<i>Cálculo do número de escovas por suporte</i> .....	39
3.5.7	<i>Perdas do comutador</i> .....	40
3.5.8	<i>Determinação da tensão de reatância</i> .....	40
3.5.9	<i>Determinação da tensão entre lamelas</i> .....	41
3.5.10	<i>Rendimento</i> .....	42
3.5.11	<i>Indução no entreferro</i> .....	42
3.5.12	<i>Indução nos dentes da armadura</i> .....	42
3.5.13	<i>Indução na armadura</i> .....	42
3.5.14	<i>Indução no pólo</i> .....	43
3.6	CONCLUSÃO .....	43

<b>4. IMPLEMENTAÇÃO DAS FUNÇÕES DO ALGORITMO .....</b>	<b>44</b>
4.1 FUNÇÃO DE GERAÇÃO.....	44
4.2 FUNÇÃO DE CROSSOVER .....	45
4.3 FUNÇÃO DE MUTAÇÃO.....	46
4.4 FUNÇÕES DE SELEÇÃO.....	46
4.4.1 Seleção da roleta.....	46
4.4.2 Método de seleção pelo Rank.....	47
4.4.3 Mudança de escala de maneira linear.....	47
4.5 FUNÇÃO DE DECODIFICAÇÃO.....	48
<b>5. IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO .....</b>	<b>49</b>
5.1 CONSIDERAÇÕES.....	50
5.2 CODIFICAÇÃO.....	51
5.3 IMPLEMENTAÇÃO DA FUNÇÃO DE AVALIAÇÃO.....	54
5.3.1 Elevação de temperatura do enrolamento principal ( $V_3$ ).....	55
5.3.2 Elevação de temperatura nos condutores da armadura ( $V_1$ ).....	57
5.3.3 Elevação de temperatura no enrolamento de comutação ( $V_2$ ).....	60
5.3.4 Cálculo do enchimento da armadura ( $V_4$ ).....	62
5.3.5 Determinação da rotação ( $V_5$ ).....	62
5.3.6 Determinação do comprimento ( $V_6$ ).....	63
5.3.7 Cálculo da tensão entre segmentos do comutador ( $V_7$ ).....	64
5.3.8 Cálculo da tensão de reatância ( $V_8$ ).....	64
5.3.9 Cálculo das perdas da máquina.....	65
5.3.10 Critério de parada pelo cálculo do rendimento.....	65
<b>6. RESULTADOS .....</b>	<b>66</b>
6.1 LIMITES ADMISSÍVEIS.....	66
6.2 PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO.....	66
6.3 SIMULAÇÕES.....	67
6.3.1 Método de seleção da roleta.....	68

6.3.2 Método de seleção pelo Rank.....	71
6.3.3 Método de seleção da Roleta com "Scaled fitness" .....	73
6.3.4 Análise dos resultados .....	74
6.4 SIMULAÇÃO GENÉRICA.....	80
6.5 COMPARAÇÃO TEÓRICA .....	82
6.6 COMPARAÇÃO PRÁTICA.....	84
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>86</b>
<b>ANEXO 1: PRIMEIRA SIMULAÇÃO .....</b>	<b>88</b>
<b>ANEXO 2: SEGUNDA SIMULAÇÃO .....</b>	<b>89</b>
<b>ANEXO 3: TERCEIRA SIMULAÇÃO.....</b>	<b>90</b>
<b>ANEXO 4: QUARTA SIMULAÇÃO.....</b>	<b>91</b>
<b>ANEXO 5: QUINTA SIMULAÇÃO.....</b>	<b>92</b>
<b>ANEXO 6: RESULTADOS DA SIMULAÇÃO GENÉRICA.....</b>	<b>93</b>
<b>ANEXO 7: COMPARAÇÃO PRÁTICA.....</b>	<b>94</b>
<b>ANEXO 8: DADOS DETALHADOS.....</b>	<b>95</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>96</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1: FLUXOGRAMA PARA PROJETO DE MÁQUINAS .....	1
FIGURA 2.1: FLUXOGRAMA GENÉRICO DE UM AG .....	6
FIGURA 2.2: MATRIZ DE TRANSIÇÃO.....	7
FIGURA 2.3: GENES E CROMOSSOMOS .....	7
FIGURA 2.4: ROLETA.....	10
FIGURA 2.5: SORTEIO PELO RANK .....	11
FIGURA 2.6: DISTRIBUIÇÃO PARA SUS .....	11
FIGURA 2.7: TÉCNICA DE SELEÇÃO SUS .....	12
FIGURA 2.8: Crossover SIMPLES .....	13
FIGURA 2.9: Crossover DE PONTOS MÚLTIPLOS.....	13
FIGURA 2.10: UNIFORM Crossover .....	14
FIGURA 2.11: PMX .....	14
FIGURA 2.12: ALGORITMO DO PMX .....	15
FIGURA 2.13: MUTAÇÃO .....	15
FIGURA 2.14: OPERADOR DE INVERSÃO .....	16
FIGURA 2.15: CUBO COM VÉRTICES ROTULADOS POR BITS.....	18
FIGURA 2.16: ALGORITMO DO FLUXOGRAMA DA FIGURA 2.1.....	20
FIGURA 2.17: MIGRAÇÃO COMPLETA.....	21
FIGURA 2.18: MIGRAÇÃO EM ANEL.....	21
FIGURA 2.19: MIGRAÇÃO POR VIZINHANÇA (LINEAR).....	21
FIGURA 3.1: ROTOR DO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA.....	25
FIGURA 3.2: DETALHES DA CHAPA DO ROTOR (PARA FIO CIRCULAR E RETANGULAR).....	25
FIGURA 3.3: ESTATOR DE CHAPAS LAMINADAS.....	26
FIGURA 3.4: CORTE LONGITUDINAL DO ESTATOR .....	27
FIGURA 3.5: RÉGUAS DE SUPORTE DO PORTA ESCOVA E ANEL .....	28

FIGURA 3.6: ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA CC.....	30
FIGURA 3.7: FORMA DE ONDA RETIFICADA PARA 1 ESPIRA E N ESPIRAS.....	31
FIGURA 3.8: CURVA DE CONJUGADO E POTÊNCIA.....	34
FIGURA 3.9 A: CAMPO EM VAZIO.....	34
FIGURA 3.9 B: CAMPO MAGNÉTICO GERADO PELA ARMADURA .....	34
FIGURA 3.10: DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO FLUXO PRINCIPAL.....	35
FIGURA 3.11: ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS .....	36
FIGURA 4.1: FUNÇÃO DE GERAÇÃO DA POPULAÇÃO.....	44
FIGURA 4.2: FUNÇÃO DE CROSSOVER DE PONTOS MÚLTIPLOS.....	45
FIGURA 4.3: FUNÇÃO DE MUTAÇÃO .....	46
FIGURA 4.4: ROTINA DE SELEÇÃO DA ROLETA .....	47
FIGURA 4.5: MÉTODO DE SELEÇÃO PELO RANK .....	47
FIGURA 4.6: MUDANÇA DE ESCALA .....	47
FIGURA 4.7: FUNÇÃO DE PRÉ ESCALA .....	48
FIGURA 4.8: DECODIFICAÇÃO DO CROMOSSOMO .....	48
FIGURA 5.1: FLUXOGRAMA DETALHADO.....	49
FIGURA 5.2: GEOMETRIA DA MÁQUINA 132 .....	51
FIGURA 5.3: FLUXOGRAMA DETALHADO DA FUNÇÃO DE AVALIAÇÃO.....	54
FIGURA 5.4: FLUXO MAGNÉTICO NA ARMADURA .....	58
FIGURA 5.5: CURVA DE SELEÇÃO APROXIMADA DO COMPRIMENTO MAGNÉTICO .....	63
FIGURA 6.1: AVALIAÇÕES OBTIDAS PARA A PRIMEIRA SIMULAÇÃO .....	68
FIGURA 6.2: ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA PARA A PRIMEIRA SIMULAÇÃO.....	69
FIGURA 6.3: ROTAÇÃO CALCULADA PARA A PRIMEIRA SIMULAÇÃO .....	69
FIGURA 6.4: AVALIAÇÕES OBTIDAS PARA A SEGUNDA SIMULAÇÃO .....	70
FIGURA 6.5: ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA PARA A SEGUNDA SIMULAÇÃO.....	70
FIGURA 6.6: ROTAÇÃO CALCULADA PARA A SEGUNDA SIMULAÇÃO .....	71
FIGURA 6.7: AVALIAÇÕES OBTIDAS PARA A TERCEIRA SIMULAÇÃO.....	72
FIGURA 6.8: ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA PARA A TERCEIRA SIMULAÇÃO .....	72
FIGURA 6.9: ROTAÇÃO CALCULADA PARA A TERCEIRA SIMULAÇÃO .....	73

FIGURA 6.10: AVALIAÇÕES OBTIDAS PARA A QUARTA SIMULAÇÃO .....	73
FIGURA 6.11: ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA PARA A QUARTA SIMULAÇÃO.....	74
FIGURA 6.12: ROTAÇÃO CALCULADA PARA A QUARTA SIMULAÇÃO .....	74
FIGURA 6.13: AVALIAÇÕES OBTIDAS PARA A QUINTA SIMULAÇÃO .....	75
FIGURA 6.14: ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA PARA A QUINTA SIMULAÇÃO.....	76
FIGURA 6.15: ROTAÇÃO CALCULADA PARA A QUINTA SIMULAÇÃO .....	76
FIGURA 6.16: GRÁFICO DE CONVERGÊNCIA .....	77
FIGURA 6.17: ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA NOS ENROLAMENTOS.....	77
FIGURA 6.18: GRÁFICO DE INDUÇÕES .....	78
FIGURA 6.19: PERDAS TOTAIS DO MOTOR .....	78
FIGURA 6.20: CUSTO.....	79
FIGURA 6.21: RELATÓRIO DE SAÍDA .....	80
FIGURA 6.22: AVALIAÇÃO DA SIMULAÇÃO GENÉRICA .....	81
FIGURA 6.23: ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA PARA A SIMULAÇÃO GENÉRICA.....	82
FIGURA 6.24: ROTAÇÃO CALCULADA PARA A SIMULAÇÃO GENÉRICA .....	82

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1: ROLETA.....	10
TABELA 2.2: SELEÇÃO PELO RANK.....	11
TABELA 3.1: CLASSES DE ISOLAMENTO E RESPECTIVAS ELEVAÇÕES DE TEMPERATURA.....	27
TABELA 5.1: CODIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE BUSCA.....	51
TABELA 5.2: CODIFICAÇÃO DOS CONDUTORES DA ARMADURA.....	51
TABELA 5.3: CODIFICAÇÃO DO CONDUTOR E NÚMERO DE ESPIRAS DA EXCITAÇÃO.....	51
TABELA 5.4: CODIFICAÇÃO DOS CONDUTORES DA COMUTAÇÃO.....	52
TABELA 5.5: CODIFICAÇÃO DO COMPRIMENTO DA ARMADURA.....	52
TABELA 5.6: DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS AVALIADOS.....	54
TABELA 5.7: DENSIDADE PADRÃO $S_{E2}$ PARA 100°C.....	55
TABELA 5.8: SXAS PADRÃO PARA 100°C.....	60
TABELA 5.9: DENSIDADE PADRÃO $S_{COM2}$ PARA 100°C.....	60
TABELA 6.1: LIMITES DAS VARIÁVEIS DA FUNÇÃO DE AVALIAÇÃO.....	69
TABELA 6.2: TABELA DE PESOS DOS PARÂMETROS AVALIADOS.....	67
TABELA 6.3: CARACTERÍSTICAS DO MOTOR.....	68
TABELA 6.4: CONFIGURAÇÃO DA PRIMEIRA SIMULAÇÃO.....	68
TABELA 6.5: CONFIGURAÇÃO DA SEGUNDA SIMULAÇÃO.....	71
TABELA 6.7: RESULTADOS OBTIDOS PARA A SEGUNDA SIMULAÇÃO.....	72
TABELA 6.6: CONFIGURAÇÃO DA TERCEIRA SIMULAÇÃO.....	72
TABELA 6.7: CONFIGURAÇÃO DA QUARTA SIMULAÇÃO.....	81
TABELA 6.8: TABELA DE PROPOSTA DE PESOS PARA NOVOS PARÂMETROS.....	82
TABELA 6.9: CONFIGURAÇÃO DA QUINTA SIMULAÇÃO.....	83
TABELA 6.10: NOVA CONFIGURAÇÃO DOS GENES.....	84
TABELA 6.11: CONFIGURAÇÃO PARA UMA SIMULAÇÃO GENÉRICA.....	84
TABELA 6.12: CONFIGURAÇÃO DO ALGORITMO.....	80
TABELA 6.13: CARACTERÍSTICAS DO MOTOR.....	80

TABELA 6.14: RESULTADOS DA COMPARAÇÃO .....	81
TABELA 6.15: CARACTERÍSTICAS DO MOTOR.....	81
TABELA 6.16: CONFIGURAÇÃO PARA O CASO PRÁTICO .....	81
TABELA 6.17: RESULTADOS OBTIDOS PARA O CASO PRÁTICO .....	82
TABELA 6.18: RESULTADOS DO ENSAIO DA MÁQUINA PROPOSTA PELA SIMULAÇÃO 8 DA TABELA 5.23 .....	82

## LISTA DE SÍMBOLOS

$f$ :	Frequência da rede em Hz
$p$ :	Número de par de pólos
$n$ :	Rotação em rpm
$\phi$ :	Fluxo instantâneo
$\phi_n$ :	Fluxo nominal
$\omega$ :	Velocidade angular em rad/s
$e$ :	Tensão instantânea em V
$E_{max}$ :	Tensão máxima em V
$E_{med}$ :	Tensão média em V
$a$ :	Número de circuitos paralelos na armadura
$N$ :	Número de condutores na armadura ou ranhuras do rotor
$Z_a$ :	Número total de condutores
$U_a$ :	Tensão de armadura em V
$R_a$ :	Resistência do enrolamento da armadura em $\Omega$
$I_a$ :	Corrente de armadura em A
$R_{exc}$ :	Resistência do enrolamento da excitação em $\Omega$
$A_{exc}$ :	Seção transversal do condutor da excitação em $mm^2$
$P_{pe}$ :	Número de pólos da excitação em paralelo
$\Delta T_e$ :	Elevação de temperatura do enrolamento de excitação em $^{\circ}C$
$l_{total}$ :	Comprimento total do enrolamento de excitação em mm
$J_{exc}$ :	Densidade de corrente do enrolamento da excitação em $A/mm^2$
$U_e, U_{exc}$ :	Tensão de excitação em V
$P_{exc}$ :	Potência dissipada pelo enrolamento de excitação em W
$I_{exc}$ :	Corrente de excitação em A

$\theta_e$ :	Força Magnetomotriz da excitação em A/cm
$\Delta U$ :	Queda de tensão do circuito da armadura em V
$f.e.m$ :	Força eletromotriz em V
$R_{aq}$ :	Resistência quente do enrolamento da armadura em $\Omega$
$R_{cm}$ :	Resistência quente do enrolamento da comutação em $\Omega$
$\Delta U_{esc}$ :	Queda de tensão nas escovas em V
$n_s$ :	Número de escovas necessária
$d_e$ :	Densidade de corrente nominal da escova em A/cm <sup>2</sup>
$t, ta$ :	Medida tangencial da escova em cm
$ax$ :	Medida axial da escova em cm
$P_{com}$ :	Perdas no comutador em W
$A_{com}$ :	Área superficial do comutador em cm <sup>2</sup>
$P_{at}$ :	Perdas mecânicas na escova em W
$V_p$ :	Velocidade periférica do comutador em m/s
$e_r$ :	Tensão de reatância em V
$L_R$ :	Coefficiente de auto indução
$\omega_L$ :	Número de espiras por lamela
$V_{an}$ :	Velocidade periférica da armadura em m/s
$L_{id}$ :	Comprimento ideal da armadura em mm
$\xi$ :	Coefficiente de Pichelmayer
$A_S$ :	Carga periférica da armadura em A/cm <sup>2</sup>
$I_{asob}$ :	Corrente de sobrecarga em A
$n_N$ :	Rotação nominal da máquina em rpm
$n_f$ :	Rotação máxima (enfraquecimento de campo) em rpm
$Z_L$ :	Número de lamelas do comutador
$e_L$ :	Tensão entre lamelas em V

$B_{m\acute{a}x}$ :	Indução máxima no entreferro em T
$B_L$ :	Indução no entreferro em T
$P_{\acute{u}til}$ :	Potência útil em kW
$P_n$ :	Potência nominal em kW
$B_{entreferro}$ :	Indução no entreferro em T
$\phi_{ares}$ :	Fluxo principal em mWb
$D_a$ :	Diâmetro externo da armadura em mm
$B_{dente}$ :	Indução no dente do rotor em T
$B_{carm}$ :	Indução na coroa da armadura em T
$D_i$ :	Diâmetro interno da armadura em mm
$l_a$ :	Comprimento da armadura em mm
$b_{hp}$ :	Arco polar em mm
$D_k$ :	Diâmetro do comutador em mm
$\delta_e, \delta_{hp}$ :	Entreferro principal em mm
$\delta_c$ :	Entreferro de comutação em mm
$B_{hp}$ :	Largura do pólo principal em mm
$B_{wp}$ :	Largura do pólo de comutação em mm
$S_{ranhura}$ :	Enchimento máximo da ranhura da armadura em mm <sup>2</sup>
$ZapN$ :	Número total de condutores por ranhura
$FioA$ :	Diâmetro do condutor da armadura em mm
$C_p$ :	Número de condutores da armadura em paralelo
$Fiohp$ :	Diâmetro do fio da excitação em mm
$P_{pe}$ :	Número de pólos de excitação em paralelo
$R_f$ :	Resistência fria do enrolamento de excitação em $\Omega$
$S_{e2}$ :	Densidade de corrente de referência para 100°C
$EMK$ :	Força eletromotriz do motor em V

$\eta$ :	Redimento da máquina em %
$\Delta T_a$ :	Elevação de temperatura do enrolamento da armadura em °C
$AS_{Padr\tilde{a}o} \times S_{a2}$ :	Parâmetro padrão para elevação de temperatura de 100°C
$N_c$ :	Rotação calculada em rpm
$P_{pw}$ :	Número de pólos de comutação em paralelo
$S_{com}$ :	Densidade de corrente do enrolamento de comutação em A/mm <sup>2</sup>
$\Delta T_{com}$ :	Elevação de temperatura do enrolamento de comutação em °C
$S_{com2}$ :	Densidade padrão para elev. de temperatura 100°C em A/mm <sup>2</sup>
$R_{com}$ :	Resistência quente da comutação em $\Omega$
$P_c$ :	Perdas do enrolamento de comutação em W
$l_{curva}$ :	Comprimento estimado pelo gráfico
$e_{Llimite}$ :	Limite admissível da tensão entre lamelas em V
$e_{Rlimite}$ :	Limite admissível da tensão de reatância em V
$P_t$ :	Perdas totais em W
$P_{suplementares}$ :	Perdas suplementares em W
$P_{escovas}$ :	Perdas geradas pelas escovas em W
$P_{Fe}$ :	Perdas no ferro em W
$\eta_c$ :	Rendimento calculado em %
$w_{wc}$ :	Número de espiras do enrolamento de comutação
$WEP$ :	Número de espiras do enrolamento principal
$F_{iowp}$ :	Diâmetro do condutor do enrolamento da comutação em mm
$Ench.$ :	Enchimento das ranhuras da armadura

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o projeto elétrico das máquinas de corrente contínua é realizado através de programas computacionais que consistem numa seqüência de cálculos pré estabelecidos de acordo com a teoria eletromagnética (baseado na lei de Faraday).

Os dados de entrada desta seqüência de cálculo são constituídos basicamente de dados de origem geométrica (mecânicos) e especificações elétricas. Através destes dados, é possível estimar teoricamente o comportamento eletromagnético da máquina elétrica em questão.

A análise dos dados de saída, ou seja, os resultados provenientes da resposta da seqüência de cálculos, permitem ao projetista eletromecânico observar as melhorias ou reparos que devem ser realizados através dos dados de entrada.

Assim, o ciclo se repete continuamente até que os resultados dos cálculos atendam todos os requisitos necessários da máquina. Pode-se representar este ciclo através do fluxograma da figura 1.1.

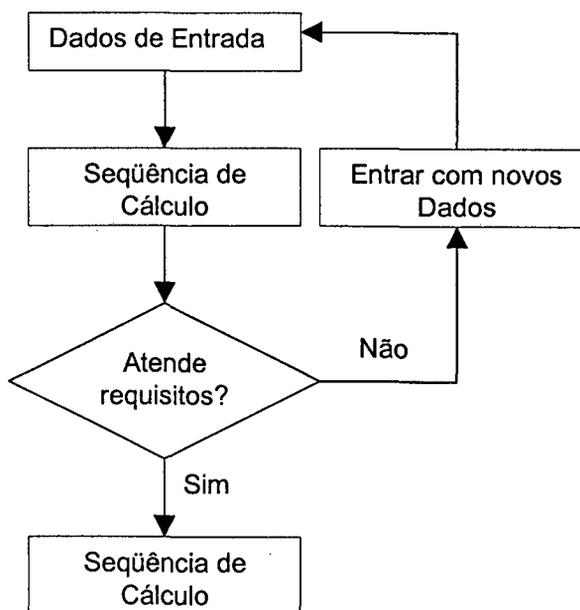


Figura 1.1: Fluxograma para projeto de máquinas

Do fluxograma da figura 1.1 pode se concluir que o tempo está diretamente relacionado com o número de vezes em que o laço da pergunta "Atende requisitos" é realizado.

O projeto de uma máquina baseada neste método entrega totalmente a confiabilidade da melhor configuração da máquina à experiência do projetista. Assim, o projeto especificado com pouca experiência abre possibilidades de existir outros dados de entrada, diferentes daqueles utilizados pelo projetista que melhor atendam os requisitos da máquina ou atendam os requisitos com um custo de fabricação menor.

O estudo apresentado neste trabalho, utiliza o método de Algoritmos Genéticos como ferramenta para a otimização da seqüência de cálculos utilizada para o projeto da máquina. A função a ser otimizada, denominada como função de avaliação (que será estudada no próximo capítulo), integrará todas as principais características da máquina.

O método procura assegurar uma das melhores configurações de dados de entrada para a seqüência de cálculos sem a necessidade de interferência pelo projetista. A cada análise das respostas da seqüência de cálculos, o algoritmo gera novas opções de entrada baseadas em outros dados de entrada e na qualidade das avaliações por elas obtidas.

No capítulo seguinte, será estudado a teoria dos Algoritmos Genéticos e seu esquema de funcionamento. Uma introdução à teoria das máquinas elétricas de corrente contínua será abordada no capítulo 3. As implementações das funções e do Algoritmo Genético aplicado ao projeto das máquinas será estudado no capítulo 4 e 5.

O capítulo 6 apresenta os resultados obtidos para algumas simulações de projetos com a implementação do programa realizado em Matlab com todas as tabelas e curvas geradas pelo software.

## 2. ALGORITMOS GENÉTICOS

Os Algoritmos Genéticos constituem uma técnica de busca e otimização baseada na evolução natural das espécies. Com inspiração na genética, o algoritmo é capaz de evoluir populações de indivíduos através das gerações, conduzindo eventualmente à determinação da solução ótima para o problema proposto.

Uma implementação do algoritmo inicia-se na geração da população inicial de indivíduos, geralmente aleatória. Na etapa seguinte, a avaliação da população indica os indivíduos com maior ou menor potencial para solução do problema. É baseado nesta avaliação que os indivíduos recebem as probabilidades de reprodução. Em analogia ao processo natural, esses indivíduos, denominados de cromossomos pela literatura genética, sofrem transformações através dos operadores genéticos, como recombinação e mutação, gerando assim a sua descendência. Este ciclo se repete a cada nova geração até que o critério de parada seja satisfeito.

### 2.1 Introdução

Os indivíduos na natureza competem entre si pelo alimento, espaço e reprodução [1], evoluindo de acordo com as regras naturais de "sobrevivência", onde os mais fortes ou que melhor se adaptam ao ambiente têm maior possibilidade de se reproduzirem e assim manterem sua descendência por mais tempo que aqueles menos adaptados ou mais frágeis. Portanto, a seleção natural tende a manter nas populações os genes dos indivíduos com as melhores características de adaptação ao ambiente, genes estes que serão transmitidos para as gerações futuras, de maneira que, a cada geração, os indivíduos estejam melhor adaptados para o ambiente.

O aspecto de adaptação de cada indivíduo ao ambiente natural está relacionado com suas características hereditárias. Os genes que compõem os cromossomos possuem codificadas todas as informações das características do indivíduo. Dentro da genética, esse código é denominado genótipo, enquanto as características propriamente ditas, são chamadas de fenótipo.

Assim, quando existe o cruzamento de dois seres de mesma espécie, a descendência passa a herdar uma combinação do material genético de seus pais, fato pelo qual, o indivíduo pode possuir algumas características do pai e outras da mãe.

Analogamente a esse comportamento natural, os Algoritmos Genéticos interagem com uma população de indivíduos, que representam na verdade possíveis soluções para o problema,

entretanto, codificados (genótipos). A cada um desses indivíduos, atribui-se uma nota, avaliada por uma função denominada *função de avaliação*. Essa nota, está espelhada no grau de adaptação do indivíduo no ambiente natural.

Através da avaliação, o algoritmo pode então fazer a seleção dos elementos a serem reproduzidos de forma que ao final do processo, ou seja, a convergência da população, os indivíduos representem a melhor solução para o problema proposto.

## 2.2 Aplicação

Os algoritmos genéticos podem ser aplicados à maioria dos problemas de otimização, entretanto, sua performance não deve ser comparada a técnicas existentes específicas para um problema em particular.

As áreas de aplicação dos AG's são principalmente aquelas onde não existem uma técnica específica ou cujos resultados obtidos pelos métodos convencionais não são satisfatórios. Ainda assim, mesmo onde existem técnicas de otimização, pode-se alcançar uma melhora significativa adotando uma técnica híbrida com os Algoritmos Genéticos [2].

Os AG's podem ser aplicados a problemas de otimização de construções civis ou pontes para se encontrar a melhor relação de gastos de materiais dentro dos limites de esforços aos quais a estrutura será submetida. Também tem sido alvo de trabalhos na área de escalonamento nos sistemas de produção [3], onde se deve otimizar o tempo para aumentar a produtividade.

Outro campo de atuação dos Algoritmos Genéticos está nas máquinas elétricas [4-12], como apresentados em [4,7,10], na determinação de parâmetros do circuito equivalente do motor de indução. Em [10] é apresentada ainda, uma comparação entre os AG's e a Programação Genética, através de três circuitos equivalentes.

Segundo, David E. Goldberg em [13], podem ser definidas algumas categorias para se motivar a utilização dos Algoritmos Genéticos: Natureza, Sistemas Artificiais, Competência e Economia.

Das categorias citadas por Goldberg, as mais interessantes parecem ser a competência do método e a economia. A natureza e sistemas artificiais estão relacionados a justificativas de funcionamento do método (a evolução natural como prova existente de funcionamento) enquanto a competência e a economia estão relacionadas aos limites dos operadores genéticos, economia de investimento na modelagem, no método de otimização e tempo.

## 2.3 Fundamentos

Diferentemente dos métodos tradicionais de otimização, os Algoritmos Genéticos trabalham com uma codificação do conjunto de parâmetros e não diretamente com os parâmetros. As possíveis soluções do problema são representadas por códigos, geralmente uma cadeia de bits. Esses códigos, inspirados da genética, são conhecidos como cromossomos e são compostos pelos genes. Cada gene pode ser considerado como representante de um parâmetro do problema de otimização.

Os Algoritmos Genéticos trabalham com uma população de indivíduos (cromossomos) que são avaliados, selecionados e reproduzidos para dar origem a uma nova geração e assim sucessivamente. Essa característica, segundo alguns autores [1,14] constitui uma das principais diferenças deste método em relação aos tradicionais, pois a exploração do espaço de busca se dá através de vários pontos e não de um único ponto. Entende-se por espaço de busca, o conjunto ou região que compreende as soluções possíveis do problema a ser otimizado.

Uma população reduzida pode levar a uma pequena varredura do espaço de busca e pode diminuir a chance de ser encontrada a solução ótima global principalmente quando houver um tempo reduzido. Entretanto, uma população maior pode explorar melhor o espaço e reduzir a possibilidade de uma convergência prematura, porém deve-se considerar que para uma população de número de indivíduos muito elevado, o algoritmo será limitado pelo custo computacional. Assim, procura-se encontrar um equilíbrio satisfatório na questão do custo computacional e qualidade da solução.

De maneira genérica a estrutura de um Algoritmo Genético pode ser representada através do fluxograma da figura 2.1.

A etapa inicial de geração da população normalmente é aleatória, exceto em casos onde já se conhecem pontos próximos da solução global, nestes casos entretanto, a possibilidade de utilização de métodos de otimização como escalagem (do Inglês *hillclimbing*) com auxílio do gradiente pode ser uma alternativa mais eficiente (ver figura 2.2).

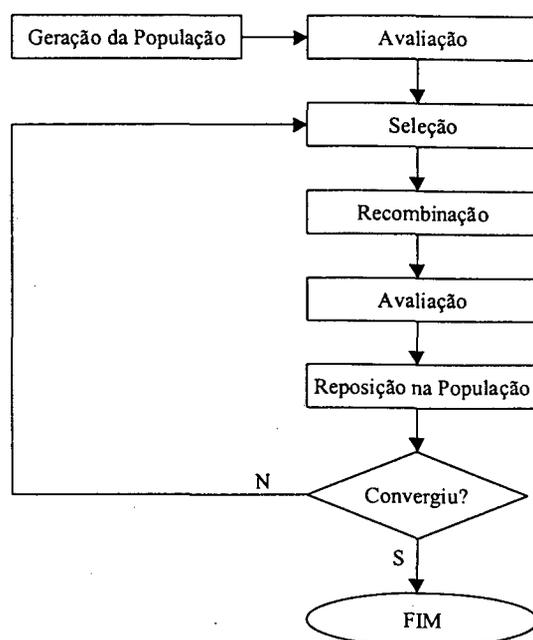


Figura 2.1: Fluxograma genérico de um AG

Através da função de avaliação, os cromossomos são avaliados para posteriormente serem selecionados. Seus descendentes, assim como na natureza, herdarão as características de seus pais. Os indivíduos que representam as soluções não adequadas ao problema são descartados ou tem menos chance de reprodução, reduzindo assim a sua descendência durante as próximas gerações, o que leva a população a convergir para uma solução otimizada.

A função de avaliação utilizada pelos AG's independe de métodos de derivada ou que exijam algum conhecimento auxiliar sobre o sistema. A transição de uma geração para a outra, utiliza métodos probabilísticos e não determinísticos como nos métodos tradicionais.

É possível que a reprodução de dois indivíduos com baixa avaliação possa dar origem a uma descendência com uma avaliação alta. É necessário então que se escolha um método de seleção que não exclua totalmente a possibilidade de um indivíduo com baixa avaliação se reproduzir.

A etapa de seleção é responsável pela escolha dos indivíduos “pais”, que transmitirão seu material genético para as futuras gerações. Uma vez selecionados, os indivíduos são inseridos numa matriz de transição onde aguardam a recombinação e reposição na população atual.

Terminada a inserção dos descendentes na população original, o ciclo retorna à avaliação da população e novamente se reinicia o laço até que o critério de parada seja satisfeito.

As etapas representadas pelo fluxograma da figura 2.1 serão tratadas com mais detalhes no decorrer deste capítulo.

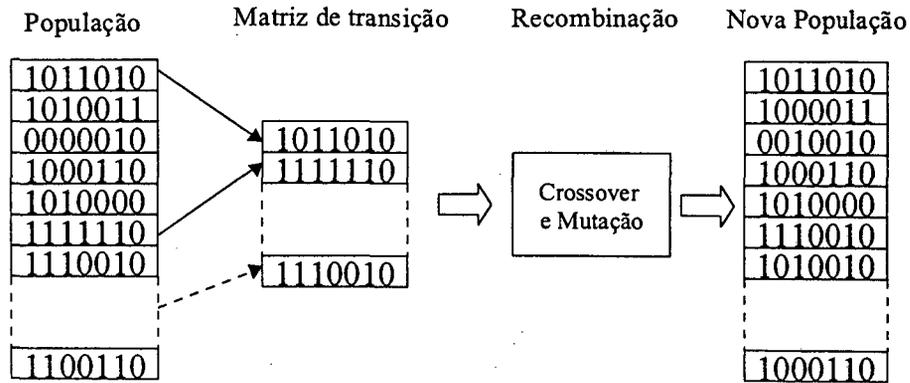


Figura 2.2: Matriz de transição

## 2.4 Codificação

A solução do problema a ser otimizado é composta por um conjunto de parâmetros, conhecidos como *genes*, que, juntos compõem a seqüência de caracteres da cadeia denominada cromossomo.

A maioria das aplicações de Algoritmos Genéticos trabalha com problemas de natureza não-linear, ou seja, não é possível resolver o problema simplesmente isolando as variáveis, pois existem relações (Epistasis) entre os genes (Parâmetros) que devem ser consideradas na solução do problema.

No caso particular de uma função bidimensional  $f(x,y)$ , onde as variáveis  $x$  e  $y$  são codificadas (*genes*) por uma cadeia de 10 bits, o cromossomo terá um comprimento total de 20 bits (ver figura 2.3). Neste caso, as variáveis  $x$  e  $y$  podem representar um intervalo de  $2^{10}$  valores.

Cada gene corresponde a um parâmetro real do problema a ser otimizado. Um problema freqüente que se encontra nesta codificação é que, nem sempre, os parâmetros representam valores discretos, logo, uma representação binária com 1024 valores é possível de se realizar com 10 bits, entretanto, quando se pretende representar 524 valores, nove bits são insuficientes enquanto que uma representação com dez bits apresenta 500 valores além do necessário. Nestes casos, pode-se utilizar técnicas de redundância [14], onde alguns indivíduos têm uma dupla representação.

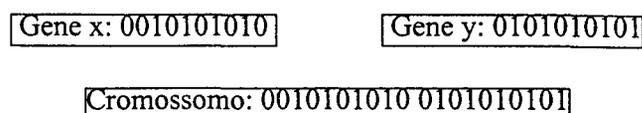


Figura 2.3: Genes e cromossomos

No caso de não se relacionar os valores dos parâmetros com todos os códigos binários do cromossomo, não é possível assegurar que durante sua manipulação pelos operadores genéticos, não apareçam valores de cromossomos sem significado real, prejudicando ou invalidando a qualidade da solução, pois existirão pontos inválidos no espaço de busca.

Tradicionalmente, os cromossomos são compostos por elementos binários, entretanto, existem diversas discussões a respeito da cardinalidade das representações não binárias [14] e suas vantagens.

Em trabalhos com variáveis de valor contínuo, deve-se definir a precisão necessária e o intervalo da solução, em seguida, passa-se a discretização desses valores. Assim, se num intervalo entre  $[0;10]$  for utilizado uma codificação com 6 bits, tem-se  $2^6$  valores discretos para este intervalo, portanto, a precisão será de 0.15. Caso a precisão seja insuficiente para a qualidade da resposta, pode-se aumentar o número de bits da codificação, entretanto, tendo em mente o aumento do espaço de busca.

## 2.5 Função de avaliação

A função  $f$  citada na seção anterior é conhecida também como função de avaliação. Seu papel é essencial no desempenho do algoritmo uma vez que seu objetivo é avaliar a qualidade de cada cromossomo para o referido problema. A complexidade da avaliação está relacionada a quantidade de parâmetros a serem otimizados e como fazer sua avaliação.

A função geralmente não é trivial, pois varia de acordo com a aplicação e juntamente com a codificação, pode constituir em certos casos, a maior dificuldade de implementação do algoritmo.

É importante observar que, como os Algoritmos Genéticos trabalham com populações, a função será utilizada proporcionalmente ao número de indivíduos e a cada geração efetuada. No caso hipotético de uma avaliação levar aproximadamente 15 segundos para cada indivíduo, numa população de 300 indivíduos, o algoritmo levaria cerca de 4500 segundos ou 1 hora e 15 minutos para avaliar todos os indivíduos a cada geração.

A regra geral para a função de avaliação é desenvolvê-la de maneira que ela reflita o valor do cromossomo de maneira real. Infelizmente, essa tarefa não é simples para a maioria dos pro-

blemas de otimização, onde existem diversas restrições e muitos pontos do espaço de busca podem ter um significado inválido.

Métodos de tratamento de restrições tem sido propostos em [1,15], como a função de penalidade (Penalty Function), que penaliza os cromossomos inválidos com uma redução na avaliação. Outra abordagem para o problema de cromossomo inválidos é proposta por Cramer [1], onde se recompensa aqueles cromossomos que possuírem uma avaliação válida no espaço de busca.

## 2.6 Seleção

Após a etapa de avaliação dos indivíduos, deve-se escolher quais serão os responsáveis pela geração da nova população. Nesta etapa, é definido então o esquema de seleção a ser utilizado.

A seleção é realizada de maneira a favorecer os indivíduos com melhor avaliação, ou seja, que tenham sido avaliados como mais aptos à solução do problema, enquanto que, indivíduos com menor nota (avaliação) são menos favorecidos na reprodução.

Para que os cromossomos com melhor nota uma vez encontrados sempre se mantenham durante as gerações, pode se utilizar uma estratégia elitista, simplesmente copiando-os para a nova população, garantindo assim que nesta população, a avaliação do melhor indivíduo nunca seja mais baixa que na geração anterior.

### 2.6.1 Método do sorteio da roleta

Uma técnica de seleção comum é a escolha dos indivíduos através do *sorteio da roleta*, onde a probabilidade de cada cromossomo ser selecionado é diretamente proporcional à sua avaliação. Este tipo de mecanismo de seleção é conhecido também como seleção proporcional à avaliação.

Este método consiste em dividir uma roleta em setores proporcionais à nota dada pela função de avaliação, conforme mostra a figura 2.4.

O número de indivíduos a ser selecionado é o número de vezes que a roleta deverá ser girada. Nota-se que neste método de seleção, o indivíduo com maior avaliação (indivíduo 1) possui maiores chances de ser sorteado pelo giro da roleta.

Neste método de sorteio proporcional à avaliação, quando existe uma discrepância muito alta entre a nota de um indivíduo e os demais, tal indivíduo pode “dominar” os setores da roleta e

ele pode nem sempre ser o indivíduo representante da solução ótima global do problema, mas de um máximo local. Esse tipo de problema pode levar a uma convergência prematura da população.

<i>Número do indivíduo</i>	<i>Avaliação</i>
1	31,25
2	12,00
3	13,00
4	12,50
5	25,00
6	6,250

Tabela 2.1: Roleta

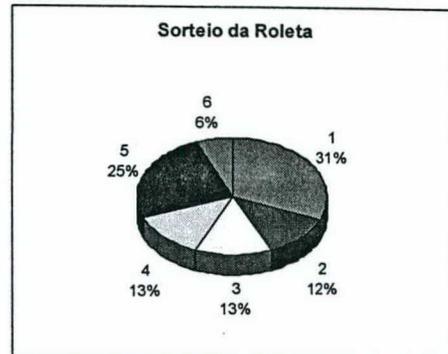


Figura 2.4: Roleta

A mudança de escala de maneira linear (fitness scaling) proposta por Goldberg em [15] pode minimizar este tipo de problema. Nesta mudança de escala,  $f$ , que é a avaliação de um determinado indivíduo, possui uma relação linear com  $f'$ , seu valor na nova escala.

$$f' = a.f + b \quad (2.1)$$

A relação entre  $f$  e  $f'$  é mostrado pela equação ( 2.1 ). Os coeficientes  $a$  e  $b$  podem ser escolhidos de diversas maneiras, entretanto, em todos os casos, o método sugere que o valor de  $f'$  médio seja igual a  $f$  médio. Ao utilizar este tipo de mudança de escala deve-se estar sempre atento aos valores assumidos por  $f'$  e fazer a correção necessária quando este valor for negativo.

Outra forma de minimizar o problema de “domínio” de um único indivíduo da roleta é utilizar técnicas de seleção como o Método de Seleção pelo rank ou Amostragem Estocástica Universal.

### 2.6.2 Método de seleção pelo rank

O método de seleção pelo rank é similar ao da roleta, entretanto, os setores da roleta são distribuídos de acordo com o rank de cada elemento e não pela sua avaliação.

O rank de um indivíduo se refere à sua posição em ordem decrescente de avaliação, por exemplo, o indivíduo com pior avaliação ocupa a posição de número 1.

Embora esse tipo de seleção torne o algoritmo mais lento porque o melhor indivíduo da população tem uma diferença baixa em relação aos demais, tal procedimento evita o problema de convergência prematura citado no método do sorteio da roleta.

A construção do método de seleção pelo rank pode ser observada na tabela 2.2, onde os mesmos indivíduos da tabela 2.1 são utilizados.

<i>Indivíduo</i>	<i>Avaliação</i>	<i>Rank</i>	<i>% do Total</i>
1	31,25	6	28
2	12,00	2	10
3	13,00	4	19
4	12,50	3	14
5	25,00	5	24
6	6,25	1	5

Tabela 2.2: Seleção pelo rank



Figura 2.5: Sorteio pelo rank

É baseado na quarta coluna da tabela 2.2 que os setores da roleta deverão ser distribuídos. Observa-se que existe uma distribuição mais uniforme neste método e que a distribuição para seis indivíduos sempre será a percentualmente a mesma, independente das avaliações dos indivíduos.

### 2.6.3 Amostragem Estocástica Universal

Na técnica de seleção SUS (Stochastic Universal Sampling), a distribuição dos indivíduos é realizada de maneira proporcional à avaliação como no método da roleta, porém, o sorteio é realizado de maneira diferente.

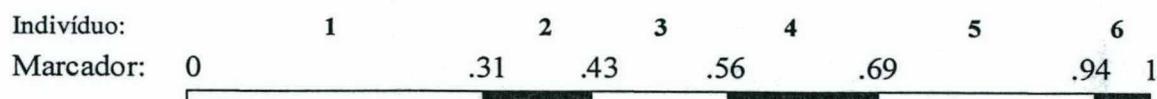


Figura 2.6: Distribuição para SUS

Inicialmente, marca-se o segmento onde os indivíduos foram distribuídos (figura 2.6), em  $N$  partes iguais onde  $N$  é o número de indivíduos que se deseja selecionar. O espaçamento entre cada marcador deverá ser igual a  $1/N$  e o primeiro marcador é colocado aleatoriamente entre 0 e  $1/N$ .

No exemplo da figura 2.6, o número de indivíduos a ser selecionado é 4, portanto, divide-se o segmento em 4 partes iguais. O espaçamento entre os marcadores é de 0.25 e a posição do primeiro marcador é escolhido de maneira aleatória entre 0 e 0.25.

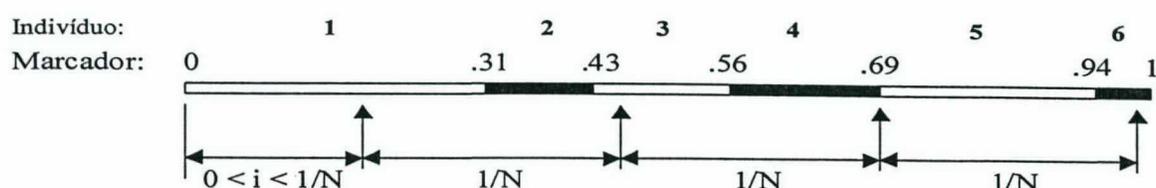


Figura 2.7: Técnica de seleção SUS

Os indivíduos selecionados neste caso são: 1, 3, 4 e 6. Este método também evita o problema de dominância de um único indivíduo da população.

#### 2.6.4 Método de seleção por torneio (Tournament Selection)

Neste método de seleção é possível controlar a pressão seletiva, isto é, o grau com que os melhores indivíduos são favorecidos [16-18] - quanto maior a sua avaliação maior a probabilidade de ser escolhido, quanto menor a avaliação, menor a probabilidade. A pressão seletiva deve ser entendida como sendo a probabilidade do melhor indivíduo ser escolhido comparado com a probabilidade média de todos os indivíduos serem escolhidos.

A técnica de seleção por torneio ou tournament em sua concepção mais simples, consiste em se escolher aleatoriamente  $N$  indivíduos ( $2 < N < N_{\text{máx}}$ ) da população e selecionar o melhor indivíduo entre os  $N$  indivíduos escolhidos, ou seja, aquele que apresentar a maior avaliação. O número  $N$  de indivíduos sorteados é conhecido como "tamanho do torneio" e é através desse valor que a pressão seletiva pode ser controlada.

## 2.7 Operadores Genéticos

A recombinação dos indivíduos é realizada através dos operadores genéticos crossover e mutação. Tais operadores são aplicados com certa probabilidade, ou seja, uma vez selecionados os indivíduos para a recombinação, existe uma probabilidade  $X$  (usualmente 80%) de que os indivíduos se recombinem.

### 2.7.1 Crossover simples

A técnica de crossover simples consiste em escolher um ponto aleatoriamente no cromossomo e, a partir deste ponto, trocar os bits seguintes com o outro cromossomo, conforme mostra a figura 2.8.

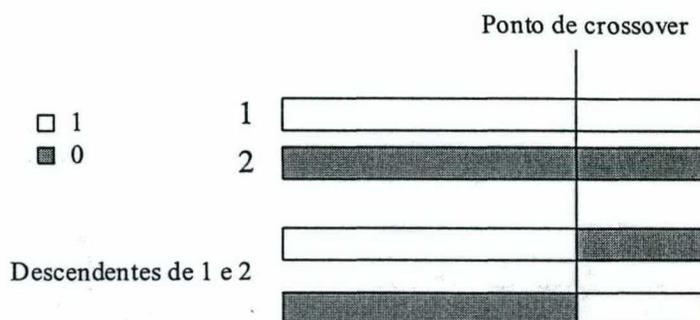


Figura 2.8: Crossover Simples

### 2.7.2 Crossover de pontos múltiplos

O crossover de dois pontos, ou de maneira mais genérica, crossover de pontos múltiplos é uma extensão da técnica de crossover simples.

Esta técnica melhora o algoritmo quanto à exploração do espaço de busca. No crossover de pontos múltiplos, o cromossomo é considerado como uma cadeia unindo-se o final do cromossomo com seu início. Para se trocar o segmento de uma cadeia com outro, torna-se necessário então, dois pontos, um de início do segmento e outro de fim. A troca ocorre normalmente, como o crossover de um ponto.

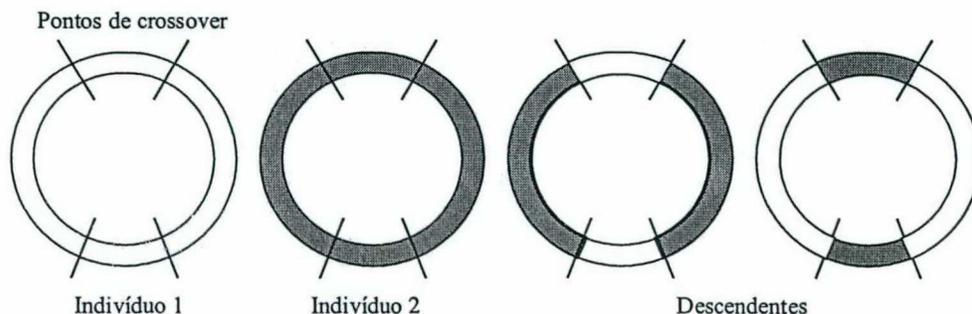


Figura 2.9: Crossover de pontos múltiplos

### 2.7.3 Crossover uniforme

O crossover uniforme (*uniform crossover*) é uma técnica em que cada gene da descendência é criado copiando-se o gene correspondente a um dos pais, escolhido de acordo com uma máscara gerada aleatoriamente. Onde houver 1 na máscara, o gene é copiado do primeiro cromossomo e onde houver 0, do segundo, conforme a figura 2.10.

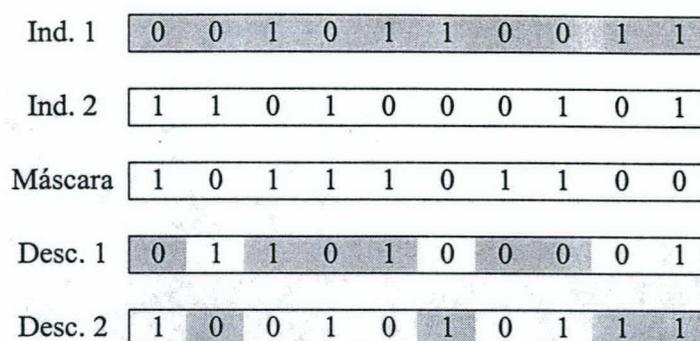


Figura 2.10: Uniform Crossover

### 2.7.4 Crossover parcialmente mapeado (PMX)

A técnica de PMX proposta por Goldberg e Lingle [15] seleciona um mesmo intervalo aleatório nos dois cromossomos pais e os transpõe. A transposição é uma permutação onde os dois elementos são trocados e os demais permanecem inalterados.

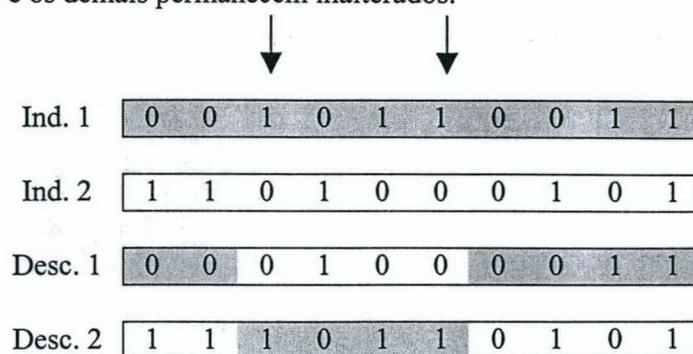


Figura 2.11: PMX

O algoritmo da figura 2.12 exemplifica a operação de crossover parcialmente mapeado. O valor *max* representa o comprimento da cadeia.

```

Desc1 = Ind1;
Desc2 = Ind2;
Gerar dois números aleatórios  $p_1$  e  $p_2$  com  $0 < p_1 < p_2 \leq \max$ 
  Para  $i = p_1$  até  $p_2$  faça
    Desc2 = Ind1[  $i$  ];
    Desc1 = Ind2[  $i$  ];

```

Figura 2.12: Algoritmo do PMX

### 2.7.5 Mutação

A outra técnica de manipulação genética é a mutação, que consiste em trocar o bit de um cromossomo numa posição aleatória por seu complemento. A mutação é aplicada com menos frequência que o crossover (geralmente 1 a cada 1000 indivíduos, ou segundo alguns autores, com probabilidade  $1/l$  onde  $l$  é o comprimento da cadeia de bits do cromossomo).

Ind. 1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1
Desc. 1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1

Figura 2.13: Mutação

A mutação é responsável pela exploração do espaço de busca e assegura que todos os pontos do espaço possam ser pesquisados [1].

Assim como na técnica de crossover, a mutação também possui suas variantes quanto à probabilidade e técnica. Existem propostas para se utilizar somente a seleção e mutação para a evolução, denominada *naïve evolution* [14].

Para os operadores genéticos de crossover, mutação e suas variantes, não existem estudos que comprovem uma configuração ideal a ser utilizada, pois experimentalmente, alguns métodos são mais eficientes em determinadas situações, entretanto, mostram-se deficientes em outras.

### 2.7.6 Operador de Inversão

No operador de inversão, dois pontos são escolhidos aleatoriamente ao longo da cadeia e a posição de cada bit compreendido entre esses dois pontos é invertida, conforme mostra a figura 2.14.

Ind. 1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1
Desc. 1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1

Figura 2.14: Operador de inversão

O operador de inversão no entanto, embaralha os bits de maneira aleatória gerando um cromossomo não somente com significado diferente mas também com uma avaliação diferente. Assim, o método propõe uma indexação das posições dos bits a partir da qual é possível manter o significado do cromossomo mesmo alterando a ordem de determinados bits, mantendo assim sua avaliação. Geneticamente falando, o genótipo permanece inalterado uma vez que as características do indivíduo (fenótipo) continuam inalteradas.

A restrição do uso do operador de inversão está em se comprometer com um índice para cada indivíduo e também com efetuar operações de recombinação somente entre cromossomos de mesma indexação.

## 2.8 Reinserção

Uma vez selecionados e recombinados, os novos indivíduos podem ser avaliados e reinseridos na população. Se o número de descendentes for menor que o número de indivíduos da população, então é necessário que haja um critério para a substituição de antigos cromossomos pelos novos.

O intervalo de geração [14] (do Inglês *generation gap*) é definido como a proporção dos indivíduos da população que serão reinseridos a cada geração. Para a maioria das aplicações, o valor 1 é atribuído ao intervalo, isto é, a população inteira é substituída a cada geração, entretanto, a tendência mais recente tem favorecido o tipo de reposição estado estacionário (*steady-state*), que utiliza um intervalo de baixo valor - tipicamente somente dois indivíduos são reinseridos a cada geração.

Em alguns seres cujas vidas são curtas, como certas espécies de insetos, os pais morrem antes mesmo da eclosão dos ovos, ou seja, morrem antes de sua descendência nascer. Entretanto, em espécies de vida mais longa, como os mamíferos, os descendentes e seus genitores vivem con-currentemente. Neste sentido, o estado estacionário parece ser mais favorável para uma representação similar àquela que ocorre na natureza no caso dos mamíferos.

Das inúmeras possibilidades de reinserção, pode-se destacar:

- ◆ Reinscrição pura – quando todos os indivíduos da população são substituídos, isto é, o número de descendentes é igual ao número de indivíduos da população – generation gap = 1;
- ◆ Reinscrição elitista – quando a descendência substitui os indivíduos com menor avaliação da população;
- ◆ Substituição dos pais – a descendência substitui os indivíduos da população atual que os gerou;
- ◆ Substituição aleatória – a substituição é realizada aleatoriamente na população atual.
- ◆ Reinscrição baseada na avaliação – quando se produz mais descendentes que o necessário e se reinsere somente aqueles com melhor avaliação.

Para a reposição também não existem comprovações sobre o tipo de substituição ideal, pois na prática, alguns métodos podem levar a convergência prematura em determinadas aplicações, enquanto que o mesmo método para outras aplicações podem funcionar bem.

## 2.9 Critérios de parada

O critério de término do algoritmo pode ser a convergência da população. Entende-se como convergência dos genes, quando uma certa percentagem, tipicamente 95% da população, possui o mesmo valor para este gene. A população pode ser considerada convergida quando todos os genes do cromossomo convergiram [14].

Pode-se ainda limitar o algoritmo pelo número de iterações ou tempo, entretanto estes dois critérios podem trazer resultados insatisfatórios para o problema proposto.

## 2.10 Funcionamento

### 2.10.1 *Hyperplanos e Hypercubos*

A explicação mais comum e pioneira para o funcionamento dos Algoritmos Genéticos provém dos trabalhos de John Holland [19] em 1975 com a publicação de seu livro “Adaptation in Natural and Artificial Systems”. Holland desenvolveu diversos argumentos para explicar como um Algoritmo Genético pode resultar em uma busca complexa e robusta através da amostragem das partições de um hiperplano em um espaço de busca.

Considerando-se um problema codificado com 3 bits, assume-se que esse espaço de dimensão 3 é representado por um cubo com a seqüência “000” na origem. Os vértices deste cubo são rotulados por bits de maneira que dois vértices adjacentes se diferenciem somente por um bit conforme mostra a figura 2.15.

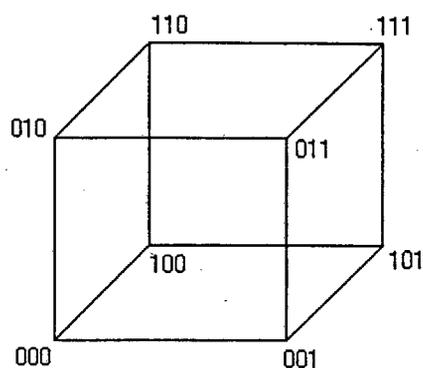


Figura 2.15: Cubo com vértices rotulados por bits

O plano frontal do cubo é constituído por todos os vértices do cubo que iniciam com “0” (000, 010, 011 e 001). Se o símbolo “\*” for utilizado para representar tanto “0” como “1”, tem-se que o plano frontal pode ser representado pela cadeia especial “0\*\*\*”. As cadeias que contém o símbolo “\*” são denominadas conjunto de blocos (schemata). Cada bloco (schema) que pode ser representado pelo conjunto corresponde a um hiperplano no espaço de busca.

A ordem dos blocos é o número de posições fixas (no alfabeto binário, os números 1 e 0), presentes na cadeia, logo, uma cadeia “0\*\*\*” possui ordem 1 enquanto que “1\*\*1\*\*\*\*\*0\*\*\*” é de ordem 3.

O comprimento definido (do inglês *defining length*) de um bloco é determinado pela distância entre a primeira e a última posição específica da cadeia [15]. O bloco “011\*1\*\*\*” possui um comprimento definido 4 porque a última posição específica é 5 e a primeira posição é 1, logo  $5 - 1 = 4$ . No caso particular de um bloco “0\*\*\*\*\*”, o comprimento definido é 0, pois a primeira e última posição específica neste caso é a mesma.

Os pontos neste espaço de dimensão 3 são cadeias ou conjunto de blocos de ordem 3. As linhas no espaços, são indicadas por cadeias de ordem 2 e finalmente os planos, com conjunto de blocos de ordem 1. O espaço completo é representado pelo bloco de ordem 0.

Todo cromossomo pertence a  $2^L - 1$  diferentes hiperplanos existentes no espaço de busca, neste caso  $L = 3$  (O Bloco de ordem 0 não é definido como uma partição do espaço [1]). Para o

espaço de busca completo, podem ser definidas  $3^L - 1$  partições de hyperplanos, onde para cada posição, pode-se assumir um dos elementos  $\{1; 0; *\}$ , totalizando  $3^L$  combinações.

Uma cadeia de bits pertence a um determinado conjunto de blocos quando se consegue chegar à esta cadeia a partir do conjunto de blocos substituindo-se o símbolo “\*” pelo bit determinado. De maneira geral, todas as cadeias de bits que pertencem a um conjunto de blocos específico estão contidas na partição do hyperplano representada por este conjunto de blocos.

Analisar cada cromossomo representante de um hyperplano no espaço de busca de maneira isolada não agrega muita informação. Devido à esse fato, é que a noção de população se torna uma característica importante para os Algoritmos Genéticos.

O paralelismo implícito se define do fato de que muitos hyperplanos são amostrados quando uma cadeia de bits é avaliada. Pode ser admitido que muito mais hyperplanos são amostrados que o número de cadeias contidas na população [1]. Muitos hyperplanos diferentes são avaliados de maneira implicitamente paralela a cada vez que uma simples cadeia é avaliada e o efeito acumulativo destas avaliações de pontos fornecem informações estatísticas sobre qualquer subconjunto de hyperplanos.

Se esse resultado de dimensão 3 for generalizado para espaços de dimensões maiores onde se deve abandonar o conceito geométrico e a noção tridimensional, os pontos, linhas e planos descritos pelo conjunto de blocos em três dimensões são generalizados para hyperplanos de ordens variadas no espaço n-dimensional.

## 2.11 Implementação

A figura 2.16 mostra uma implementação do algoritmo descrito pelo fluxograma da figura 2.1. No Capítulo 3 e 4 serão estudados as implementações detalhadas do algoritmo.

Os operadores genéticos são aplicados com probabilidade  $pc$  e  $pm$  para o *crossover* e *mutação* respectivamente. Isso significa que existe a possibilidade que um par de indivíduos selecionado não ser recombinado durante o ciclo.

O mecanismo de seleção e avaliação formam os elementos principais do algoritmo. Sem essas operações, o algoritmo se resume simplesmente a uma técnica aleatória de exploração do espaço de busca.

```

Criar População_Inicial Aleatoriamente;
População_Atual = População_Inicial;
Avaliar cada indivíduo da População_Atual;
Repita até que o Critério de fim seja satisfeito:
    Enquanto matriz_transição < Número_Indivíduos_desejado faça:
        Selecionar Indivíduos de População_Atual;
        Realizar Crossover com probabilidade pc;
        Realizar Mutação com probabilidade pm;
        Reinsrer descendentes em População_Atual;
        Avaliar componente de População_Atual;
Fim

```

Figura 2.16: Algoritmo do fluxograma da figura 2.1

## 2.12 Implementações paralelas

### 2.12.1 Migração

A migração é também uma característica do comportamento natural dos indivíduos, pois ocasionalmente pode haver uma migração de indivíduos para a população vizinha, seja por escassez de recursos naturais ou por superpopulação.

No modelo de migração tem-se diversas subpopulações que evoluem de forma independente uma das outras durante um certo tempo de isolamento [17] ou número de iterações. Alcançado este tempo de isolamento, um certo número de indivíduos “migra” de uma subpopulação para outra segundo um esquema de migração que limita a diversidade genética e troca de informações entre as subpopulações.

A implementação paralela do modelo de migração aumenta a eficiência computacional e reduz o número de avaliações necessárias se comparado com um algoritmo de uma população única [17]. Logo, mesmo para um computador monoprocessoado, o desempenho do algoritmo pode ser melhorado se implementado de forma paralela (pseudo paralelismo).

A seleção dos indivíduos a serem migrados pode ser aleatória ou através da avaliação. Para os esquemas de migração, existem diversas alternativas, entre elas:

- Topologia completa (irrestrita) – todas as subpopulações migram seus indivíduos entre si conforme a figura 2.17;

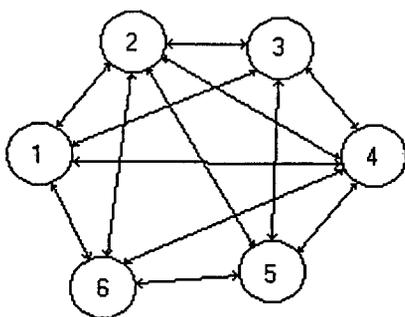


Figura 2.17: Migração completa

- Topologia em anel – migração somente entre as subpopulações interligadas (figura 2.18).

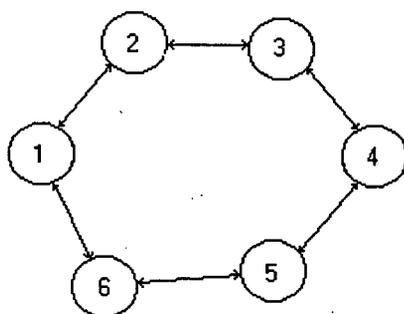


Figura 2.18: Migração em anel

- Topologia de migração por vizinhança (linear) – somente entre subpopulações vizinhas. No exemplo da figura 2.19, a subpopulação 3 poderá migrar para as subpopulações 2 e 4.

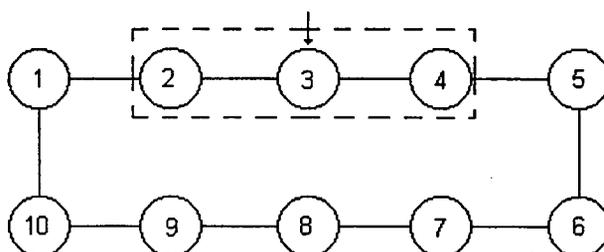


Figura 2.19: Migração por vizinhança (linear)

## 2.13 Conclusão

A flexibilidade da aplicação dos Algoritmos Genéticos e sua estrutura relativamente simples permite seu uso em diversas aplicações.

Este trabalho aplica a técnica no projeto de máquinas elétricas de corrente contínua através de uma função de avaliação que reúne os principais parâmetros da máquina. Muitas variações da técnica de reprodução apresentadas neste capítulo não serão implementadas neste trabalho devido ao tempo e também às inúmeras variações que podem ser aplicadas.

O capítulo seguinte apresenta um breve estudo sobre a máquina de corrente contínua e suas equações básicas. A recordação de algumas destas equações serão de extrema importância na modelagem da função de avaliação, que será vista no capítulo 3.

## 3. PROJETO DE MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA

### 3.1 Histórico

A máquina de corrente contínua foi um dos primeiros conversores eletromecânicos de energia [20] construídos. Baseada nos conceitos de indução eletromagnética formulados por Michael Faraday em 1831, as máquinas de corrente contínua foram muito utilizadas durante o século XX principalmente no período onde a corrente contínua era a principal forma de geração de energia elétrica.

Com advento da corrente alternada como padrão na Europa (50Hz) e nos Estados Unidos (60Hz) aliado a invenção do motor de indução a um custo de fabricação mais baixo, a máquina de corrente contínua perdeu sua importância e foi sendo substituída gradativamente pela máquina trifásica, exceto nas aplicações onde alguma característica exclusiva do motor cc (ex.: tração) justificava sua utilização [20].

O avanço da eletrônica de potência, possibilitou que as máquinas de indução invadissem ainda mais o espaço que antes era exclusivo das máquinas de corrente contínua. Entretanto, em aplicações com potência e tensões elevadas, os semicondutores empregados nos inversores para as máquinas de indução ainda tornam a substituição dos motores cc pelos motores ca mais onerosa que a simples reposição desse tipo de máquina.

Embora as máquinas de corrente contínua tenham sido consideradas como condenadas ao desuso nas últimas décadas, o fato é que ainda continuam sendo uma opção em algumas aplicações específicas como em projetos de laminadores, bobinadeiras e guas.

### 3.2 Características da Máquina de Corrente Contínua

A máquina de corrente contínua tem por característica uma ampla faixa de rotação, regulação e dinâmica. Pode praticamente trabalhar em diversas rotações através do ajuste da tensão de armadura ou excitação (enfraquecimento da armadura ou de campo) e sua velocidade se mantém estável na rotação determinada mesmo com variações de carga.

O alto conjugado do motor de corrente contínua na partida possibilita sua utilização em aplicações como tração (Motor de corrente contínua com enrolamento série), contudo, os conceitos apresentados neste trabalho estão restritos às máquinas de corrente contínua com enrolamento

independente, atualmente aplicados na indústria siderúrgica e de papel e celulose devido à sua facilidade de controle e ajuste de rotação.

A principal vantagem da máquina cc está em sua flexibilidade e versatilidade [21] e sua desvantagem reside em sua viabilidade econômica se comparada com outros tipos de máquinas, além da manutenção mais freqüente devido à utilização de escovas. É necessário observar no entanto, que o avanço tecnológico permitiu que as máquinas de corrente alternada atualmente tenham uma grande versatilidade e flexibilidade, características obtidas através do controle dos modernos inversores por um custo menor.

A teoria de funcionamento da máquina de corrente contínua pode ser encontrada em uma vasta bibliografia pois sua intensiva utilização originou diversos estudos e pesquisas no início do século XX [20,22]. As considerações feitas a seguir resumem as características da máquina, suas partes construtivas e o princípio de funcionamento eletromagnético do motor.

### 3.3 Aspectos Construtivos

As máquinas elétricas de uma maneira geral são padronizadas de acordo com a IEC (International Electrotechnical Commission) pela altura da ponta de eixo, isto é, a distância entre o centro do eixo até a extremidade inferior onde se apoia o motor (base).

A IEC estabelece alturas de eixo padrão, por exemplo 132mm, 160mm e 180mm. Esse padrão é mais utilizado no continente europeu enquanto que no continente americano, com exceção de alguns países latinos, é comum se utilizar o padrão NEMA (National Electric Manufacturers Association).

Os detalhes construtivos e dimensionais abordados neste trabalho estão relacionados com as máquinas de padrão IEC com altura 132mm com excitação independente e refrigeração forçada através de ventilador de corrente alternada independente.

Para fins didáticos, a máquina de corrente contínua pode ser dividida em duas partes distintas: a estática e a girante. A parte girante do motor de corrente contínua é constituída basicamente pelo rotor com os enrolamentos, eixo e comutador conforme mostrado na figura 3.1.

O rotor é composto de chapas de aço silício ranhuradas empilhadas na direção axial e são laminadas para se reduzir as perdas por correntes parasitas [23]. Em potências elevadas, o rotor possui um sistema de refrigeração radial com canais dispostos ao longo do pacote de chapas do rotor.

As chapas do rotor são prensadas por dois anéis que são presos ao eixo e podem ser fixadas ao longo do comprimento do eixo através da chaveta ou pelo processo de interferência. O disco balanceador é fixado no eixo a uma pequena distância do anel dianteiro.

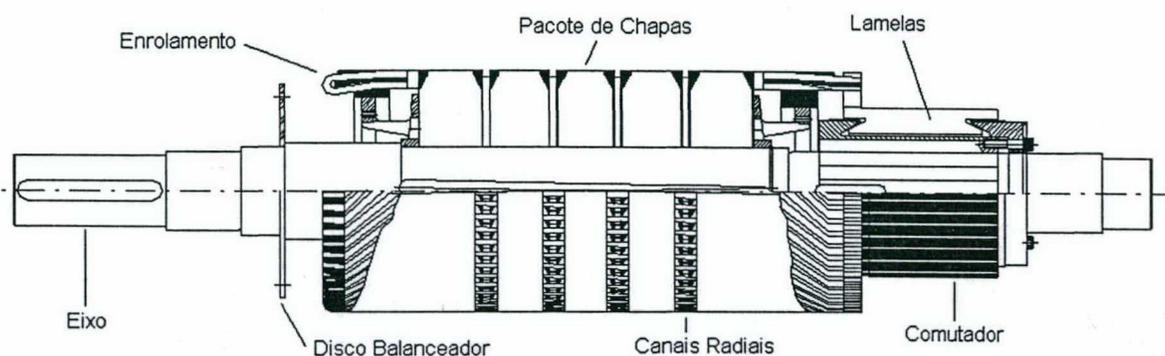


Figura 3.1: Rotor do motor de corrente contínua

As chapas do rotor possuem canais axiais de ventilação e são distribuídas de maneira a se obter uma maior eficiência na ventilação sem comprometer a indução nas regiões entre os canais conforme mostra a figura 3.3. O eixo geralmente é composto de aço maciço e nos motores de potência elevada, por ele pode existir circulação de correntes induzidas pela espira formada pelos enrolamentos em série com as bobinas do rotor.

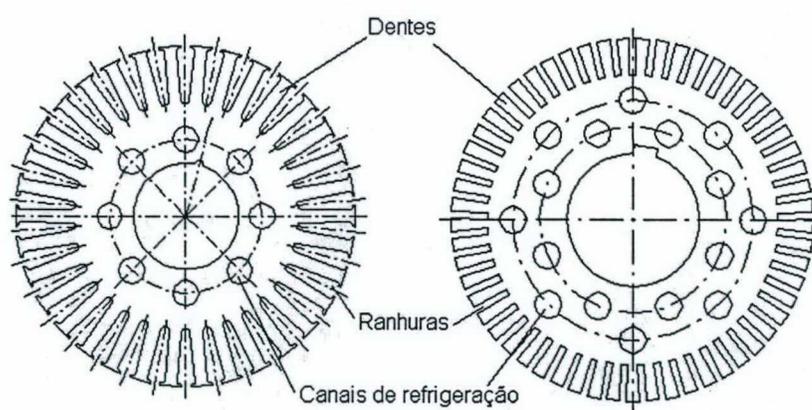


Figura 3.2: Detalhes da chapa do rotor (para fio circular e retangular)

Eventualmente, o pacote de chapas pode se apresentar com as ranhuras inclinadas (através da chaveta do eixo) para se evitar o efeito de ruído magnético no motor.

O rotor da máquina cc desempenha quatro funções [24] principais:

- Realiza a ação motora mecânica através da rotação;

- Permite o chaveamento necessário para a comutação através da rotação;
- Aloja os condutores responsáveis pelo torque eletromagnético;
- Providencia uma faixa de baixa relutância para o fluxo.

A qualidade do aço utilizado nas chapas do rotor influencia no projeto em consideração às perdas por histerese. O enrolamento do rotor é constituído de condutores isolados de forma retangular ou circular, este é utilizado geralmente em máquinas de baixa potência enquanto aquele se destina a máquinas maiores, geralmente com altura de ponta de eixo superior a 180mm. Os condutores estão interligados às barras do comutador através de chapas de cobre ou são soldados nas próprias barras.

O comutador é responsável pela transferência de energia para o enrolamento do rotor (enrolamento da armadura) e é composto por barras de cobre isoladas do eixo e entre si, geralmente por mica. Seu diâmetro depende do número de lamelas e de suas respectivas dimensões. Pela superfície do comutador, apoiam-se escovas de carvão que fazem o contato elétrico.

As considerações de projeto para o comutador vão além da simples função de suporte elétrico para os enrolamentos, devem ser estudadas também as perdas com a queda de tensão e atrito das escovas e sua velocidade periférica, bem como a superfície necessária para dissipação térmica devido às perdas.

A parte fixa do motor é composta pela carcaça ou estator, porta-escovas, pólos e enrolamentos. O Estator ou carcaça é composto por chapas segmentadas e laminadas prensadas em suas extremidades pelas tampas dianteira e traseira conforme a figura 3.3.

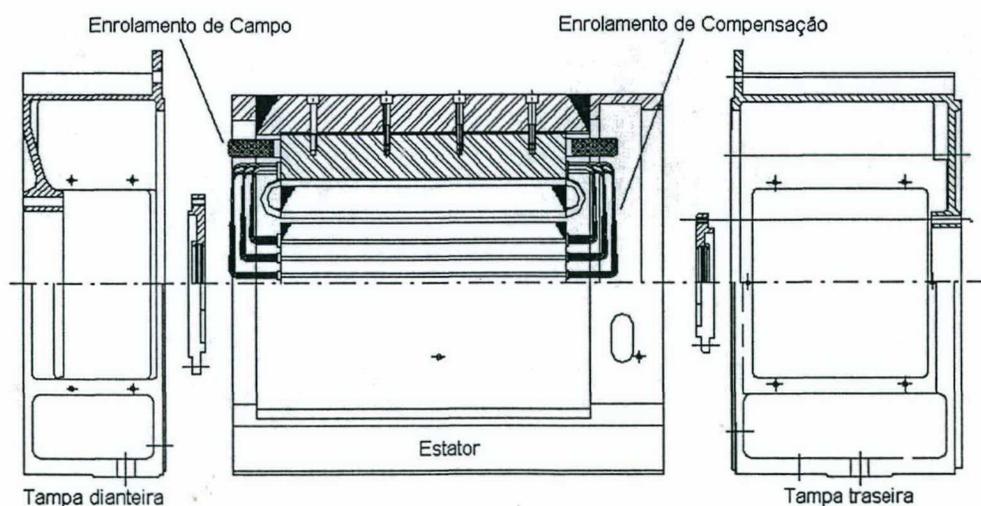


Figura 3.3: Estator de chapas laminadas

Algumas máquinas de baixa potência apresentam o estator de aço maciço e podem obedecer a uma geometria circular, entretanto, as máquinas mais modernas utilizam a carcaça com as chapas laminadas e uma geometria octogonal onde se obtém um maior espaço interno para acomodação dos enrolamentos e uma menor perda no ferro.

Além de suporte mecânico, a carcaça também é responsável pelo retorno do fluxo para o circuito magnético criado pelos pólos [24].

O núcleo do pólo de excitação é constituído de chapas de aço laminadas e envolto pelo enrolamento de excitação, responsável pela geração do fluxo principal. Algumas máquinas podem ter ranhuras nas extremidades do pólo de excitação para acomodação das espiras de compensação. A sapata polar neste pólo é expandida de forma a espalhar o fluxo mais uniformemente pelo rotor como pode ser observado na figura 3.4.

Os pólos de comutação ou auxiliares também são compostos por chapas de aço laminadas envolvidas pelo enrolamento de comutação (interligado em série com o enrolamento da armadura). O objetivo deste pólo é compensar o efeito de reação da armadura na região interpolar como será visto nas seções seguintes.

O enrolamento de compensação é opcional [24] e nas máquinas de baixa potência está ausente devido ao custo. Está localizado sob os pólos principais e seu objetivo é compensar o efeito de reação da armadura em toda periferia do rotor.

Os pólos de excitação e comutação geralmente são parafusados enquanto que o estator é soldado nos lados, quando não é maciço. Os pólos são fixados no estator através de parafusos.

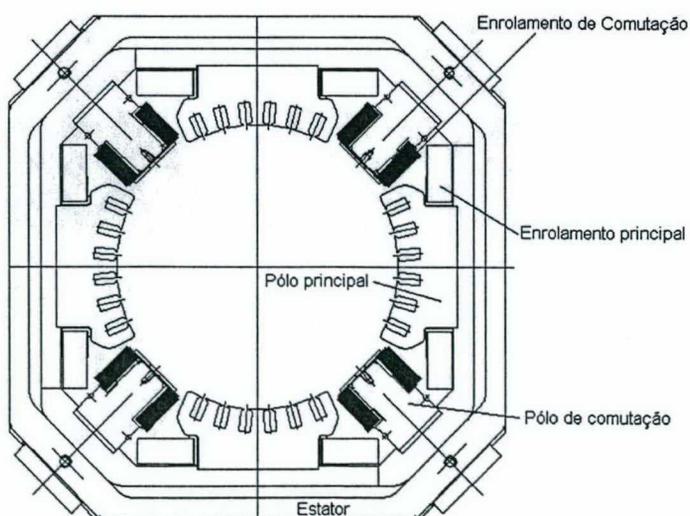


Figura 3.4: Corte Longitudinal do estator

Os porta-escovas são fixados numa régua situada paralelamente ao comutador e servem de suporte para as escovas. Através de molas, os porta-escovas mantêm as escovas com uma pressão constante sobre as lamelas do comutador.

As régulas suporte dos porta-escovas são presas à um anel e devem ser equidistantes e dispostas simetricamente ao longo da periferia do comutador (em quadratura), conforme mostra a figura 3.5 para uma máquina com 4 pólos.

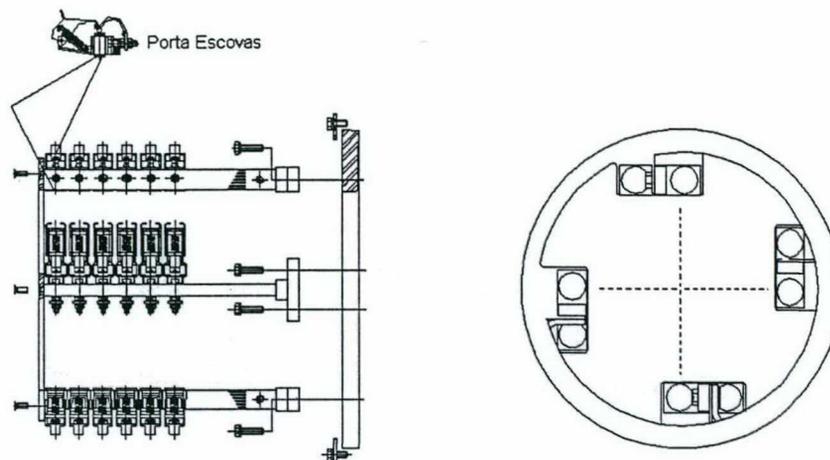


Figura 3.5: Régulas de suporte do porta escova e anel

A diferença de pressão entre as escovas pode originar uma assimetria nas correntes levando a máquina a uma comutação insatisfatória. De maneira ideal, as correntes deveriam ser distribuídas igualmente entre as escovas, entretanto, na prática, se aceita uma variação de até 10% entre as correntes, sem um prejuízo significativo para a comutação.

## 3.4 Princípios de funcionamento

### 3.4.1 Dados Característicos

O dimensionamento do motor cc exige o conhecimento da carga bem como o acionamento existente ou previsto. Para se desenvolver o projeto da máquina é necessário se observar os seguintes dados característicos:

- Potência Nominal;
- Rotação Nominal e Máxima;
- Elevação de temperatura;
- Tipo de refrigeração;
- Tensão de armadura e excitação;

- Regime de serviço;

A potência nominal, as rotações e o regime de serviço estão relacionados diretamente com as necessidades da aplicação, enquanto que as tensões, elevação de temperatura e refrigeração estão relacionadas ao acionamento e ao ambiente.

A elevação de temperatura de uma máquina elétrica está relacionada com a sua classe de isolamento. A norma NBR 5116 define as classes de isolamento e seus respectivos limites de temperatura.

Classe de isolamento	A	E	B	F	H
Temperatura [ °C ]	105	120	130	155	180

Tabela 3.1: Classes de isolamento e respectivas elevações de temperatura

Embora a elevação de temperatura seja padronizada, na prática é difícil de se medir a temperatura dos enrolamentos do motor pois esta varia ao longo de seu comprimento de ponto para ponto. O método mais utilizado para se obter a temperatura dos enrolamentos é através da variação de resistência dos condutores, isto é, uma comparação da resistência a frio e a quente (temperatura após o motor estar estabilizado termicamente).

O tipo de refrigeração do motor interfere diretamente em seu dimensionamento. Em termos práticos, existem os seguintes tipos de motor segundo sua refrigeração:

- Fechado (sem refrigeração);
- Ventilação forçada (ventilador independente);
- Dutos;
- Fechado com trocador de calor ar-ar;
- Fechado com trocador de calor ar-água;
- Auto-ventilado;
- Fechado com ventilação no eixo;

Os motores fechados, com ou sem ventilação, são aplicados geralmente em ambientes poluídos, isto é, com presença de partículas suspensas prejudiciais ao funcionamento do motor, entretanto deve-se considerar a disponibilidade de tensão para alimentação dos motores da ventilação e também da água, no caso do trocador de calor ar-água. Os motores fechados são aplicados em indústrias siderúrgicas e guias em ambientes marinizados como portos e navios.

O regime de serviço de um motor varia de acordo com sua aplicação, contudo, o aspecto mais importante que se deve estudar neste caso é a máxima sobrecarga dentro do ciclo de trabalho e a potência equivalente em regime contínuo. São nestas condições térmicas que o motor deve ser projetado e considerado.

### 3.4.2 Considerações Gerais

O motor de corrente contínua apresenta características construtivas similares as do gerador de corrente contínua (dínamo), diferindo somente pela forma de aplicação [25]. Assim, as abordagens realizadas para a análise do motor cc também serão válidas para os geradores cc e vice-versa.

O motor de corrente contínua é baseado nas forças resultantes da interação entre o campo principal e a corrente que circula nos condutores da armadura. A figura 3.6 mostra o comportamento de uma espira percorrida por uma corrente  $i$ , sendo cortado um fluxo  $\phi$  gerando uma força cuja direção é determinada pela regra da mão direita.

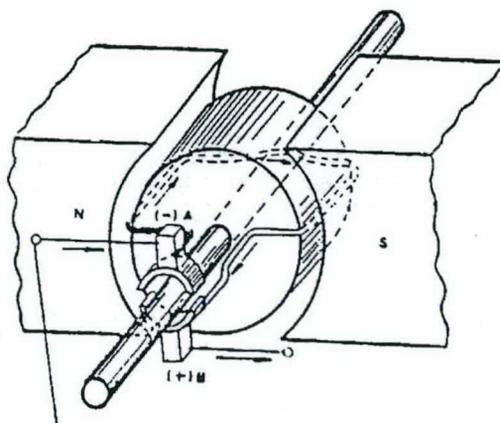


Figura 3.6: Esquema de funcionamento da máquina cc

Na posição perpendicular a A-B, a corrente no condutor é invertida para que as forças resultantes sob a espira estejam numa única direção conforme o sentido de giro do motor. Essa inversão de corrente é obtida através do comutador que provê a inversão dos terminais que fazem o contato com as escovas.

Num motor real, várias espiras sob o efeito mencionado são alocadas geometricamente defasadas num cilindro ranhurado (ou rotor) imerso em um campo magnético. Assim, a força resultante será a somatória de forças produzidas por cada espira do rotor.

No funcionamento como gerador, ao se aplicar uma força que gire o eixo da máquina a uma rotação  $\omega$ , produz-se através da interação do movimento do condutor com o fluxo uma tensão induzida nos terminais da espira. No caso de um par de polos, a cada volta da espira, obtém-se um ciclo completo da tensão gerada. De maneira geral, para uma máquina com  $n$  polos, a frequência da tensão induzida  $e$  pode ser determinada por:

$$f = \frac{p^* n}{60} \text{ [ Hz ]} \quad (3.1)$$

Onde:

$p$ : Número de par de pólos

$n$ : Rotação em rpm

Considerando ainda a mesma espira em rotação da figura 3.6, pode-se descrever a variação do fluxo no tempo por:

$$\phi = \phi_n \cdot \cos(\omega.t) = B.A.\cos(\omega.t) \quad (3.2)$$

Onde:

$\phi$ : Fluxo instantâneo

$\phi_n$ : Fluxo nominal

$B$ : Indução em T

$A$ : Área

$\omega$ : Velocidade angular

Portanto o valor da tensão num instante  $t$  pode ser obtida através da expressão:

$$e = E_{\max} \cdot \text{sen}(\omega.t) \quad (3.3)$$

Onde:

$e$ : Tensão instantânea

$E_{\max}$ : Tensão máxima

Embora a onda descrita pela equação ( 3.3 ) tenha uma forma de onda senoidal, a inversão de polaridade dos terminais da espira através do comutador retifica a onda de maneira que, nos terminais de um rotor real, isto é, com diversas espiras, a forma de onda é praticamente contínua.

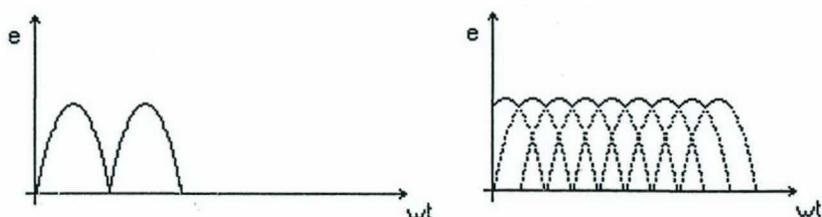


Figura 3.7: Forma de onda retificada para 1 espira e n espiras

O valor médio da tensão  $E_{med}$  nos terminais da escova num rotor com N condutores pode ser obtida pela seguinte equação:

$$E_{med} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} \omega \cdot N \cdot \phi \cdot \text{sen}(\omega t) d(\omega t) = \frac{2}{\pi} \cdot \omega \cdot N \cdot \phi \quad (3.4)$$

Onde:

$N$ : Número de espiras

$E_{med}$ : Tensão média

Substituindo-se na equação ( 3.4 ) a variável  $\omega$  em rad/s por  $n$  em rpm, para uma máquina com  $p$  pólos tem-se:

$$E_{med} = 2 \cdot p \cdot N \cdot \phi \cdot \frac{n}{60} \quad (3.5)$$

Logo, sendo  $a$  o número de circuitos paralelos do enrolamento da armadura:

$$N = \frac{Z_a}{2 \cdot a} \quad (3.6) \quad \text{e} \quad E_{med} = \frac{Z_a \cdot p \cdot \phi \cdot n}{a \cdot 60} \quad (3.7)$$

Onde:

$Z_a$ : número total de condutores da armadura

$a$ : número de par vias paralelas da armadura

Admitindo que  $C = \frac{Z_a \cdot p}{a \cdot 60}$ , pode-se reescrever a equação ( 3.7 ) como sendo:

$$E_{med} = C \cdot \phi \cdot n \quad (3.8)$$

Conclui-se portanto pela equação ( 3.8 ), que a tensão média induzida nos terminais da armadura é dependente do fluxo de excitação e da velocidade do rotor.

No caso de um motor, a tensão  $E$  é definida como a tensão  $U_z$  fornecida pelo conversor menos a queda de tensão provocada pela própria resistência do enrolamento, assim pode-se definir:

$$E = U_a - R_a \cdot I_a \quad (3.9)$$

Onde:

$U_a$ : Tensão de armadura

$R_a$ : Resistência da armadura

$I_a$ : Corrente da armadura

Assim, substituindo-se ( 3.9 ) em ( 3.8 ), para o motor tem-se a seguinte equação:

$$n = \frac{U_a - R_a I_a}{C \cdot \phi} \quad (3.10)$$

A equação ( 3.7 ) é a equação básica de projeto das máquinas de corrente contínua. Através dessa equação é possível analisar o comportamento da máquina em regime permanente e traçar as curvas características de conjugado e potência.

### 3.4.3 Curva de Conjugado e Potência

Observando a equação ( 3.10 ), é possível concluir que a rotação do motor pode ser alterada através da variação da tensão da armadura ( $U_a$ ) com o campo constante ou pela variação do fluxo ( $\phi$ ), com tensão de armadura constante.

O comportamento das curvas de conjugado e potência pode ser observado pela figura 3.8. Na variação da tensão da armadura com excitação constante, o torque da máquina permanece constante desde a rotação mínima até a nominal (linha contínua) e a potência aumenta proporcionalmente à rotação (linha pontilhada).

Na faixa de controle pelo campo, também conhecido como enfraquecimento de campo, a potência permanece constante enquanto o torque é reduzido de maneira inversamente proporcional à rotação.

Uma análise apurada da equação ( 3.9 ) permite observar que no caso da ausência de fluxo com o motor em funcionamento, a rotação da máquina tende ao infinito, portanto, é necessário que haja uma previsão de segurança para o desarme do sistema em caso de falha na alimentação do enrolamento principal, pois na prática, o motor tende a disparar sua velocidade além de seu limite mecânico na ausência de excitação.

É importante observar pelo gráfico da figura 3.8 que o motor pode trabalhar em qualquer faixa de rotação variando a tensão da armadura até a nominal e então reduzindo a tensão de campo até a rotação máxima.

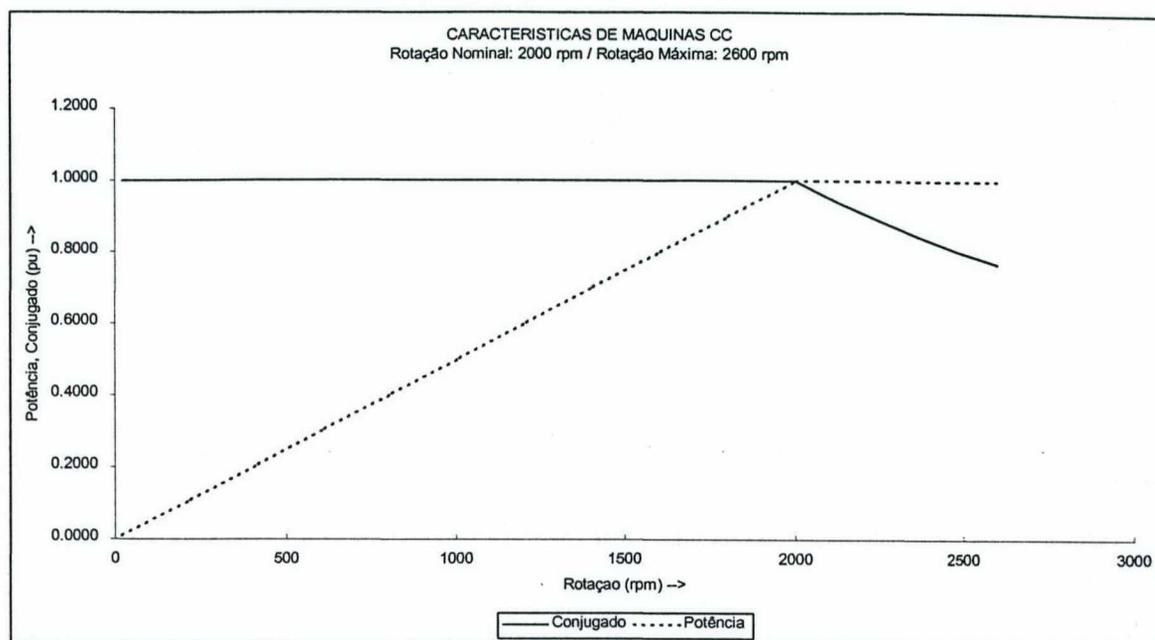


Figura 3.8: Curva de Conjugado e Potência

#### 3.4.4 O efeito de reação da armadura

Para analisar o efeito de reação da armadura, pode-se recorrer ao princípio da sobreposição analisando-se o campo principal da máquina de maneira independente daquele gerado pelos condutores da armadura [23].



Figura 3.9a: Campo em vazio

3.9b: Campo Magnético gerado pela armadura

A figura 3.9a mostra o fluxo principal de uma máquina com funcionamento a vazio. Neste caso o fluxo é simétrico ao eixo dos polos e existe somente a força magnetomotriz relativa ao campo principal atuando sobre o rotor.

Na figura 3.9b, o campo é produzido pela corrente que circula pelos condutores da armadura, estando as escovas na linha neutra geométrica e a máquina sem excitação. Nesta configuração, o campo gerado pelas espiras formam de dois pólos distintos sob os pólos principais.

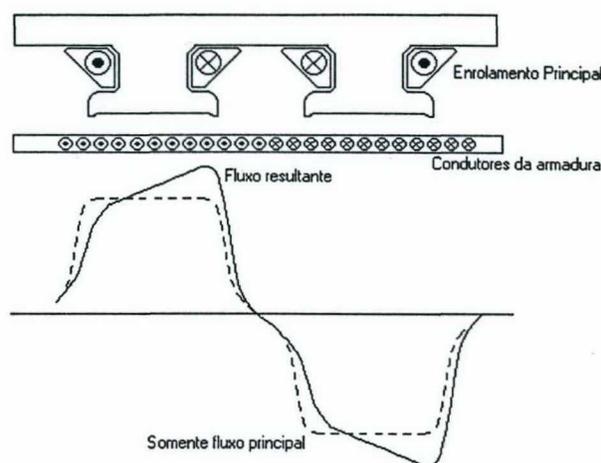


Figura 3.10: Distribuição espacial do fluxo principal

Numa máquina em carga, o fluxo magnético é aquele resultante do fluxo principal e o produzido pelos condutores da armadura. A força magnetomotriz induzida pela armadura sobre a força magnetomotriz principal é denominada reação da armadura e possui uma influência significativa sobre a distribuição espacial do fluxo no entreferro como pode ser observado na figura 3.10.

O efeito de reação da armadura pode ser compensado através do enrolamento de compensação, alocado na periferia da sapata polar do pólo principal conforme demonstrado na figura 3.4 na região coberta pelo fluxo principal. O enrolamento, interligado em série com o enrolamento do rotor, gera um fluxo oposto ao provocado pela reação da armadura, reduzindo assim o efeito da reação sob a distribuição espacial do fluxo.

O enrolamento de comutação é responsável por possibilitar o reposicionamento das escovas na posição neutra geométrica através da geração de um fluxo auxiliar contrário e de mesma intensidade do provocado para a distorção do campo principal, reduzindo assim a reação de armadura na região interpolar (entre os pólos principais).

#### 3.4.5 Comutação

A comutação é o conjunto de fenômenos relacionados com a variação de corrente nos condutores da armadura [23] quando são curto-circuitados pelas escovas. Uma boa comutação é usualmente caracterizada pela ausência de faíscas durante a passagem da escova de uma lamela para outra.

Pela figura 3.6 e pela equação ( 3.3 ) pode-se concluir que o fluxo que atravessa uma espira é máximo quando a espira está num plano perpendicular ao campo gerado e nesta posição, a tensão gerada nos terminais da espira é nula. Esta posição é denominada de zona neutra e é nesta posição que as escovas devem estar colocadas a fim de se evitar faíscas na comutação pois nesta posição, teoricamente não há corrente.

O faiscamento na comutação produz o enegrecimento, corrosão e desgaste destrutivo do comutador e das escovas [21]. As faíscas durante o processo de comutação, podem ter origem elétrica ou mecânica, esta devido à ovalização e defeitos na superfície de arraste das escovas e aquela devido ao desajuste da zona neutra ou assimetria magnética de ordem prática construtiva. Muitos estudos foram realizados para a melhorar a comutação das máquinas de corrente contínua, principalmente técnicas para se minimizar a tensão de reatância [26-28].

### 3.5 Especificação eletromagnética da Máquina de corrente contínua

#### 3.5.1 *Análise eletromagnética*

A análise do projeto eletromagnético da máquina considera a geometria e a qualidade das chapas de aço que são empregadas em sua construção.

As perdas no ferro constituem em certas ocasiões uma das principais fontes de perdas da máquina além das perdas Joule nos enrolamentos, fato pelo qual, existe uma preocupação especial na qualidade das chapas de aço e em sua laminação para redução das perdas parasitas.

Um ponto importante dentro do contexto do projeto magnético da máquina é a análise do fluxo e do comportamento das induções nas diversas partes do circuito. Atualmente, a análise mais comum é realizada através do método de elementos finitos.

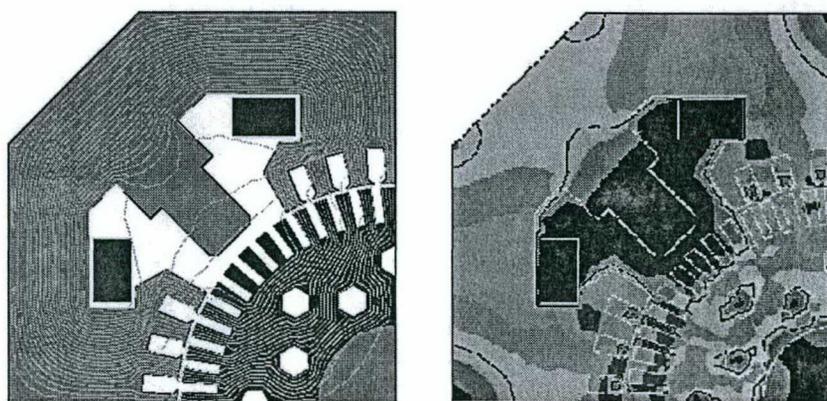


Figura 3.11: Análise por elementos finitos

A figura 3.11 ilustra o comportamento do fluxo em um quarto de um motor de corrente contínua de quatro pólos analisado através do método de elementos finitos. A análise deste primei-

ro quadrante é suficiente para uma conclusão a respeito dos fluxos e induções, pois os demais quadrantes são similares a este primeiro.

A figura da esquerda ilustra as linhas de fluxo geradas pelo enrolamento principal da máquina, enquanto que a figura da direita ilustra, através de diferentes de tonalidades, o valor das induções nas diversas regiões da máquina.

A análise do projeto através deste método possibilita estudar a saturação magnética da máquina, ou seja, verificar quais pontos possuem uma indução muito elevada que poderia causar um distúrbio no comportamento do motor.

### 3.5.2 Considerações para o cálculo das grandezas elétricas

Será admitido para os cálculos das grandezas elétricas, um motor hipotético, cuja geometria está pré-definida dentro dos parâmetros reais de construção.

O estator será constituído de chapas laminadas juntamente com os pólos principais e auxiliares (comutação). A chapa do rotor será considerada como sendo aço silício laminada com fator de empacotamento  $k_{FE} = 0.97$ , que significa que o comprimento real após a prensagem é de 97% do comprimento calculado pela multiplicação do número de chapas pela sua espessura.

### 3.5.3 Cálculo das grandezas do enrolamento principal

Como o enrolamento principal da máquina de corrente contínua de excitação independente é separado dos demais enrolamentos, pode-se iniciar o projeto da máquina através da estimativa do fluxo e elevação de temperatura deste enrolamento.

A resistência do enrolamento de excitação corrigida para a temperatura de trabalho pode ser calculada por:

$$R_{exc} = \frac{l_{total}}{58 * A_{exc} * ppe^2} * \left( \frac{255 + \Delta T_{exc}}{255} \right) [\Omega] \quad (3.11)$$

Onde:

$R_{exc}$ : Resistência do enrolamento

$A_{exc}$ : Seção transversal do condutor do enrolamento

$ppe$ : Número de pólos em paralelo

$l_{total}$ : Comprimento total do enrolamento

$\Delta T_{exc}$ : Elevação de temperatura do enrolamento

Assim, a densidade de corrente de excitação  $S_{exc}$  é determinada por:

$$J_{exc} = \frac{U_{exc}}{R_{exc} * A_{exc} * ppe} \text{ [ A / mm}^2 \text{ ]} \quad (3.12)$$

Onde:

$J_{exc}$ : Densidade de corrente no condutor

$U_{exc}$ : Tensão de excitação

Determinado o diâmetro do condutor do enrolamento independente da excitação segundo a temperatura alcançada, pode se calcular a potência de excitação ( 3.13 ) e a F.M.M. - Força Magnetomotriz ( 3.14 ) gerada pelo enrolamento.

$$P_{exc} = I_{exc}^2 * R_{exc} \text{ [ W ]} \quad (3.13)$$

$$\theta_e = 2 * (\text{Espiras / Pólo}) * \frac{I_{exc}}{ppe} \text{ [ A.espiras ]} \quad (3.14)$$

Onde:

$P_{exc}$ : Potência de excitação

$I_{exc}$ : Corrente de excitação

$\theta_e$ : Força Magnetomotriz da excitação (f.m.m. excitação)

Espiras/Pólo: Número de espiras por pólo

### 3.5.4 Força Eletromotriz (f.e.m.)

Para o caso de uma máquina de corrente contínua funcionando como gerador, tem-se:

$$f.e.m = U_A - \Delta U \text{ [ V ]} \quad (3.15)$$

Onde:

$U_A$ : Tensão de armadura nominal

$\Delta U$ : Queda de tensão do circuito da armadura

Se a máquina funcionar como motor então tem-se:

$$f.e.m = U_A + \Delta U \text{ [ V ]} \quad (3.16)$$

E a queda de tensão do circuito da armadura é obtida através da equação:

$$\Delta U = I_A \cdot (R_{Aq} + R_{Cm}) + \Delta U_{Esc} \quad [ \text{ V } ] \quad (3.17)$$

Onde:

$R_{Aq}$ : Resistência quente do enrolamento da armadura

$R_{Cm}$ : Resistência quente do enrolamento da comutação

$I_A$ : Corrente de armadura

$\Delta U_{Esc}$ : Queda de tensão nas escovas

### 3.5.5 Cálculo da rotação nominal

A rotação nominal do motor de corrente contínua é determinada por:

$$n = \frac{(f.e.m.).a}{Z_a \cdot p \cdot \phi_A} \quad [ \text{ rpm } ] \quad (3.18)$$

Onde:

$p$ : Número de pares de pólos

$Z_A$ : Número total de condutores da armadura

$a$ : Número de circuitos paralelos na armadura

$\phi_A$ : Fluxo na armadura

### 3.5.6 Cálculo do número de escovas por suporte

O número de escovas a ser utilizado é obtido em função da corrente de armadura  $I_A$ . Assim, a equação ( 3.19 ) pode ser utilizada para se obter o número aproximado de escovas necessárias por suporte:

$$ns = \frac{I_A}{d_e \cdot p \cdot (ta) \cdot (ax)} \quad (3.19)$$

Onde:

$d_e$ : Densidade de corrente nominal da escova

$ta$ : Medida tangencial da escova

$ax$ : Medida axial da escova

O comprimento do comutador é proporcional ao número de escovas por suporte mais o espaço deixado livre para dissipação de calor no comutador.

A densidade de corrente admitida para as escovas das máquinas de altura de ponta de eixo inferior a 160mm é de aproximadamente 8.5 A/cm<sup>2</sup>.

A mesma equação ( 3.19 ) rearranjada pode ser utilizada para se prever a densidade de corrente da escova quando o motor opera em suas condições nominais:

$$d_e = \frac{I_A}{ns.p.(ta).(ax)} \quad (3.20)$$

### 3.5.7 Perdas do comutador

As perdas no comutador, conforme descrito na seção 3.3, são compostas pelas perdas mecânicas e elétricas. As perdas mecânicas se referem às perdas por atrito e podem ser determinadas por uma constante  $K_{mec}$  que inclui o coeficiente de atrito e a pressão das molas.

Assim, pode-se prever as perdas do comutador por:

$$P_{com} = \frac{P_{at} + \Delta U_{Esc} \cdot I_A}{A_{com}} \quad [ W / dm^2 ] \quad (3.21)$$

Onde:

$P_{com}$ : Perdas no comutador

$A_{com}$ : Área superficial do comutador

$P_{at}$ : Perdas mecânicas na escova

As perdas mecânicas na escova são obtidas em função da rotação que se deseja calcular as perdas, logo:

$$P_{at} = K_{mec} \cdot (ta) \cdot (ax) \cdot (2.p) \cdot (ns) \cdot v_p \quad [ W ] \quad (3.22)$$

Onde:

$v_p$ : Velocidade periférica do comutador

### 3.5.8 Determinação da tensão de reatância

Por definição, a tensão de reatância é responsável pelo aparecimento de faíscas durante o processo de comutação e pode ser calculado [20] pela equação ( 3.23 ).

$$e_r = L_R * \frac{di}{dt} \quad (3.23)$$

Onde:

$L_R$ : Coeficiente de auto-indução

Desenvolvendo-se a equação ( 3.23 ) e o coeficiente de Pichelmayer  $\xi$  a tensão de reatância pode ser calculada [23] por:

$$e_r = 2 * w_L * V_{AN} * AS * \xi * L_{id} \quad (3.24)$$

Onde:

$w_L$ : Número de espiras por lamela

$V_{AN}$ : Velocidade periférica da armadura

$L_{id}$ : Comprimento ideal da armadura

$\xi$ : Coeficiente de Pichelmayer

$AS$ : Carga Periférica da armadura

E a tensão de reatância máxima:

$$e_{m\acute{a}x} = e_r * \frac{I_{asob}}{I_a} * \frac{n_f}{n_n} \quad (3.25)$$

Onde:

$I_{asob}$ : Corrente de sobrecarga

### 3.5.9 Determinação da tensão entre lamelas

A tensão entre lamelas para as condições nominais da máquina é determinada pela equação 26.

$$e_L = \frac{U_a * 2 * p}{Z_L} \quad (3.26)$$

E a tensão máxima entre lamelas é obtida através da equação ( 3.27 ).

$$e_{Lm\acute{a}x} = e_L * \frac{B_{m\acute{a}x}}{B_L} \quad (3.27)$$

Onde:

$B_{m\acute{a}x}$ : Indução máxima no entreferro

$B_L$ : Indução no entreferro

### 3.5.10 *Rendimento*

O rendimento é calculado  $\eta_c$  através da potência útil e do somatório de perdas da máquina. Para um motor, o rendimento, por definição pode ser obtido através da equação ( 3.28 ).

$$\eta_c = \frac{P_{util}}{P_n} * 100 \quad (3.28)$$

Onde:

$$P_{util} = U_a * I_a - \sum Perdas \quad (3.29)$$

### 3.5.11 *Indução no entreferro*

A indução no entreferro é calculada baseado na sua seção magnética e no fluxo nominal gerado pelo pólo principal, assim:

$$B_{entreferro} = \frac{\phi_{ares}}{bp * L_{ideal}} \quad (3.30)$$

Onde:

$bp$ : Arco polar

$L_{id}$ : Comprimento ideal da armadura

### 3.5.12 *Indução nos dentes da armadura*

A indução nos dentes da armadura pode ser calculada pela equação ( 3.31 ).

$$B_{dente} = \frac{\phi_{ares} * D_a * \pi}{Z_a * N * bp * l_a * 0.97} \quad (3.31)$$

### 3.5.13 *Indução na armadura*

O cálculo da indução na coroa da armadura é realizado segundo a equação ( 3.32 ).

$$B_{carm} = \frac{\phi_a}{\left( D_a - \frac{4 * D_i}{3} - 20 * h_n \right) * l_a * 0.97} \quad (3.32)$$

Onde:

$D_a$ : Diâmetro externo da armadura

$D_i$ : Diâmetro interno da armadura

$h_n$ : Altura da ranhura

$l_a$ : Comprimento da armadura

### 3.5.14 Indução no pólo

A indução no pólo de excitação é calculado pela equação ( 3.33 ).

$$B_{\text{pólo}} = \frac{\phi_a}{b_{hp} * l_{id} * 0.98} \quad (3.33)$$

Onde:

$\phi_a$ : Fluxo na armadura em mWb

$B_{\text{pólo}}$ : Indução no pólo em T

$b_{hp}$ : Largura do pólo em mm

$l_{id}$ : Comprimento ideal da armadura em mm

## 3.6 Conclusão

Este capítulo fez uma breve introdução às equações básicas da máquina de corrente contínua mostrando seus principais aspectos. Estas equações serão úteis na especificação da função de avaliação. Embora as equações intermediárias ou secundárias (de menos importância) não sejam apresentadas neste capítulo, foram estudadas e consideradas neste trabalho. Estas equações de menos importância foram omitidas devido à sua simplicidade pouca influência para a função de avaliação.

No capítulo seguinte, será apresentado a forma de implementação das funções dos Algoritmos Genéticos utilizados neste trabalho. No capítulo 4, estas funções serão implementadas com base nas equações estudadas neste capítulo.

## 4. IMPLEMENTAÇÃO DAS FUNÇÕES DO ALGORITMO

As rotinas referentes ao fluxograma da figura 2.1 do primeiro capítulo serão detalhadas e implementadas em linguagem Matlab<sup>1</sup> neste capítulo. Como as rotinas implementadas são genéricas e independentes, tornam-se disponíveis para outras aplicações em que se queira empregar o método de Algoritmos Genéticos.

### 4.1 Função de Geração

A população inicial é gerada de forma aleatória. A função de geração da população pode ser observada na figura 4.1.

As variáveis de entrada são *numero\_individuos* e *comprimento* que representam respectivamente o número de indivíduos a ser gerado e o comprimento da cadeia de bits que representa cada um dos indivíduos. A função aleatória é propiciada pela função *rand* e pela variável *s* que recebe um número aleatório entre 0 e 1.

```
function geracao = generate( numero_individuos, comprimento )

for i = 1 : numero_individuos,
    for j = 1 : comprimento,
        s = rand(1);
        if s > 0.5,
            pop( i,j ) = 0;
        else
            pop( i,j ) = 1;
        end
    end
end

geracao = pop;

% End of function geracao
```

Figura 4.1: Função de geração da população

<sup>1</sup> Matlab versão 4.1

## 4.2 Função de Crossover

A função de crossover de pontos múltiplos pode ser observada na figura 4.2. As variáveis de entrada *indivíduo1* e *indivíduo2* se referem aos dois indivíduos a serem recombinaados. A variável *numero\_pontos* é o número de pontos do crossover e *prob* é a probabilidade (de 0 a 1) da recombinação ocorrer.

```
function recombinar = crossover( individuo1, individuo2, numero_pontos, prob )

temp = rand(1);
if temp < prob
    len = length( individuo1 );

    % Rotina para definicao dos pontos de crossover
    p = 0;
    for i = 1 : numero_pontos,
        pontos(i) = round( rand(1)*(len-p) + p );
        while or ( ( pontos(i)>(len-1) ), ( pontos(i)<1 ) )
            pontos(i) = round( rand(1)*(len-p) + p );
        end
        p = pontos(i);
    end

    % Xover
    for k = 1 : numero_pontos
        subpop1( 1:pontos(k)-1 )= individuo1( 1:pontos(k)-1 );
        subpop1( pontos(k):len )= individuo2( pontos(k):len );
        subpop2( 1:pontos(k)-1 )= individuo2( 1:pontos(k)-1 );
        subpop2( pontos(k):len )= individuo1( pontos(k):len );
        individuo1 = subpop1;
        individuo2 = subpop2;
    end
    recombinar(1,:) = individuo1;
    recombinar(2,:) = individuo2;
else
    recombinar(1,:) = individuo1;
    recombinar(2,:) = individuo2;
end
```

Figura 4.2: Função de crossover de pontos múltiplos

A rotina descrita na figura 4.2 pode ser dividida em duas partes distintas. A primeira tem a função de se escolher aleatoriamente os pontos em que os indivíduos serão recombinaados. A segunda parte realiza a operação de crossover segundo os pontos estabelecidos anteriormente.

### 4.3 Função de Mutação

A rotina de mutação tem como parâmetros de entrada a variável *individuo*, que se refere ao indivíduo em que se deseja realizar o processo de mutação, *mut\_pontos* que se refere ao número de pontos de mutação ( usualmente 1 ) e *mut\_prob* que é, assim como na rotina de crossover, a probabilidade de ocorrer a mutação.

```
function mutacao = mutation( individuo, mut_pontos, mut_prob )

l = length( individuo );
sorteio = rand(1);
if ( sorteio < mut_prob )
    for k = 1 : mut_pontos,
        pontos( k ) = round( rand(1)*(l-1) + 1 );
    end
    for k = 1 : mut_pontos,
        individuo( pontos( k ) ) = bitcmp( individuo( pontos( k ) ),1);
    end
end
mutacao = individuo;
```

Figura 4.3: Função de mutação

### 4.4 Funções de seleção

#### 4.4.1 Seleção da roleta

A técnica de seleção da roleta pode ser implementada conforme mostra a figura 4.4 e tem como único parâmetro de entrada a variável *Nota* que deve conter a matriz cujo elementos representem as notas das avaliações de cada um dos indivíduos.

A matriz *Nota* deve respeitar a posição de cada elemento pois a saída da função é a posição do indivíduo escolhido na matriz.

```
function selecao = selecionar( Nota )

soma = sum( Nota );
for k = 1 : size(Nota)
    rp( k ) = Nota(k)/soma;
end
ps = rand(1);
indice = rp( 1 );
if ps < indice
    selecao = 1;
else
```

```

for i = 2 : size(Nota)
    indice = indice + rp( i );
    if ps <= indice
        selecao = i;
        break;
    end
end
end
end

```

Figura 4.4: Rotina de seleção da roleta

#### 4.4.2 Método de seleção pelo Rank

No método de seleção pelo Rank, os indivíduos devem ter os espaços da roleta proporcionais às suas ordenações dentro da matriz de notas. A implementação deste método pode ser observada na figura 4.5.

```

function selrank = selecao_rank( nota )

[ notas, ordenado ] = sort( nota );
tamanho = size( nota, 2 );
vetor = 1:tamanho;

selrank = ordenado ( selecao( vetor( : ) ) );

```

Figura 4.5: Método de seleção pelo Rank

De maneira análoga ao método de seleção da roleta, a única variável de entrada é a matriz *Nota*. Assim que a função é chamada, o vetor de notas é ordenado e a proporção de seleção da roleta relativa a cada indivíduo é dividida segundo sua posição no rank (ordenado pela função *sort*). Em seguida, é chamada a função de sorteio pela roleta normal.

#### 4.4.3 Mudança de escala de maneira linear

Conforme explicado no primeiro capítulo, baseado nas proposições de Goldberg em [15], pode-se implementar a mudança de escala conforme a equação 1.1 da maneira mostrada pela figura 4.6.

```

function scale = scale( u, a, b )
scale = a*u+b;

```

Figura 4.6: Mudança de escala

Os parâmetros  $a$  e  $b$  podem ser calculados pelas funções mostradas na figura 4.7.

```

function prescale = prescale( umax, uavg, umin )
fmultiple = 2;
if umin > (fmultiple*uavg - umax)/(fmultiple - 1)
    delta = umax - uavg;
    a = (fmultiple - 1)*uavg/delta;
    b = uavg*(umax-fmultiple*uavg)/delta;
else
    delta = uavg - umin;
    a = uavg/delta;
    b = -umin*uavg/delta;
end
prescale( 1 ) = a;
prescale( 2 ) = b;

```

Figura 4.7: Função de pré escala

Os valores *umax*, *uavg* e *umin* são respectivamente o valor máximo, médio e mínimo das avaliações dos indivíduos da população a ser normalizada.

#### 4.5 Função de decodificação

A trecho correspondente à decodificação do cromossomo dentro das funções é mostrado pela figura 4.8, onde *fiohp*, *fioarm*, *cp*, *ZapN*, *ppe* e *La* são as variáveis que receberão os valores decodificados e *chrom* é o cromossomo codificado em número binário.

```

fiohp = bi2de( chrom( 7:11 ) ) + 1;
fioarm = bi2de( chrom( 12:16 ) ) + 1;
cp = bi2de( chrom( 17:17 ) ) + 1;
ZapN = ( bi2de( chrom( 1:6 ) ) + 5 ) * 2 * cp;
ppe = bi2de( chrom( 18:18 ) ) + 1;
La = bi2de( chrom( 19:21 ) ) + 1;

```

Figura 4.8: Decodificação do cromossomo

A função *bi2de* é uma função do *Matlab* que permite a conversão de números binários para decimais.

No próximo capítulo, as funções estudadas serão implementadas em conjunto com as equações estudadas no capítulo anterior, unindo-se então a aplicação de projetos de máquinas de corrente contínua com a teoria dos Algoritmos Genéticos.

## 5. IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO

A implementação do cálculo da máquina de corrente contínua com algoritmos genéticos pode ser realizada segundo as etapas descritas no fluxograma da figura 2.1 do segundo capítulo. De maneira mais detalhada, pode-se observar na figura 5.1 a construção do algoritmo.

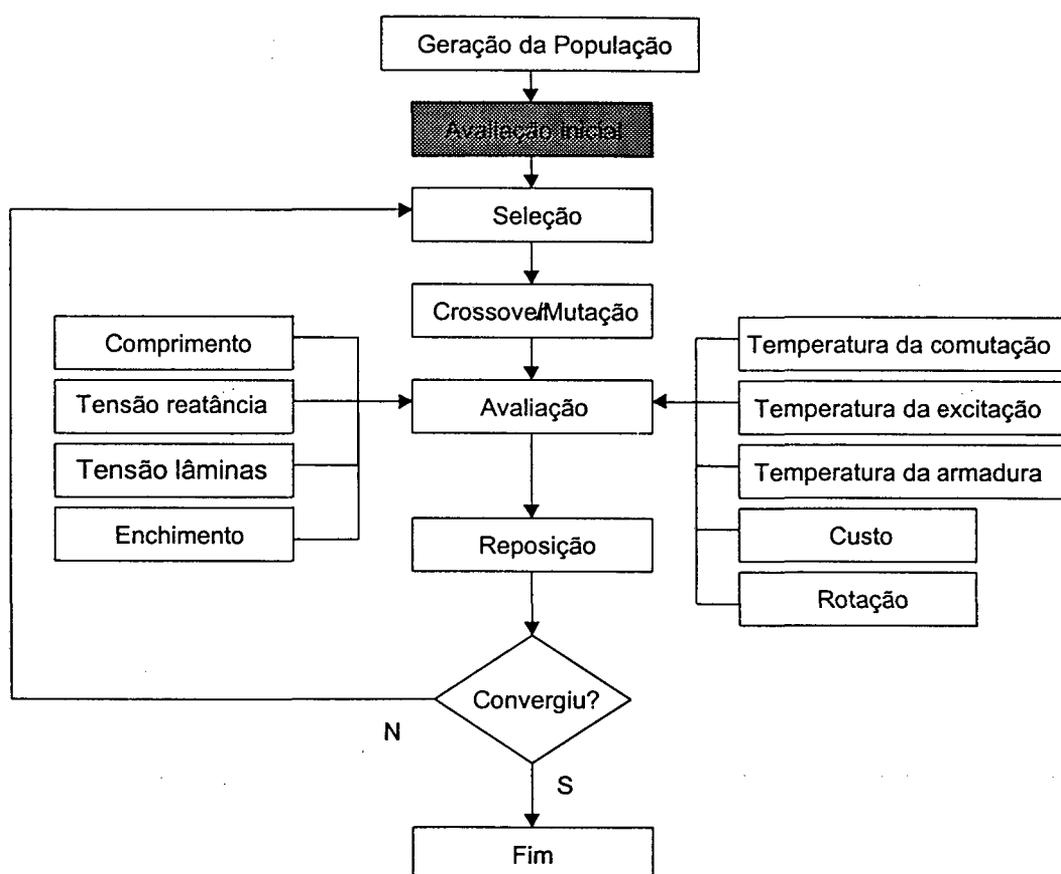


Figura 5.1: Fluxograma detalhado

As etapas a serem estudadas nas seções seguintes para se construir o algoritmo acima são:

- Codificação;
- Implementação da Função de avaliação;
- Método de Seleção;
- Recombinação (Crossover e Mutação);
- Elitismo (opcional);
- Saída dos dados e curvas.

## 5.1 Considerações

Para a especificação da máquina, é necessária a definição de determinados parâmetros para o projeto eletromagnético e mecânico do motor. Dentro deste contexto, tais parâmetros da máquina a ser calculada ficam estabelecidos conforme as definições abaixo.

- Número de lamelas ou segmentos do comutador  $Z_L = 136$ ;
- Número de ranhuras do rotor  $N = 34$ ;
- Número de pólos da máquina  $2 \cdot p = 4$ ;
- Altura da ponta de eixo: 132 mm ( Frame 132 segundo norma IEC );
- Entreferro principal  $\delta_e = 1.50 \text{ mm}$
- Entreferro do pólo de comutação  $\delta_c = 3.1 \text{ mm}$
- Largura do pólo principal  $B_{hp} = 38 \text{ mm}$
- Largura do pólo auxiliar  $B_{wp} = 24 \text{ mm}$
- Diâmetro da armadura:  $D_a = 160 \text{ mm}$
- Largura tangencial da escova:  $t = 12.5 \text{ cm}$
- Comprimento axial da escova:  $a_x = 20 \text{ cm}$
- Diâmetro do comutador:  $D_k = 125 \text{ mm}$
- Queda de tensão nas escovas:  $\Delta U_{esc} = 2.0 \text{ V}$
- Área disponível para enchimento da ranhura:  $S_{ranhura} = 80 \text{ mm}^2$

Para as características da máquina a ser calculada, é necessário especificar os seguintes dados:

- Potência nominal  $P_N$  em kW;
- Tensão de armadura  $U_a$  em Volts;
- Tensão de excitação  $U_e$  em Volts;
- Rotação nominal  $n_N$  em rpm;
- Rotação máxima em rpm;

A configuração da excitação da máquina é independente com entreferro fixo, sem enrolamento de compensação e a potência nominal é dada no regime contínuo.

A elevação de temperatura padrão para esta máquina é de 105 graus Celsius na armadura e nos pólos considerando a máquina com refrigeração independente forçada através de ventilador de corrente alternada externo.

O Cálculo assume a temperatura ambiente máxima de 40 graus Celsius e uma altitude de 1000 m acima do nível do mar.

A geometria do estator e rotor da máquina pode ser definida conforme a figura 5.2.

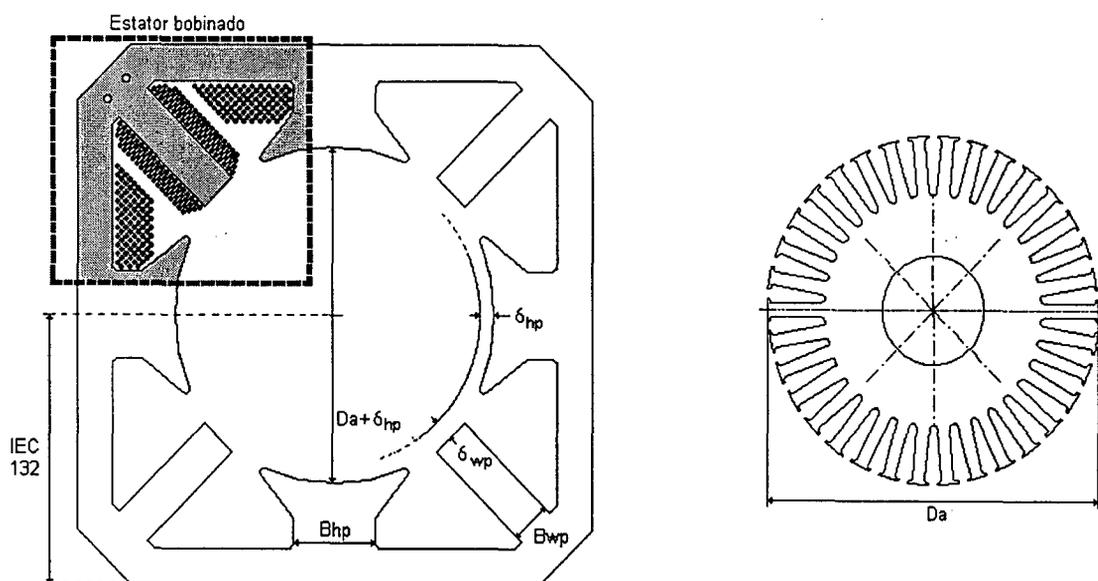


Figura 5.2: Geometria da máquina 132

## 5.2 Codificação

Os parâmetros da máquina são codificados por números binários. Para a cada parâmetro de busca do algoritmo é atribuído um conjunto de números binários. Neste caso, os parâmetros do motor a ser codificado são representados pelas seguintes variáveis:

- **Za:** Número total de condutores da armadura por ranhura;
- **FioA:** Diâmetro do fio nú da armadura;
- **Cp:** Número de fios paralelos na armadura;
- **Fiohp:** Diâmetro do fio da excitação;
- **Ppe:** Número pólos paralelos na excitação;

- *La*: Comprimento da armadura;

O número de bits de cada parâmetro é dependente da amplitude do intervalo que o parâmetro pode admitir e também a sua precisão, conforme a tabela 5.1.

Parâmetro	Valor mínimo	Valor máximo	Número de bits
<i>Zan</i>	20	148	6
<i>FioA</i>	1	32	5
<i>Cp</i>	1	2	1
<i>Fiohp</i>	1	19	5
<i>Ppe</i>	1	2	1
<i>La</i>	1	5	3

Tabela 5.1: Codificação dos parâmetros de busca

O número de condutores por ranhura *Zan* admite somente números pares quando o número de condutores paralelos *Cp* for igual a 1. No caso de *Cp* igual a 2, *Zan* admite somente números múltiplos de 4. Assim, o número de bits necessários para a representação de *Zan* é somente 6 bits que resultam num intervalo com 64 valores pares do intervalo [ 20; 148 ].

O diâmetro do condutor de cobre nú (sem revestimento) da armadura *FioA* em milímetros está codificado segundo a tabela 5.2.

Cód.	Diâmetro mm						
01	0.850	09	1.320	17	2.120	25	3.317
02	0.900	10	1.400	18	2.240	26	3.469
03	0.950	11	1.500	19	2.360	27	3.691
04	1.000	12	1.600	20	2.500	28	3.925
05	1.060	13	1.700	21	2.650	29	4.428
06	1.120	14	1.800	22	2.800	30	4.679
07	1.180	15	1.900	23	3.000	31	4.957
08	1.250	16	2.000	24	3.119	32	5.268

Tabela 5.2: Codificação dos condutores da armadura

O diâmetro do fio da excitação *Fiohp* em milímetros e o respectivo número de espiras da bobina estão codificados segundo a tabela 5.3.

Cód.	Diâmetro /Espiras						
01	0.280/5400	06	0.500/1850	11	0.800/0750	16	1.060/0440
02	0.315/4300	07	0.560/1510	12	0.850/0650	17	1.120/0390
03	0.255/3500	08	0.630/1200	13	0.900/0600	18	1.180/0350
04	0.400/2900	09	0.710/0950	14	0.950/0540	19	1.250/0320
05	0.450/2300	10	0.750/0850	15	1.000/0490		

Tabela 5.3: Codificação do condutor e número de espiras da excitação

O número de espiras do enrolamento de excitação está relacionado com o diâmetro do condutor devido à área disponível para alocação da bobina e uma melhor noção do cálculo térmico da máquina.

Uma escolha aleatória do número de espiras dificultaria o dimensionamento térmico deste pólo que considera, além da passagem de ar pela bobina, a densidade de corrente que por ela circula (ambos dependentes do diâmetro do condutor).

As induções, embora importantes, podem ser desconsideradas neste caso, pois para a faixa de tensão usual na excitação ( 110 – 400 V ), a combinação das espiras da excitação com o respectivo diâmetro, garantem a não saturação magnética do pólo para as combinações existentes na tabela 5.3.

O cálculo das induções será realizado ao final, após o motor já estar especificado, somente para efeito de apresentação dos resultados.

Os condutores da comutação também relacionam o número de espiras com o diâmetro do condutor a ser utilizado na comutação conforme mostra a tabela 5.4.

Cód.	Diâm.	Esp.									
1	0.850	630	9	1.320	295	17	2.120	118	25	3.317	042
2	0.900	570	10	1.400	266	18	2.240	106	26	3.469	036
3	0.950	515	11	1.500	230	19	2.360	096	27	3.691	032
4	1.000	465	12	1.600	204	20	2.500	085	28	3.925	028
5	1.060	410	13	1.700	182	21	2.650	075	29	4.428	025
6	1.120	370	14	1.800	160	22	2.800	069	30	4.679	022
7	1.180	336	15	1.900	146	23	3.000	060	31	4.957	019
8	1.250	300	16	2.000	130	24	3.119	047	32	5.268	016

Tabela 5.4: Codificação dos condutores da comutação

O comprimento da armadura está codificado conforme a tabela abaixo.

Código	Comprimento em [ mm ]
1	90
2	130
3	180
4	240
5	320

Tabela 5.5: Codificação do comprimento da armadura

De forma semelhante a excitação, valores aleatórios do comprimento da armadura, variando de 130 a 320 mm implicariam uma pior qualidade na estimativa dos parâmetros térmicos e elétricos como elevação de temperatura dos enrolamentos e tensão de reatância da máquina. Ao relacionar somente 5 comprimentos considerados padrão, além da facilidade do projeto em termos mecânicos, a precisão e confiabilidade dos parâmetros térmicos e magnéticos aumentam.

### 5.3 Implementação da função de avaliação

A função de avaliação é composta de diversas subfunções, cada uma avaliando diferentes parâmetros da máquina. Os principais aspectos a serem monitorados no projeto são:

- Elevação de temperatura no enrolamento de excitação (pólo principal);
- Elevação de temperatura no enrolamento de comutação (pólo auxiliar);
- Elevação de temperatura no enrolamento da armadura;
- Enchimento dos condutores da armadura;
- Tensão de reatância e entre segmentos do comutador;
- Custo (peso) da máquina;
- Rotação nominal;
- Comprimento do rotor.

O bloco “Avaliação da população” do fluxograma da figura 5.1 pode ser expandido de maneira mais detalhada conforme mostra a figura 5.3.

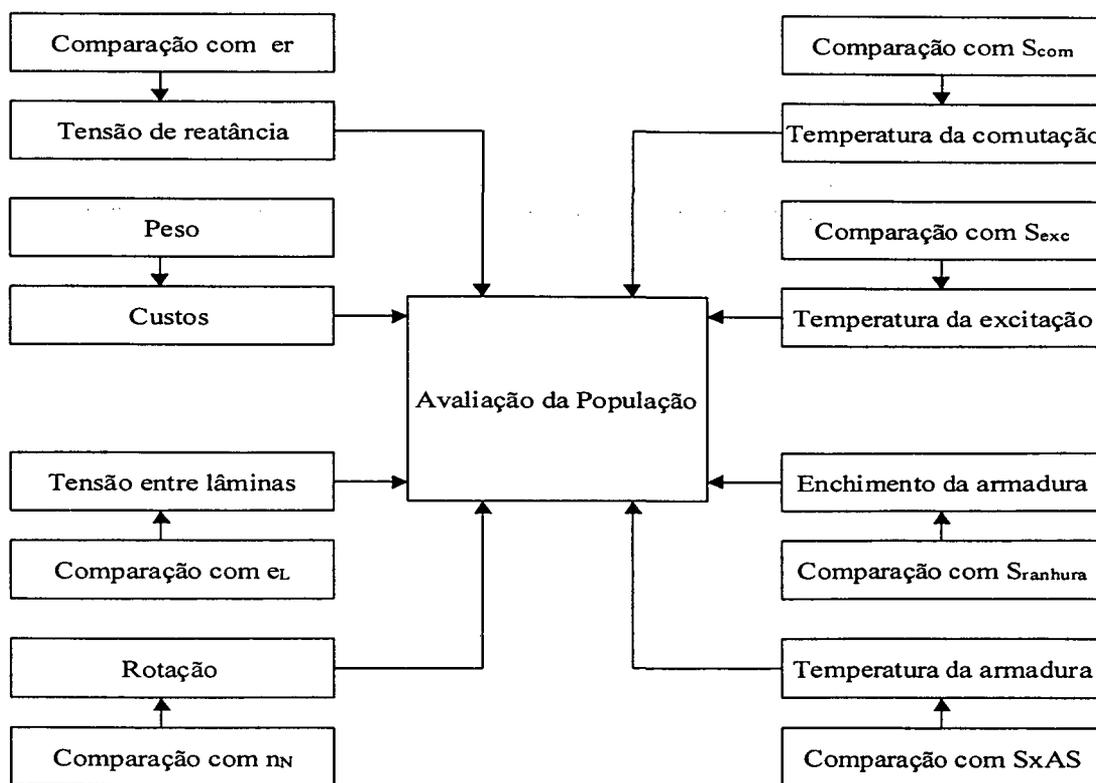


Figura 5.3: Fluxograma detalhado da função de avaliação

A função de avaliação, seguindo a uma definição semelhante à utilizada por [10], constitui-se da seguinte maneira:

$$Avaliação = \frac{100}{100 + \sum_1^n (P_n * |V_n|) - Custos} \quad (5.1)$$

Onde:

*n*: número de parâmetros a serem analisados

*P*: Constante peso de cada parâmetro

*V*: Valor em módulo da comparação com o valor limite de cada parâmetro

As seções seguintes implementam as subfunções para a determinação da elevação de temperatura no enrolamento de excitação e dos parâmetros  $V_n$ , responsáveis pela avaliação da máquina conforme a tabela 5.6.

n	Parâmetro $V_n$	Avaliação	Constante ( Peso )
1	$V_1$	Temperatura do enrolamento da armadura	$P_1$
2	$V_2$	Temperatura do enrolamento da comutação	$P_2$
3	$V_3$	Temperatura do enrolamento principal	$P_3$
3	$V_4$	Enchimento das ranhuras do rotor	$P_4$
4	$V_5$	Rotação	$P_5$
5	$V_6$	Comprimento	$P_6$
6	$V_7$	Tensão entre segmentos do comutador	$P_7$
7	$V_8$	Tensão de reatância	$P_8$

Tabela 5.6: Descrição dos parâmetros avaliados

### 5.3.1 Elevação de temperatura do enrolamento principal ( $V_3$ )

Através do número de espiras da excitação, relaciona-se segundo a tabela 5.3, o diâmetro do condutor. Assim, é possível calcular a resistência fria do enrolamento pela equação ( 5.2 ).

$$R_f = \frac{l_{total}}{58 * A_{exc} * ppe^2} \quad (5.2)$$

Onde:

*l<sub>total</sub>*: Comprimento total do enrolamento de excitação

*A<sub>exc</sub>*: Área transversal do condutor da excitação

*ppe*: Número de pólos de excitação em paralelo

A corrente de excitação pode então ser determinada pela resistência  $R_e$  calculada e a tensão nominal  $U_e$ . A densidade de corrente da excitação é determinada por:

$$S_e = \frac{I_e}{A_{exc} * ppe} \quad (5.3)$$

Onde:

*I<sub>e</sub>*: Corrente de excitação

Para se estimar a elevação de temperatura do enrolamento através da densidade de corrente, admite-se uma comparação do valor experimental de densidade  $S_{e2}$  para 100 graus Celsius que varia de acordo com o comprimento do pólo conforme a tabela 5.7.

$$\Delta T_e = \left( \frac{S_e^2}{S_{e2}^2} \right) * 100 \quad (5.4)$$

Onde:

*S<sub>e2</sub>*: Densidade de corrente de referência para 100 graus Celsius

Comprimento [ mm ]	Densidade S <sub>e2</sub> 100°C [ A/mm <sup>2</sup> ]
96	7.24
136	6.65
186	6.13
246	5.89
326	5.51

Tabela 5.7: Densidade padrão S<sub>e2</sub> para 100°C

A força magnetomotriz F.M.M. pode ser calculada por:

$$F.M.M._{excitação} = \frac{2 * Espiras * I_e}{ppe} \quad (5.5)$$

Onde:

*Espiras*: Número de espiras do pólo de excitação

A F.M.M. principal resultante será a diferença daquela produzida pelos pólos principais com aquela produzida pela reação de armadura, conforme descrito no capítulo 2.

As perdas do enrolamento de excitação (potência de excitação) pode ser calculada pela equação ( 5.6 ).

$$P_e = R_e * I_e^2 \quad (5.6)$$

### 5.3.2 Elevação de temperatura nos condutores da armadura ( $V_1$ )

O número de condutores da armadura é definido pelo parâmetro  $Z_a$ . Sendo o mínimo valor de  $Z_a$  20 e somente valores pares, tem-se que  $Z_a$  pode ser decodificado da seguinte maneira:

$$Z_a = \frac{Z_{an} * N}{cp} \quad (5.7)$$

Com:  $20 < Z_{an} < 148$

Onde:

$Z_{an}$ : Número de condutores da armadura por ranhura

$N$ : Número de ranhuras do rotor

$cp$ : Número de condutores paralelos na armadura

A partir do número de condutores da armadura é possível se determinar a rotação da máquina através da equação 5.8.

$$n = \frac{EMK * 2 * a * 60000}{Z_a * 2 * p * \phi_a} \quad (5.8)$$

Onde:

$p$ : Número de par de pólos

$a$ : Número de circuitos paralelos da armadura

$EMK$ : Força Eletromotriz

$\phi_a$ : Fluxo na armadura

A força eletromotriz pode ser estimada pela equação ( 5.9 ) assumindo-se inicialmente uma queda de tensão do circuito da armadura  $\Delta U$  de 0.1V.

$$EMK = U_a - \Delta U \quad (5.9)$$

O fluxo da armadura pode ser determinado a partir da curva da figura 5.4, de fluxo por força magnetomotriz considerando a geometria da máquina da figura 5.2. Assumindo-se 15% como um fator de dispersão do fluxo principal, calcula-se o fluxo resultante gerado pelo pólo de excitação pela equação ( 5.10 ).

$$\phi_{ares.} = \phi_a * 1.15 \quad (5.10)$$

A Corrente de armadura pode ser calculada considerando um rendimento inicial de 87% pela equação ( 5.11 ) no caso de um motor.

$$I_a = \frac{P_n}{U_a * \eta} \quad (5.11)$$

Onde:

$P_n$ : Potência nominal

$U_a$ : Tensão de armadura

$\eta$ : Rendimento

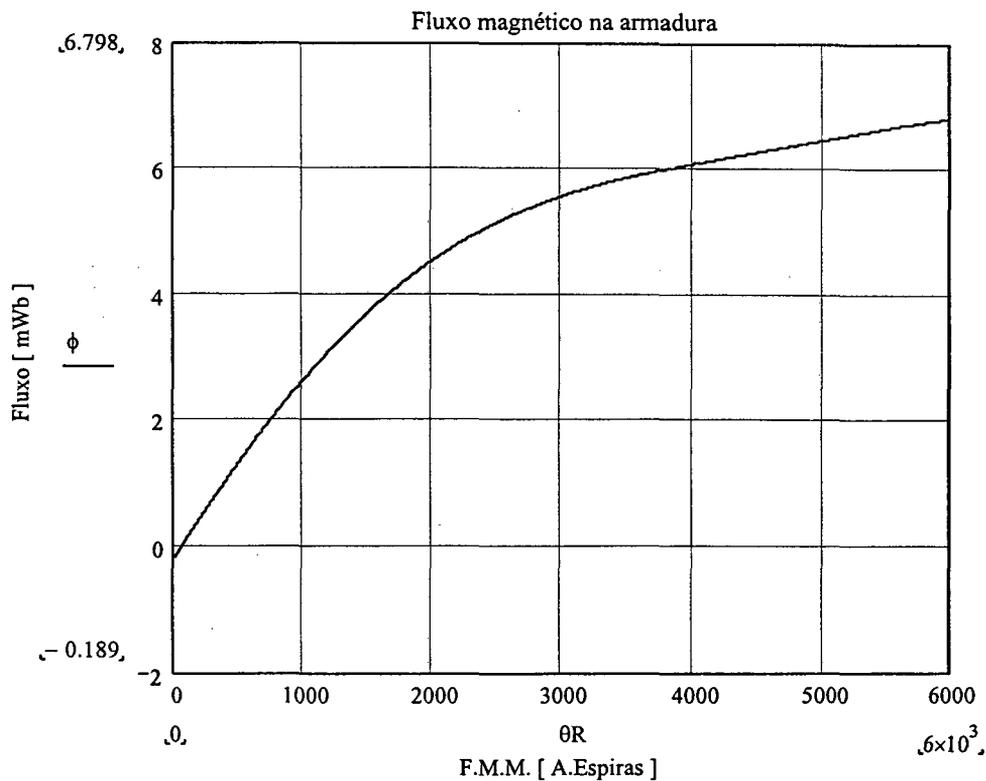


Figura 5.4: Fluxo magnético na armadura

O comprimento total dos condutores da armadura pode ser determinado pela equação (5.12).

$$l_{ca} = l_{a\text{ medio}} * Z_a * cp \quad (5.12)$$

Onde:

$l_{a\text{ medio}}$ : Comprimento médio de um condutor da armadura

E a resistência da armadura:

$$R_a = \frac{l_{ca}}{(2 * a)^2 * A_a * (cp)^2} * \frac{255 + \Delta T_a}{255} \quad (5.13)$$

Onde:

$A_a$ : Área transversal do condutor da armadura

A densidade de corrente dos condutores da armadura para comparação térmica pode ser calculada por:

$$S_a = \frac{I_a}{2 * a * A_a * cp} \quad (5.14)$$

O carregamento periférico  $AS$  da armadura é obtido através da equação (5.15).

$$AS = \frac{I_a * Z_a}{2 * a * \pi * D_a} \quad (5.15)$$

Onde:

$D_a$ : Diâmetro da armadura

Comparando-se o produto da densidade de corrente calculada  $S_a$  com o carregamento periférico  $AS$  e o produto da densidade de corrente padrão  $S_{a2}$  com o carregamento periférico padrão para 100 graus Celsius, é possível se estimar a elevação de temperatura na armadura.

$$\Delta T_a = \left( \frac{(AS * S_a)^2}{(AS_{\text{Padrão}} * S_{a2})^2} \right) * 100 \quad (5.16)$$

Comprimento [ mm ]	SxAS 100°C
90	3500
130	3300
180	3050
240	2425
320	2010

Tabela 5.8: SxAS padrão para 100°C

As perdas no enrolamento da armadura são calculadas pela equação ( 5.17 ).

$$P_a = R_a * I_a^2 \quad (5.17)$$

O parâmetro  $V_1$  pode então ser comparado com uma temperatura padrão de 100°C.

$$V_1 = \left( \frac{\Delta T_a - 100}{100} \right) \quad (5.18)$$

### 5.3.3 Elevação de temperatura no enrolamento de comutação ( $V_2$ )

O número de espiras  $N_c$  do enrolamento de comutação pode ser determinado por uma constante  $\theta_a$  que relaciona o número de condutores da armadura e da comutação segundo a equação ( 5.19 ).

$$N_c = \text{int} \left( \frac{Z_a * ppw * \theta_a}{4 * a * 2 * p} + 0.5 \right) \quad (5.19)$$

Onde:

*int*: É a parte inteira do argumento entre parênteses

*ppw*: Número de pólos de comutação em paralelo

Através da tabela 5.3 que relaciona o número de espiras com o diâmetro do condutor do enrolamento de comutação, pode-se estimar a densidade de corrente neste enrolamento sabendo-se que a corrente que percorre o condutor é a própria corrente de armadura calculada anteriormente.

Assim, a densidade de corrente é determinada por:

$$S_{com} = \frac{I_a}{A_{com} * ppw} \quad (5.20)$$

Onde:

$A_{com}$ : Diâmetro do condutor da comutação

A elevação de temperatura  $\Delta T_{com}$  pode ser estimada comparando-se a densidade de corrente calculada  $S_{com}$  com uma densidade de corrente padrão para 100 graus Celsius  $S_{com2}$  que varia de acordo com o comprimento do pólo.

$$\Delta T_{com} = \left( \frac{S_{com}}{S_{com2}} \right)^2 * 100 \quad (5.21)$$

Comprimento [ mm ]	Densidade $S_{com2}$ 100°C [ A/mm <sup>2</sup> ]
96	8.16
136	7.99
186	7.43
246	5.89
326	5.51

Tabela 5.9: Densidade padrão  $S_{com2}$  para 100°C

A resistência da comutação pode então ser determinada pela equação ( 5.22 ).

$$R_{com} = \frac{l_{com}}{58 * ppw^2 * A_{com}} * \frac{255 + \Delta T_{com}}{255} \quad (5.22)$$

Onde:

$l_{com}$ : Comprimento total do enrolamento da comutação

A queda de tensão  $\Delta U$  do circuito da armadura é calculado através da soma da queda de tensão no enrolamento de comutação, da armadura e das escovas ( $\Delta U_{esc}$ ), esta última depende diretamente do material e qualidade que são compostas as escovas.

$$\Delta U = I_a * (R_a + R_{com}) + \Delta U_{esc} \quad (5.23)$$

As perdas no enrolamento de comutação pode ser calculada pela equação ( 5.24 ).

$$P_c = R_{com} * I_a^2 \quad (5.24)$$

A comparação para o parâmetro  $V_2$  é calculado pela equação ( 5.25 ).

$$V_2 = \left( \frac{\Delta T_{com} - 100}{100} \right) \quad (5.25)$$

### 5.3.4 Cálculo do enchimento da armadura ( $V_4$ )

Com a finalidade de se obter uma fabricação das chapas de aço do rotor a um custo mais baixo, o processo de produção das chapas é geralmente realizado pelo processo de estampagem. Esse processo utiliza uma matriz com o desenho da geometria da chapa que se deseja estampar. Embora este processo tenha um custo mais baixo, como a vida útil da matriz é alta, uma vez definido a geometria da chapa, não é possível alterá-la a menos da confecção de uma nova matriz.

Assim, utiliza-se uma única geometria de chapa para todas as máquinas de mesmo diâmetro do rotor. Com a geometria fixa, as ranhuras da máquina muitas vezes alojam poucos condutores, ocupando uma pequena área se comparada com a área disponível na ranhura deixando assim muita “folga” entre os condutores, prejudicando o processo de fabricação e a própria dinâmica do funcionamento da máquina.

Chama-se fator de enchimento, a porcentagem da área ocupada pelos condutores da armadura com relação à área disponível nas ranhuras e pode ser calculada pela equação ( 5.26 ).

$$e\% = \frac{S_{ranhura}}{A_a * Z_a} \quad (5.26)$$

Onde:

$S_{ranhura}$ : Área disponível na ranhura

De maneira ideal, todo o espaço da ranhura deve estar preenchido pelos condutores, entretanto na prática, aceita-se de 80% a 100% da área disponível preenchida como satisfatório para o bom desempenho da máquina, ou seja, sem prejuízos para as características elétricas e mecânicas. Assim, o cálculo do parâmetro  $V_3$  pode ser calculado pela equação ( 5.27 ).

$$V_3 = \left( \frac{e\% - 80}{80} \right) \quad (5.27)$$

### 5.3.5 Determinação da rotação ( $V_5$ )

Com a queda de tensão  $\Delta U$  calculada pela equação ( 5.23 ), é possível utilizar novamente a equação ( 5.8 ) para determinação da rotação da máquina e compará-la com a rotação nominal.

$$V_4 = \left( \frac{n - n_N}{n_N} \right) \quad (5.28)$$

### 5.3.6 Determinação do comprimento ( $V_6$ )

O comprimento do pacote magnético da máquina pode ser estimado baseado na curva de potência para cada rotação mostrado na figura 5.5, entretanto trata-se de uma aproximação e em certos casos, comprimentos magnéticos menores poderão ser utilizados.

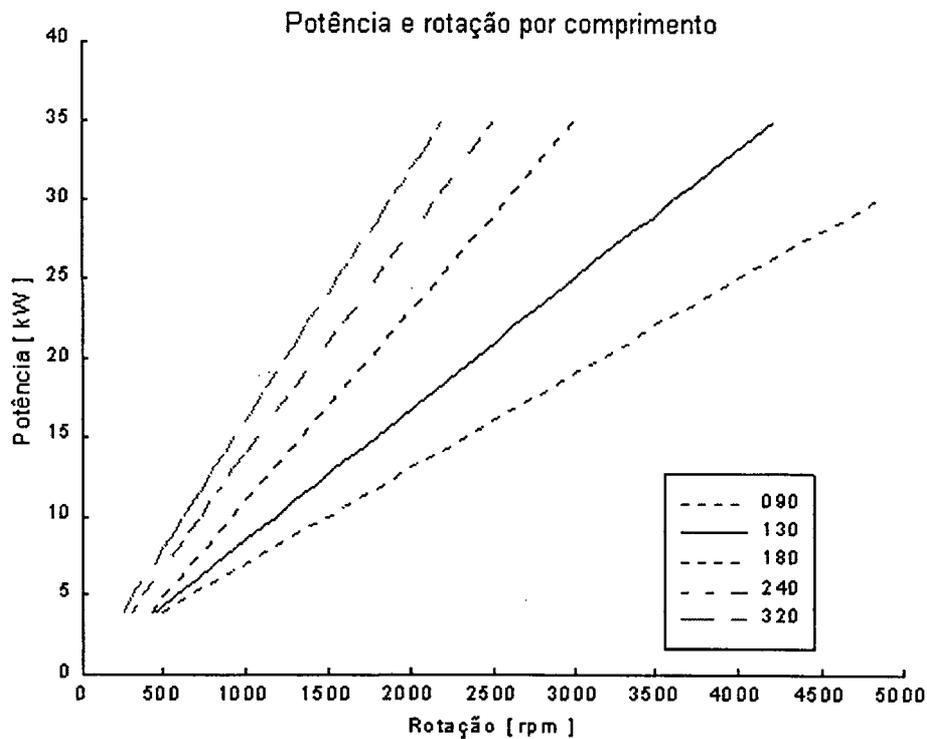


Figura 5.5: Curva de seleção aproximada do comprimento magnético

Por se tratar de uma aproximação, o comprimento é deixado também como um parâmetro de escolha do algoritmo e a comparação é realizada segundo a equação ( 5.29 ).

$$V_s = \left( \frac{l_a - l_{Curva}}{l_{Curva}} \right) \quad (5.29)$$

Onde:

$l_{curva}$ : Comprimento estimado pelo gráfico da figura 5.5.

### 5.3.7 Cálculo da tensão entre segmentos do comutador ( $V_7$ )

O valor médio da tensão entre segmentos do comutador é proporcional à tensão nominal da armadura e ao número de segmentos  $Z_L$  do mesmo, neste caso, 136, assim:

$$e_L = \frac{U_a * 2 * p}{Z_L} \quad (5.30)$$

Entretanto, para efeito de comparação, por se tratar de um ponto mais crítico, utiliza-se a tensão entre segmentos máxima que pode ser determinada pela equação ( 5.31 ).

$$e_{Lmáx} = e_L * \frac{B_{máx}}{B_L} \quad (5.31)$$

Onde:

$B_{máx}$ : Indução Máxima no entreferro

$B_L$ : Indução média no entreferro

Assim, a comparação pode ser realizada conforme a equação ( 5.32 ).

$$V_6 = \left( \frac{e_{Lmáx} - e_{Llimite}}{e_{Llimite}} \right) \quad (5.32)$$

Onde:

$e_{Llimite}$ : Limite de tensão para esta carcaça

### 5.3.8 Cálculo da tensão de reatância ( $V_8$ )

Da equação ( 2.25 ) formulada no capítulo 2, é possível fazer a comparação da tensão de reatância máxima pela equação ( 5.33 )

$$V_7 = \left( \frac{e_{rmáx} - e_{rlimite}}{e_{rlimite}} \right) \quad (5.33)$$

Onde:

$e_{rlimite}$ : Limite para a tensão de reatância

### 5.3.9 Cálculo das perdas da máquina

As perdas da máquina são basicamente constituídas pelas perdas nos enrolamentos do motor, nas escovas, no ferro e suplementares. As perdas no comutador totais da máquina são obtidas pela equação ( 5.34 ).

$$P_t = P_a + P_e + P_c + P_{suplementares} + P_{Fe} + P_{escovas} \quad (5.34)$$

Onde:

$P_{suplementares}$  : 1% da potência nominal do motor

$P_{escovas}$ :  $2 \cdot I_a$  considerando a queda de tensão de 2 V nas escovas

$P_{Fe}$ : Perdas no ferro, dependente do comprimento do pacote de chapas

### 5.3.10 Critério de parada pelo cálculo do rendimento

O critério de parada de cálculo da máquina é através do rendimento, calculado a partir das equações ( 2.28 ) e ( 2.29 ) do segundo capítulo. O erro admissível pode ser obtido através de  $\varepsilon$ :

$$| \eta - \eta_c | < \varepsilon \quad (5.37)$$

Caso a relação ( 5.37 ) não seja satisfeita, um novo rendimento é estimado pela equação (5.38) e o cálculo do motor é recalculado a partir da equação ( 5.11 ) e assim por diante até o erro  $\varepsilon$  seja satisfeito.

$$\eta = \frac{\eta + \eta_c}{2} \quad (5.38)$$

No próximo capítulo será apresentado os resultados obtidos para alguns casos típicos de máquinas de corrente contínua com as respectivas configurações dos Algoritmos Genéticos utilizados.

## 6. RESULTADOS

Os resultados obtidos nas simulações realizadas com diversas configurações do algoritmo são apresentados em forma de tabelas e gráficos neste capítulo. Para alguns tipos de seleção disponíveis, foram realizadas simulações envolvendo vários tipos de recombinações, probabilidades e diferentes valores de pesos  $P_i$  conforme descrito na seção 4.3.

### 6.1 Limites admissíveis

Os limites superior e inferior admitidos para as variáveis monitoradas pela função de avaliação estão descritas na tabela 6.1 abaixo.

Parâmetro	Descrição	Limite inferior	Limite Superior
$V_1$	Temperatura do enrolamento da armadura	0 [ °C ]	105 [ °C ]
$V_2$	Temperatura do enrolamento da comutação	0 [ °C ]	105 [ °C ]
$V_3$	Temperatura do enrolamento da excitação	0 [ °C ]	105 [ °C ]
$V_4$	Enchimento das ranhuras do rotor	40 [ mm <sup>2</sup> ]	80 [ mm <sup>2</sup> ]
$V_5$	Rotação calculada	- 5 %	+ 5 %
$V_6$	Comprimento magnético do estator	-	-
$V_7$	Tensão entre segmentos do comutador	-	40 [ V ]
$V_8$	Tensão de reatância	-	8 [ V ]

Tabela 6.1: Limites das variáveis da função de avaliação

O comprimento magnético do estator é estabelecido conforme gráfico de aproximação do aproveitamento do volume ativo da máquina conforme curva da figura 4.5 da seção 4.2.6.

### 6.2 Parâmetros de configuração

Os parâmetros de configuração dos algoritmos genéticos que podem ser alterados pelo programa são:

- Número total de indivíduos da população;
- Método de seleção;
- Número de indivíduos selecionados por geração;
- Tipo de crossover;
- Número de pontos de crossover;

- Probabilidade de ocorrência do crossover;
- Probabilidade de ocorrência da mutação;

O método de reposição adotado foi o de substituição do indivíduo com pior avaliação e uma estratégia de elitismo foi utilizada para garantir a presença do melhor indivíduo a cada geração.

O crossover pode ser escolhido entre 2 tipos:

- Crossover de pontos múltiplos;
- Crossover simples;

O método de seleção pode ser escolhido entre:

- Seleção pela Roleta;
- Seleção pela Roleta com “Scaled fitness”;
- Seleção pelo Rank;

### 6.3 Simulações

Os pesos utilizados pela função de avaliação (conforme tabela 4.6 da seção 4.3) para diferenciar a importância de cada parâmetro avaliado pode ser verificado na tabela 6.2. Estes pesos foram obtidos por uma estimativa inicial de importância para cada um dos parâmetros a ser avaliado. A análise apurada de uma série de simulações será o auxílio para estimar os pesos ideais para o cálculo das máquinas.

A tabela 6.3 mostra as características de um motor a ser especificado.

Parâmetro	Descrição	Constante ( Peso )
$V_1$	Temperatura do enrolamento da armadura	1.2
$V_2$	Temperatura do enrolamento da comutação	1.2
$V_3$	Temperatura do enrolamento da excitação	1.2
$V_4$	Enchimento das ranhuras do rotor	1.0
$V_5$	Rotação calculada	2.0
$V_6$	Comprimento magnético do estator	1.0
$V_7$	Tensão entre segmentos do comutador	1.1
$V_8$	Tensão de reatância	1.1

Tabela 6.2: Tabela de pesos dos parâmetros avaliados

Potência	12 [ kW ]
Rotação Nominal	1500 [ rpm ]
Rotação Máxima	1500 [ rpm ]
Tensão de Armadura	500 [ V ]
Tensão de Excitação	300 [ V ]

Tabela 6.3: Características do motor

### 6.3.1 Método de seleção da roleta

As primeiras simulações realizadas possuem o método de seleção pela roleta. Neste método, a fim de evitar a convergência prematura, foi necessário escolher um número elevado de indivíduos na população.

Foram realizadas 2 simulações com este método de seleção, a primeira, com 2 pontos de crossover e a segunda com 3 pontos. O resultado e as configurações destas simulações podem ser observados pelas tabelas e gráficos abaixo.

Método de seleção: Roleta	Pressão seletiva: -
Total de indivíduos: 800	Número de pontos de crossover: 2
Indivíduos selecionados: 2 ( pares )	Probabilidade de crossover: 96 %
Método de crossover: Múltiplo	Probabilidade de mutação: 4.8 %

Tabela 6.4: Configuração da primeira simulação

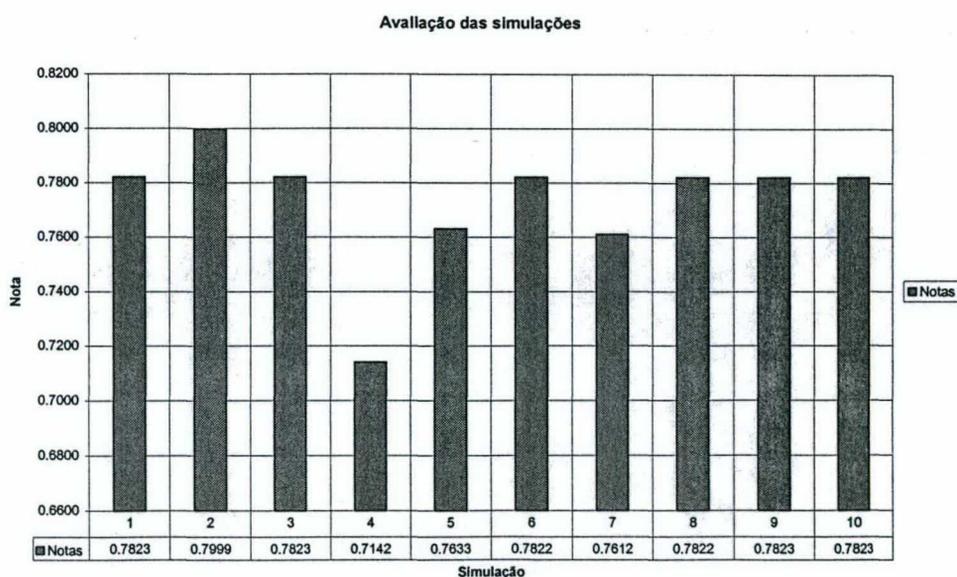


Figura 6.1: Avaliações obtidas para a primeira simulação

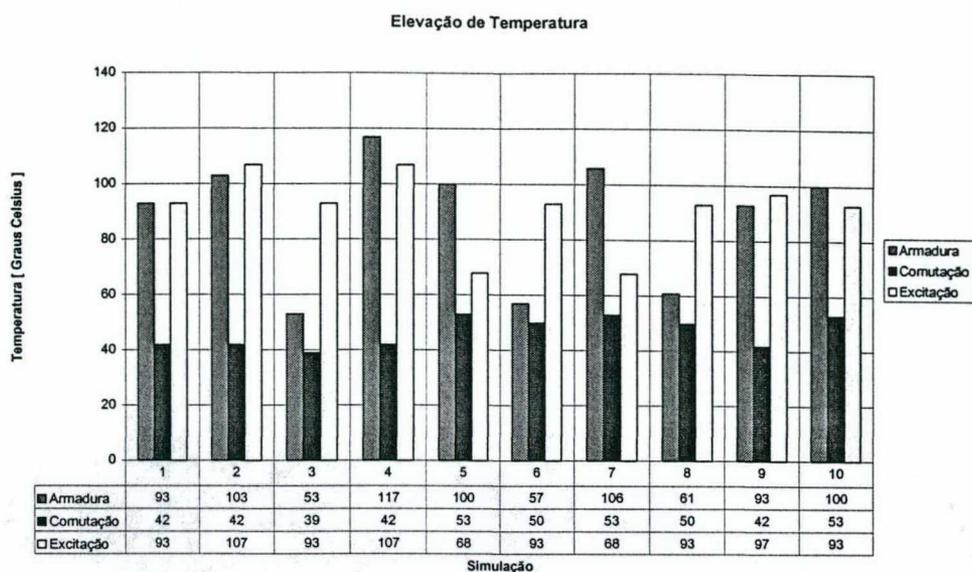


Figura 6.2: Elevação de temperatura para a primeira simulação

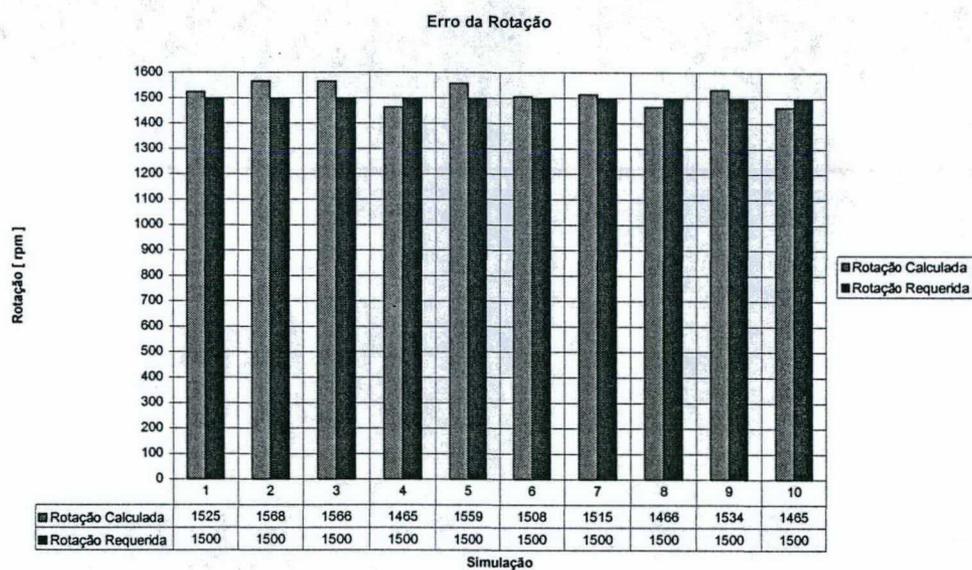


Figura 6.3: Rotação calculada para a primeira simulação

Método de seleção: Roleta	Pressão seletiva: -
Total de indivíduos: 800	Número de pontos de crossover: 3
Indivíduos selecionados: 1 ( par )	Probabilidade de crossover: 96 %
Método de crossover: Múltiplo	Probabilidade de mutação: 4.8 %

Tabela 6.5: Configuração da segunda simulação

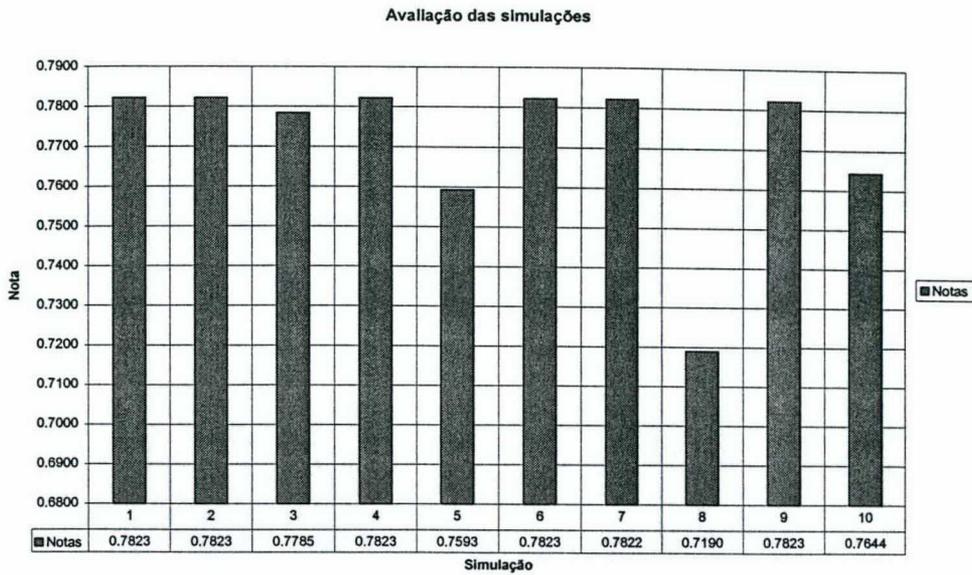


Figura 6.4: Avaliações obtidas para a segunda simulação

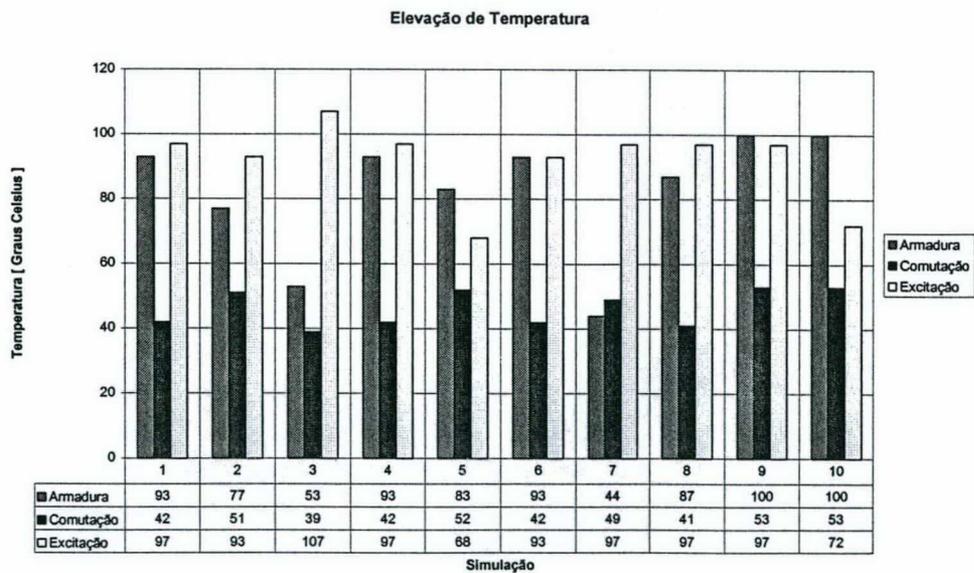


Figura 6.5: Elevação de temperatura para a segunda simulação

As tabelas com os valores detalhados das duas primeiras simulações podem ser analisados no anexo 1 e 2 respectivamente.

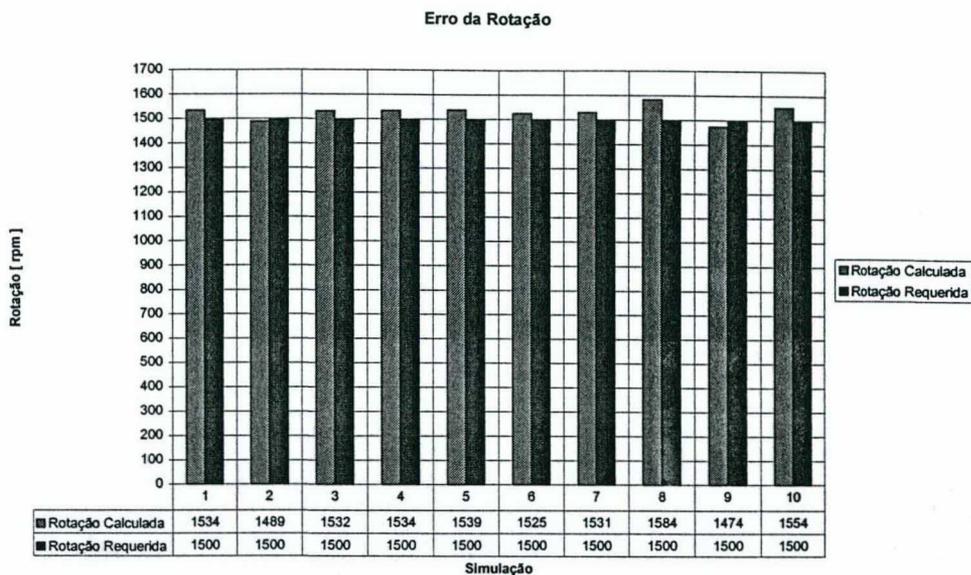


Figura 6.6: Rotação calculada para a segunda simulação

### 6.3.2 Método de seleção pelo Rank

Neste método, os resultados foram mais semelhantes mantendo suas avaliações e erros pertinentes à rotação relativamente constantes. As elevações de temperatura nos pólos também mantiveram um padrão constante.

Embora o número de gerações para a convergência da população neste método de seleção seja menor que o método anterior, o tempo de processamento é maior pois a cada geração, a substituição dos indivíduos é completa, ou seja, todos os indivíduos são substituídos pelos seus descendentes enquanto que no método anterior, (sorteio da roleta) somente um par de indivíduos foram substituídos.

Método de seleção: Rank	Pressão seletiva: -
Total de indivíduos: 500	Número de pontos de crossover: 3
Indivíduos selecionados: 250 ( pares )	Probabilidade de crossover: 96 %
Método de crossover: Múltiplo	Probabilidade de mutação: 4.8 %

Tabela 6.6: Configuração da terceira simulação

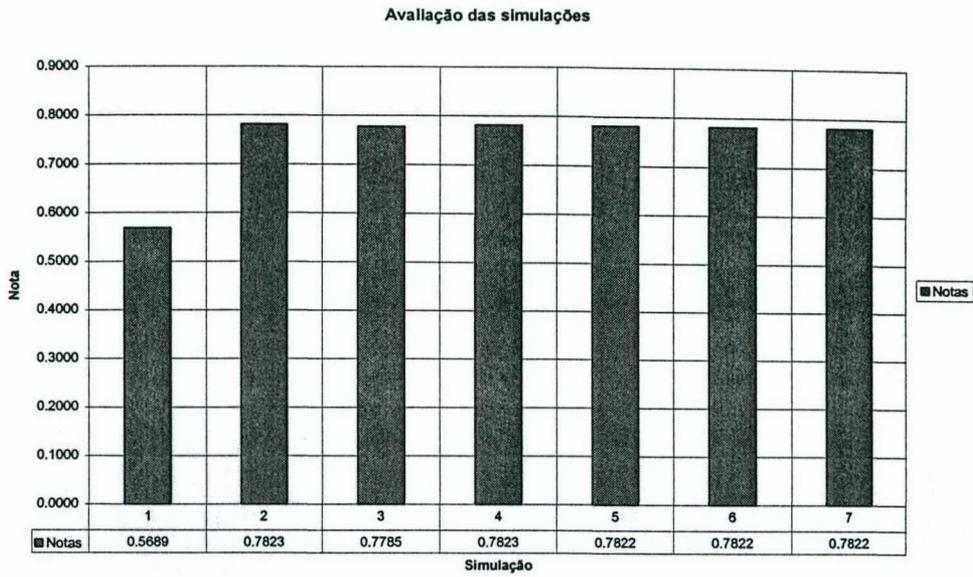


Figura 6.7: Avaliações obtidas para a terceira simulação

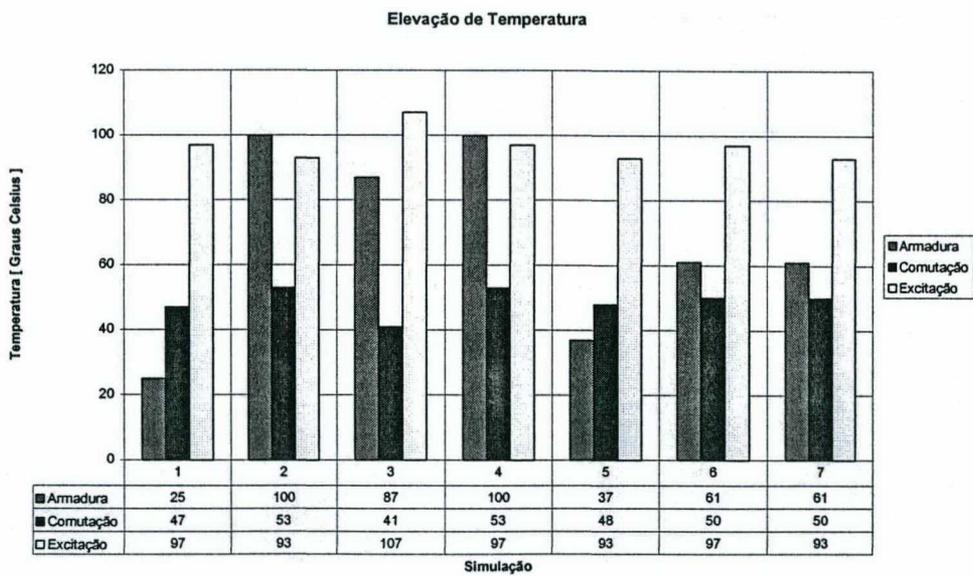


Figura 6.8: Elevação de temperatura para a terceira simulação

A tabela com os valores detalhados da terceira simulação pode ser analisado através do anexo 3.

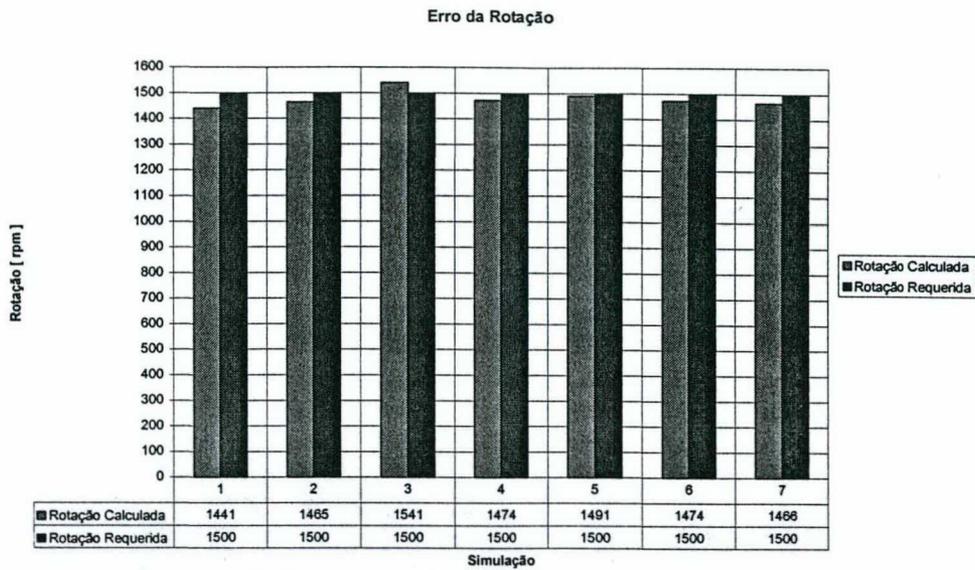


Figura 6.9: Rotação calculada para a terceira simulação

### 6.3.3 Método de seleção da Roleta com “Scaled fitness”

O número de indivíduos na população para este método foi mantido igual ao da roleta para efeito de comparação. No anexo 4 é possível visualizar os dados resultantes deste método.

Método de seleção: Roleta + fitness	Pressão seletiva: -
Total de indivíduos: 800	Número de pontos de crossover: 3
Indivíduos selecionados: 1 ( par )	Probabilidade de crossover: 96 %
Método de crossover: Múltiplo	Probabilidade de mutação: 4.8 %

Tabela 6.7: Configuração da quarta simulação

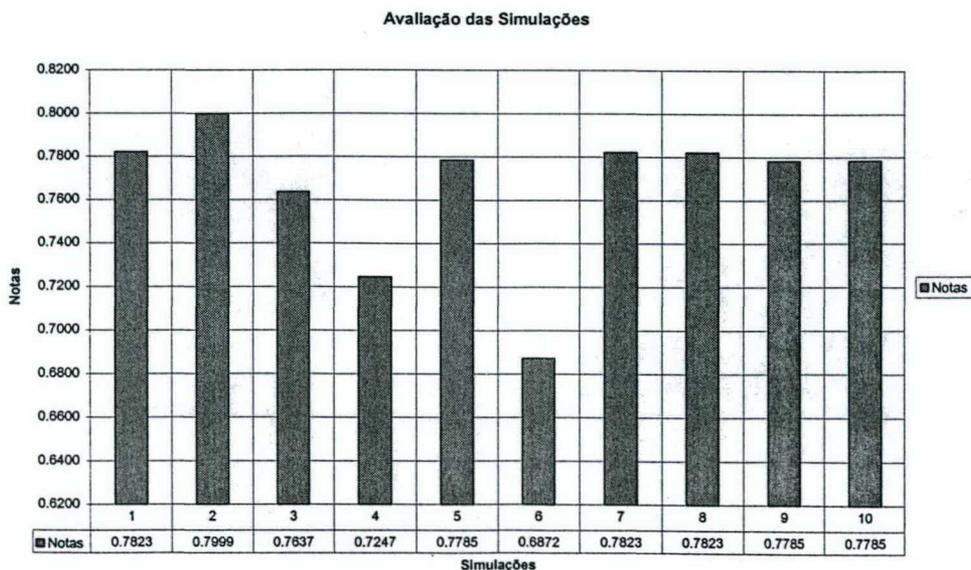


Figura 6.10: Avaliações obtidas para a quarta simulação

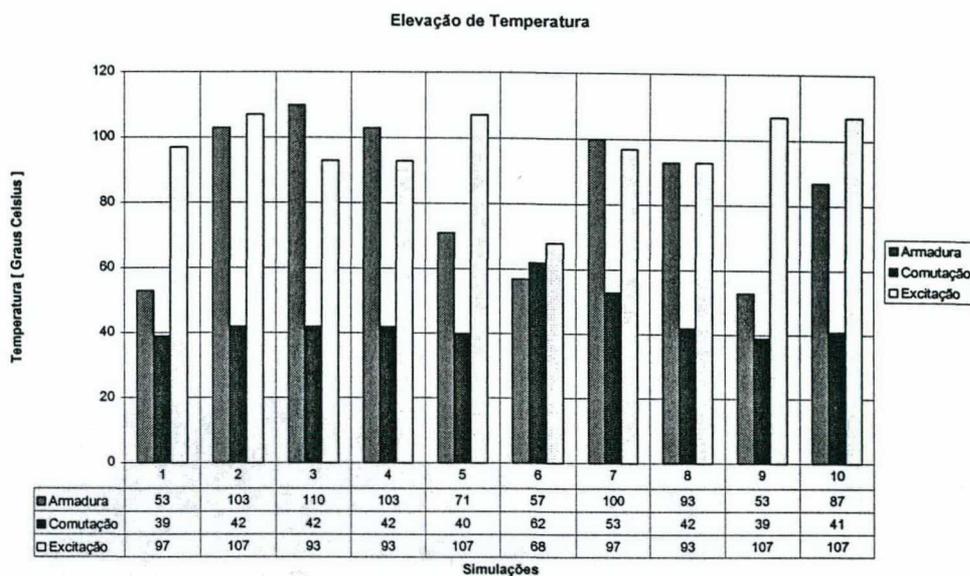


Figura 6.11: Elevação de temperatura para a quarta simulação

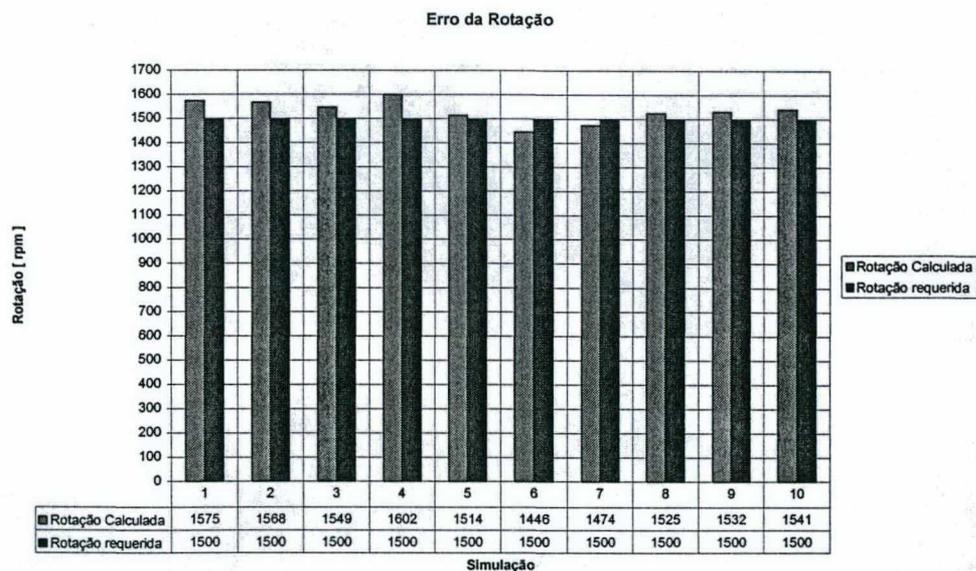


Figura 6.12: Rotação calculada para a quarta simulação

Os dados detalhados desta simulação são encontrados no anexo 4.

### 6.3.4 Análise dos resultados

As divergências na elevação de temperatura em alguns casos simulados sugere que os pesos relativos à temperatura não estão com uma influência predominante, logo, uma nova configuração dos pesos foi proposta conforme descreve a tabela 6.8.

Esta nova configuração assegura uma maior influência na temperatura fazendo com que o custo (peso) da máquina seja menos prioritário que a elevação de temperatura.

Parâmetro	Descrição	Constante ( Peso )
$V_1$	Temperatura do enrolamento da armadura	1.7
$V_2$	Temperatura do enrolamento da comutação	1.6
$V_3$	Temperatura do enrolamento da excitação	1.6
$V_4$	Enchimento das ranhuras do rotor	1.0
$V_5$	Rotação calculada	2.2
$V_6$	Comprimento magnético do estator	1.0
$V_7$	Tensão entre segmentos do comutador	1.25
$V_8$	Tensão de reatância	1.25

Tabela 6.8: Tabela de proposta de pesos para novos parâmetros

A tabela 6.9 mostra a configuração da quinta simulação, feita com a seleção pelo método da roleta com “scaled fitness” e crossover de pontos múltiplos. O número de indivíduos da população permaneceu inalterado assim como os demais dados para efeito de comparação com os pesos inicialmente propostos.

Método de seleção: Roleta+scaled fitness	Pressão seletiva: -
Total de indivíduos: 800	Número de pontos de crossover: 3
Indivíduos selecionados: 1 ( par )	Probabilidade de crossover: 96 %
Método de crossover: Múltiplo	Probabilidade de mutação: 4.8 %

Tabela 6.9: Configuração da quinta simulação

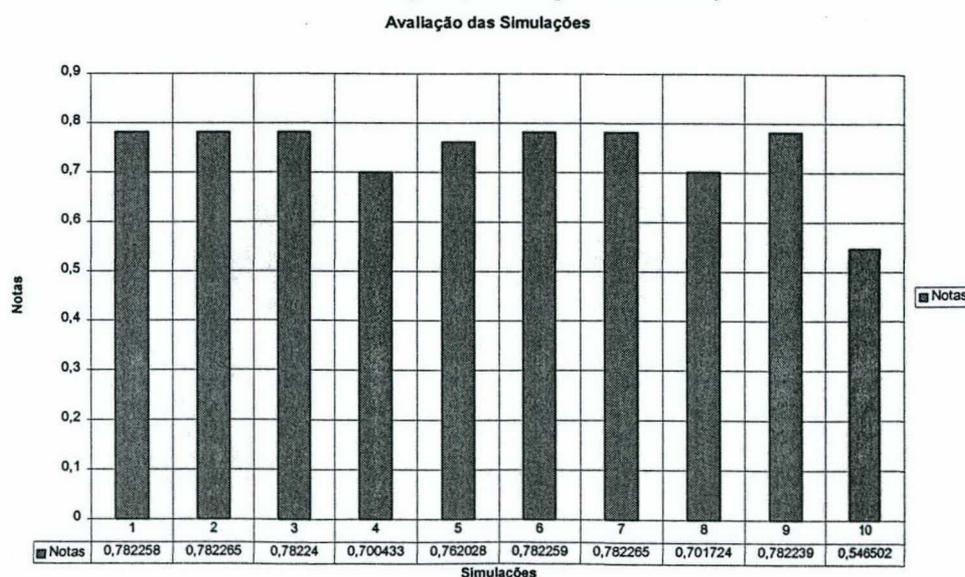


Figura 6.13: Avaliações obtidas para a quinta simulação

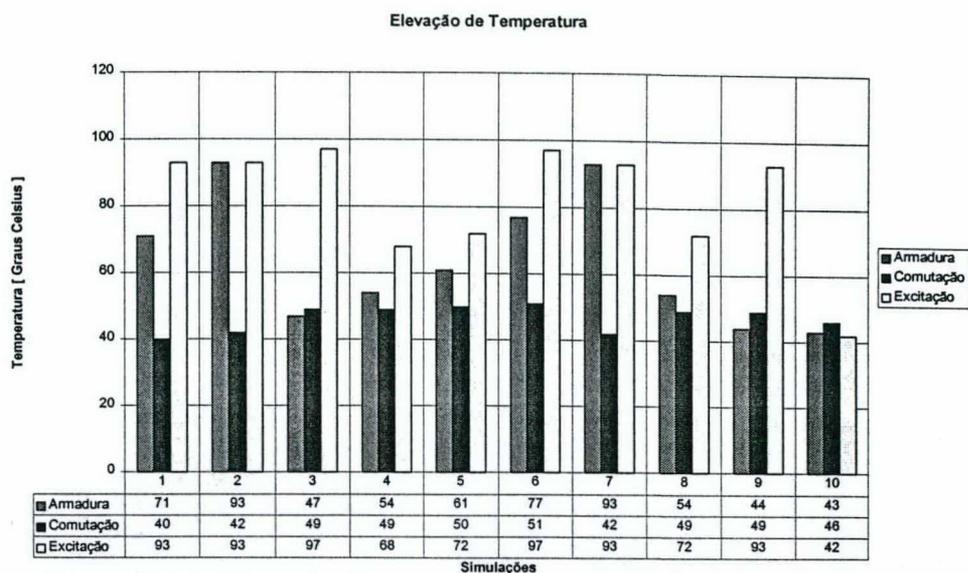


Figura 6.14: Elevação de temperatura para a quinta simulação

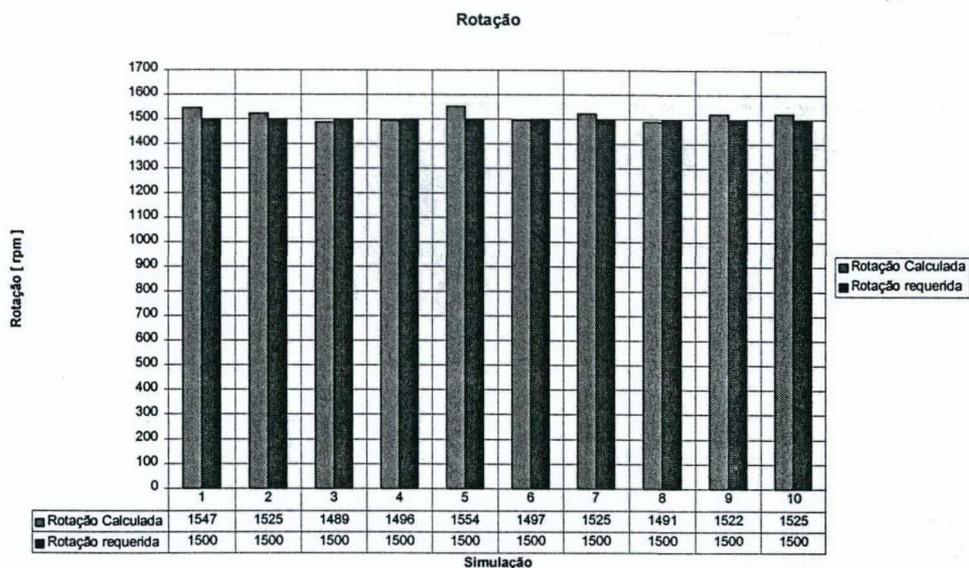


Figura 6.15: Rotação calculada para a quinta simulação

Analisando minuciosamente o gráfico da figura 6.14, conclui-se que em nenhuma simulação as temperaturas dos enrolamentos ultrapassaram os limites propostos pela tabela 6.1, mostrando o efeito positivo das alterações nos pesos dos parâmetros da função de avaliação.

Uma comparação entre as máquinas, mostra que o motor 2 e 7 são os que possuem a melhor nota e portanto, a melhor configuração da máquina. Pode-se fazer uma análise do comportamento destas duas simulações durante as gerações através dos gráficos gerados pelo programa.

A figura 6.16 mostra a curva de convergência da máquina 2. A figura 6.17 mostra o comportamento da elevação de temperatura nos três enrolamentos no decorrer das gerações e a figura 6.18 mostra as induções na máquina. A figura 6.19 apresenta as perdas totais durante o processo e igualmente a figura 6.20 apresenta a variação do custo do motor durante as gerações.

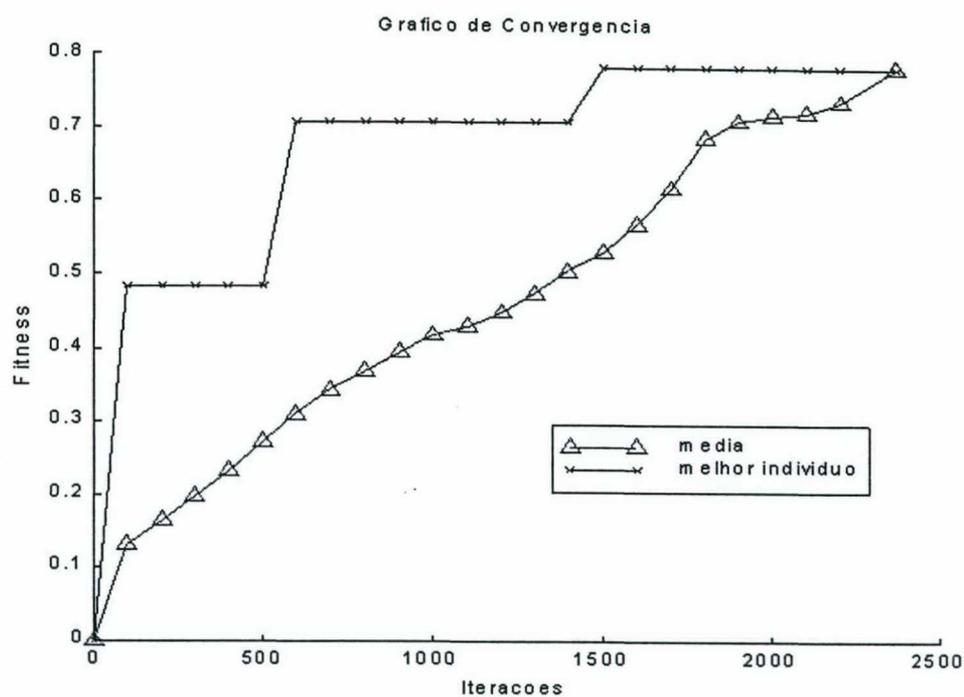


Figura 6.16: Gráfico de convergência

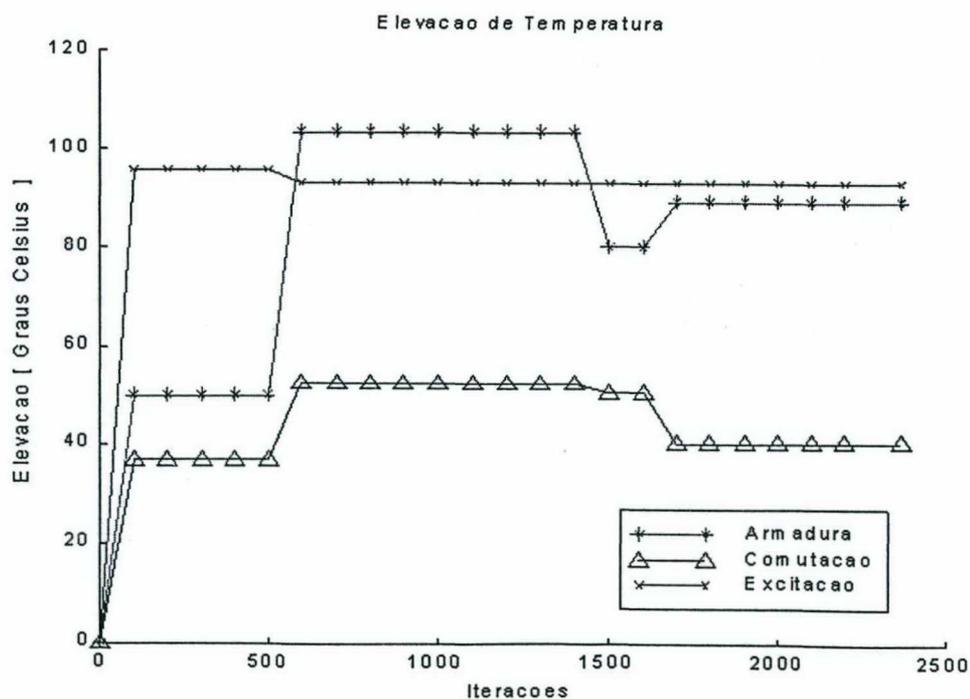


Figura 6.17: Elevação de temperatura nos enrolamentos

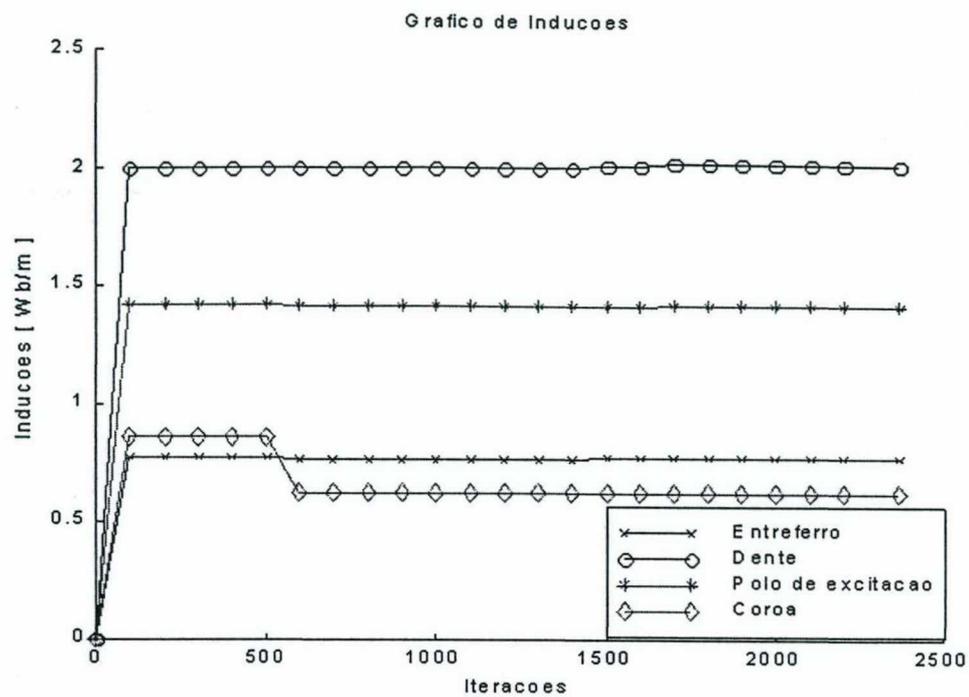


Figura 6.18: Gráfico de Induções

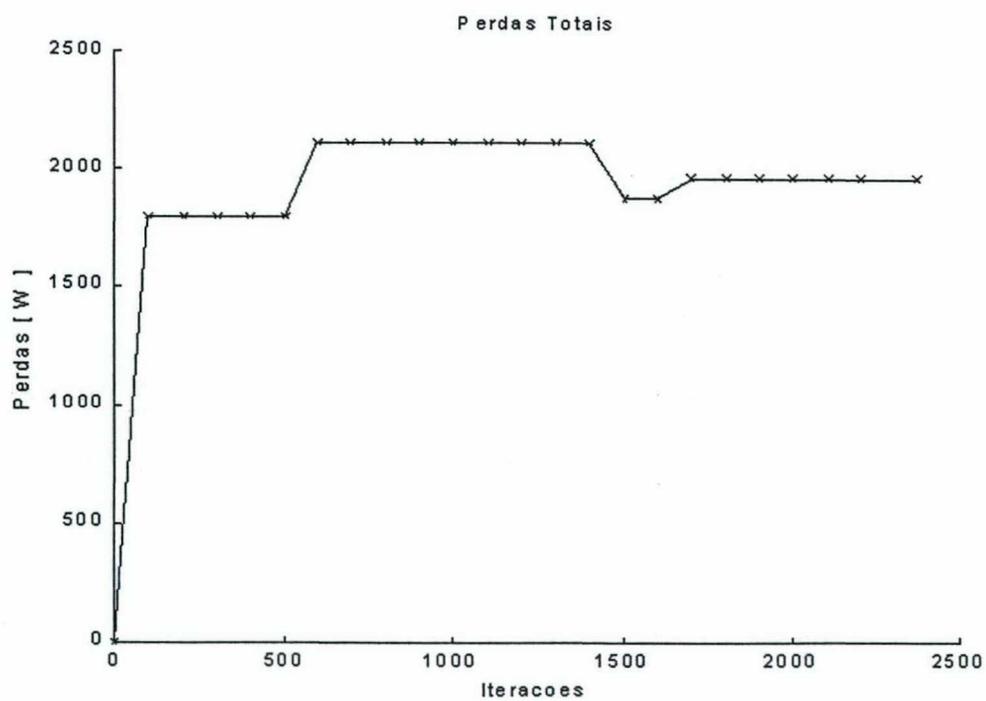


Figura 6.19: Perdas totais do motor

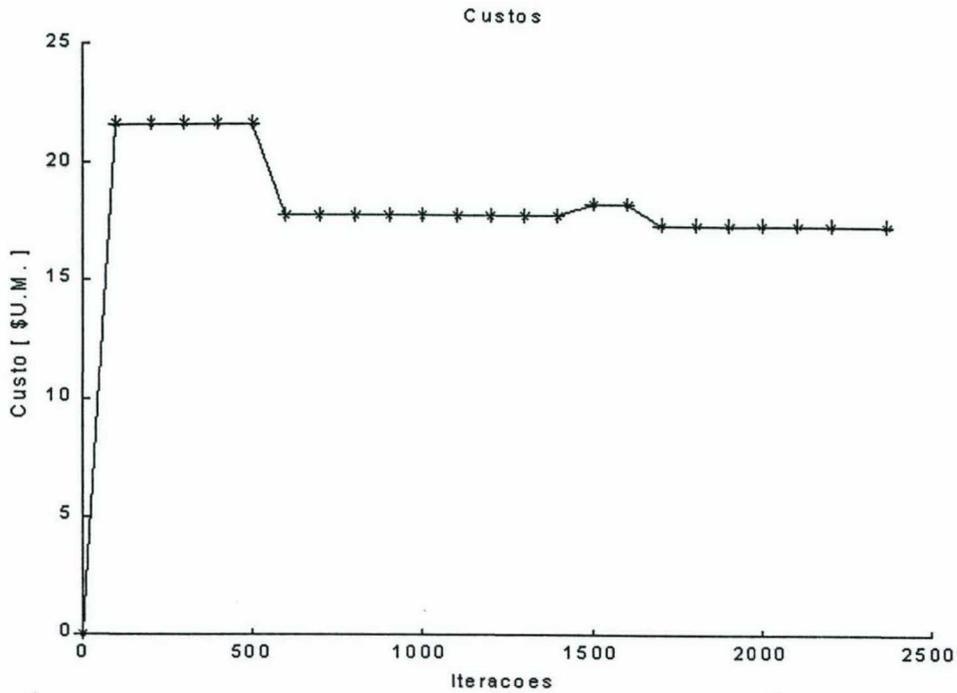


Figura 6.20: Custo

A configuração detalhada da máquina 2 obtida pelo programa é apresentada pelo relatório de saída mostrado abaixo na figura 6.21.

```

Calculo:          2
Seed:            931316785
Fitness:        0.782265

                D A D O S   D E   E N T R A D A

Carcaça IEC          : 132
Comprimento Mag. Estimado: 130 [ mm ]
Potência Nominal    : 12.00 [ kW ]
Conjugado           : 76.40 [ N.m ]
Tensão de armadura  : 500 [ V ]
Tensão de excitação : 300 [ V ]
Rotação nominal requerida: 1500 [ rpm ]
Rotação nominal calculada: 1525 [ rpm ] - 101.7 percentuais
Rotação máxima      : 1500 [ rpm ]

                D A D O S   D E   C A L C U L O

Comprimento da armadura : 130 [ mm ]
Rotacao                  : 1500 [ rpm ]
Ia                       : 28.40 [ A ]
Sa                       : 10.02 [ A/mm2 ]
Custo                    : 92779.96 [ kg ]
Rendimento               : 0.85
  
```

D A D O S D A A R M A D U R A					
Condutores/Ranhura	:	66			
Condutores Totais	:	2244			
Condutor Nu	:	0.95	[ mm ]		
Condutores Paralelos:		1			
Secao Cobre	:	0.71	[ mm <sup>2</sup> ]		
Enchimento	:	54.99	[ mm <sup>2</sup> ]		
Comprimento medio	:	310.0	[ mm ]		
dT Armadura	:	93	[ oC ]		
D A D O S D A C O M U T A C A O					
Numero de espiras	:	75			
Area do fio	:	5.52	[ mm <sup>2</sup> ]		
dT Comutacao	:	42	[ oC ]		
D A D O S D A E X C I T A C A O					
Numero de espiras	:	950			
Polos em paralelo	:	1			
Diametro do fio	:	0.71	[ mm ]		
dT Excitacao	:	93	[ oC ]		
D A D O S R E A T A N C I A					
KCW	:	1.10	X	:	1.16
Ln	:	0.78	Lz	:	1.44
Pichel	:	4.11		Ls	: 0.50
er	:	3.99	[ V ] ermax	:	7.05 [ V ]
eL	:	14.71	[ V ] eLmax	:	39.02 [ V ]
Comp. Ideal	:	13.30	[ cm ]		
Velocidade	:	12.78	[ m/s ]		
Carga perifer.:		317	[ A/cm ]		

Figura 6.21: Relatório de Saída

## 6.4 Simulação genérica

Nas simulações realizadas anteriormente, a excitação está limitada ao processo de produção e padronização dos enrolamentos segundo a tabela 4.3 da seção 4.2. Pode-se no entanto, simular uma situação ideal, onde o número de espiras da excitação e sua área transversal possa ser escolhida.

Assim, utilizando uma nova cadeia de genes conforme a tabela 6.10 que seja capaz de representar o número de espiras e o diâmetro do fio da excitação, pode-se realizar a simulação conforme a configuração da tabela 6.11.

Parâmetro	Valor mínimo	Valor máximo	Número de bits
Zan	20	148	6
FioA	1	32	5
Cp	1	2	1
Fiohp	1	19	5
Ppe	1	2	1
WEP	300	4396	12
La	1	5	3

Tabela 6.10: Nova configuração dos genes

Método de seleção: Roleta + fitness	Pressão seletiva: -
Total de indivíduos: 800	Número de pontos de crossover: 3
Indivíduos selecionados: 1 ( par )	Probabilidade de crossover: 96 %
Método de crossover: Múltiplo	Probabilidade de mutação: 4.8 %

Tabela 6.11: Configuração para uma simulação genérica

Os resultados para um algoritmo com a configuração da tabela 6.11 está mostrada nas figuras 6.22, 6.23 e 6.24. Os dados detalhados podem ser analisados no anexo 6.

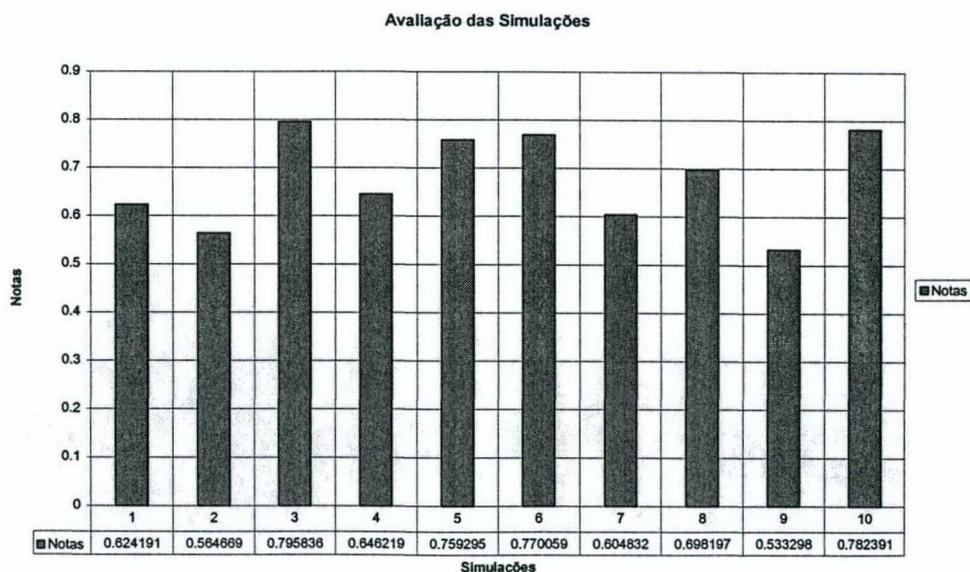


Figura 6.22: Avaliação da simulação genérica

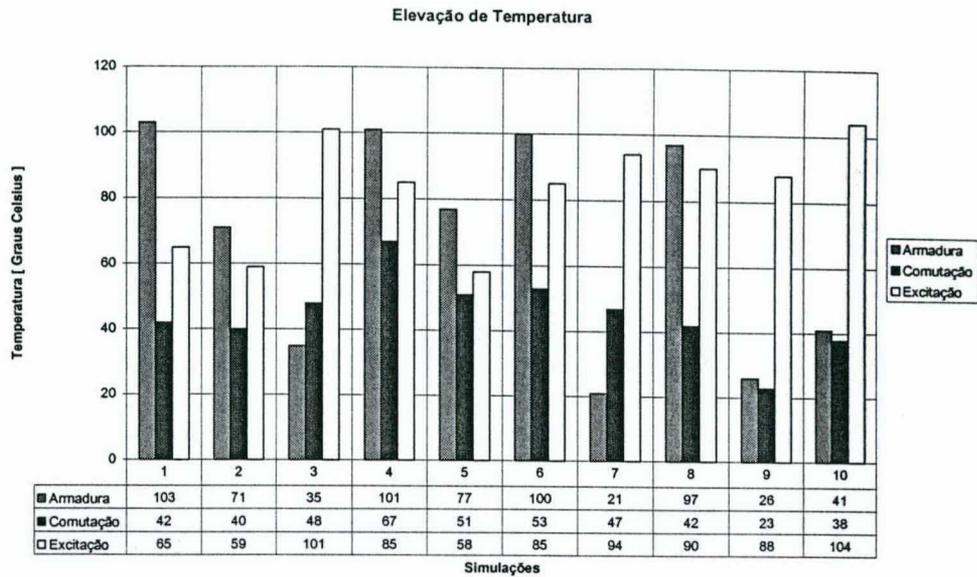


Figura 6.23: Elevação de temperatura para a simulação genérica

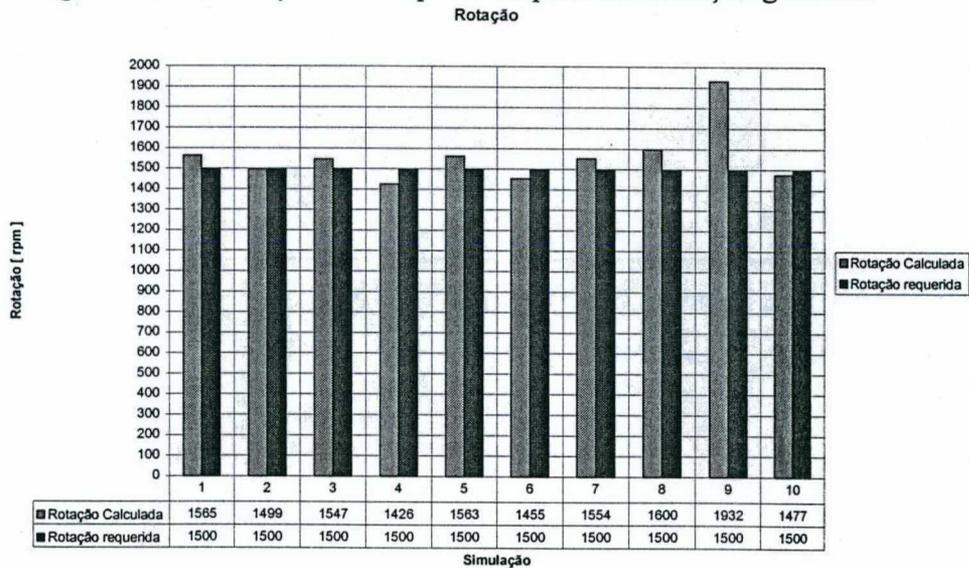


Figura 6.24: Rotação calculada para a simulação genérica

## 6.5 Comparação teórica

Um comparação entre a máquina projetada pelo algoritmo e por um projetista foi realizada para verificar as possíveis deficiências e vantagens do algoritmo.

A tabela 6.12 mostra a configuração utilizada para projetar a máquina e a tabela 6.13 mostra as características elétricas dos dois motores em teste.

Método de seleção: Roleta	Pressão seletiva: -
Total de indivíduos: 500	Número de pontos de crossover: 3
Indivíduos selecionados: 1 ( par )	Probabilidade de crossover: 96 %
Método de crossover: Múltiplo	Probabilidade de mutação: 4.8 %

Tabela 6.12: Configuração do algoritmo

Potência [ kW ]	24	18
Rotação [ rpm ]	2550	1650
Tensão de armadura [ V ]	260	300
Tensão de excitação [ V ]	200	200
Temperatura exc./com./arm. [ °C ]	105/105/105	105/105/105

Tabela 6.13: Características do motor

	AG	Projetista	AG	Projetista
Potência [ kW ]	24	24	18	18
Rotação [ rpm ]	2576	2572	1662	1646
Ua / Ue [ V ]	260/200	260/200	300/200	300/200
<b>Rotor</b>				
Comprimento da armadura [ mm ]:	180	180	180	180
Condutores por ranhura:	32	34	56	56
Diâmetro do condutor [ mm ]:	1.5	1.32	1.25	1.18
Condutores paralelos:	2	3	2	2
Enchimento:	83%	95%	100%	89%
Elev. Temperatura ( Celsius ):	41	67	40	82
<b>Excitação</b>				
Número de espiras do campo:	1200	1200	1200	1200
Diâmetro do condutor [ mm ]:	0.63	0.63	0.63	0.63
Pólos em paralelo:	2	2	2	2
Elev. Temperatura ( Celsius ):	89	89	89	89
<b>Comutação</b>				
Número de espiras comutação:	19	40	36	35
Condutor [ mm ]:	3.55 x 5.6	2.00 x 4.0	2.50 x 4.0	2.5 x 4.0
Pólos em paralelo:	1	2	1	1
Elev. Temperatura ( Celsius ):	50	63	92	75

Tabela 6.14: Resultados da comparação

Os resultados descritos na tabela 6.14 são os melhores resultados obtidos numa série de 10 simulações para cada máquina. Através da análise destes resultados, nas duas condições o algoritmo se aproxima do projeto realizado pelo projetista. Entretanto, o tempo de convergência do algoritmo deixa o método com um alto custo quando comparado à experiência humana.

O alto custo se deve ao tempo necessário para que o algoritmo obtivesse uma resposta satisfatória. Um projetista experiente pode levar em média de 20 a 40 minutos com o auxílio do computador para realizar o projeto da máquina. Os Algoritmos genéticos consomem em média 50 a 90 minutos por cálculo realizado (simulação).

Os fatores de ajuste empíricos realizados pelo projetista não foram implementados no algoritmo razão pela qual, em alguns casos, o algoritmo poderá convergir para um motor menos eficiente que a máquina projetada pelo projetista elétrico.

## 6.6 Comparação prática

Para efeito prático de validação dos projetos, aplicou-se também o Algoritmo Genético para o desenvolvimento de um motor com as seguintes características:

Potência [ kW ]	22
Rotação [ rpm ]	2000
Tensão de armadura [ V ]	440
Tensão de excitação [ V ]	190
Temperatura exc./com./arm. [ °C ]	105/105/105

Tabela 6.15: Características do motor

A configuração do algoritmo para o projeto do motor acima é mostrado na tabela 6.16.

Método de seleção: Roleta + fitness	Pressão seletiva: -
Total de indivíduos: 800	Número de pontos de crossover: 3
Indivíduos selecionados: 1 ( par )	Probabilidade de crossover: 96 %
Método de crossover: Múltiplo	Probabilidade de mutação: 4.8 %

Tabela: 6.16: Configuração para o caso prático

Nestas condições, para um série de 12 simulações, o algoritmo apresentou as respostas mostradas pela tabela 6.17 e ilustradas pelos gráficos do anexo 7.

	Nota	Nnc	La	la	ZapN	fioA	cp	Ench.	Dta	wwc	flow	Dtw	WEP	ppe	fio	Dte	eL	er
1	0.7219	2051	180	56.43	34	1.4	1	58.49	95	42	8.64	77	1200	2	0.63	83	35.7	6.9
2	0.7218	2051	180	55.51	34	1.5	1	66.66	68	42	8.64	75	600	1	0.90	83	35.3	6.8
3	0.7218	2021	180	56.30	38	1.5	1	74.51	90	47	7.64	98	1510	2	0.56	60	39.2	7.7
4	0.7219	1980	180	56.42	34	1.4	1	58.49	95	42	8.64	77	540	1	0.95	95	35.0	6.9
5	0.7218	2021	180	56.30	38	1.5	1	74.51	90	47	7.64	98	1510	2	0.56	60	39.2	7.7
6	0.5466	1989	180	54.49	34	1.8	1	94.38	30	42	8.64	72	950	2	0.71	112	34.2	6.7
7	0.7218	2075	180	54.74	34	1.7	1	84.61	39	42	8.64	73	600	1	0.90	83	35.1	6.7
8	0.7218	2072	180	55.51	34	1.5	1	66.66	68	42	8.64	75	1200	2	0.63	83	35.4	6.8
9	0.7218	1917	180	56.29	38	1.5	1	74.51	90	47	7.64	98	650	1	0.85	74	38.0	7.7
10	0.7219	2051	180	56.43	34	1.4	1	58.49	95	42	8.64	77	1200	2	0.63	83	35.7	6.9
11	0.7218	2075	180	54.74	34	1.7	1	84.61	39	42	8.64	73	600	1	0.90	83	35.1	6.7
12	0.5233	2238	180	56.22	60	0.95	2	99.99	87	36	9.45	64	540	1	0.95	95	33.6	4.9

Tabela 6.17: Resultados para a simulação prática

Verifica-se que neste caso prático, todas as máquinas projetadas, com exceção das de número 6 e 12, possuem praticamente a mesma avaliação (Nota). Neste caso, máquina construída está baseada no projeto detalhado da máquina de número 8, cujos dados de projeto se encontram no anexo 8.

O ensaio da máquina construída conforme as características descritas pelo anexo 8 está apresentado na tabela 6.18.

Potência:	22 kW	$\Delta T$ Armadura:	67 °C
Tensão de Armadura:	440 V	$\Delta T$ Excitação:	73 °C
Corrente de Armadura:	56 A	$\Delta T$ Comutação:	67 °C
Tensão de Excitação:	190 V	Rotação:	2079 rpm
Corrente de Excitação:	3.55 A	Comutação:	OK!

Tabela 6.18: Resultados do ensaio da máquina proposta pela simulação 8 da tabela 6.17

## 6. CONCLUSÃO

A dificuldade de implementação desta técnica da Inteligência Artificial no projeto das máquinas de corrente contínua está nos inúmeros fatores empíricos que devem ser incorporados ao projeto e precisam ser respeitados e conjugados dentro da função e avaliação.

Por ser uma máquina onde o processo de fabricação exige uma alta precisão geométrica em sua construção, a comprovação prática do projeto não é uma tarefa simples. Entretanto, foi possível comprovar a validade prática da seqüência de cálculo através dos testes efetuados para uma máquina construída segundo os parâmetros indicados pelos Algoritmos Genéticos.

Baseando-se nos vários modelos simulados, os resultados obtidos através do método em estudo não se distanciaram da realidade dos projetos elaborados por analistas experientes de máquinas de corrente contínua. Embora os critérios utilizados para o projeto das máquinas simuladas estejam baseados em fatores práticos (usuais), pode-se controlar a otimização do motor através dos pesos utilizados pela função de avaliação, dando maior peso para os parâmetros com maior importância, por exemplo, o custo.

As inúmeras combinações dos parâmetros dos Algoritmos Genéticos exigem tempo e análises minuciosas dos resultados para se encontrar uma boa configuração. A implementação das rotinas em vez da utilização de programas (toolbox) existentes, possibilitou um maior conhecimento e contato com a técnica, facilitando futuras implementações e utilização do método em outras áreas.

Na questão da utilização prática do método de AG's para a otimização do projeto das máquinas de corrente contínua, deve-se pesar de um lado, o fator "estocástico" da técnica vinculado ao seu custo computacional (elevado tempo de resposta) e de outro, a ausência de interferência durante todo o processo de cálculo da máquina e a alta possibilidade de se encontrar a melhor configuração para sua construção. Não existe um cálculo analítico completo e exato para todas as configurações de máquinas de corrente contínua. Os cálculos existentes abrangem uma faixa de máquinas e por isso, necessitam da experiência do projetista para se fazer a correção do projeto. Essa experiência consiste no conhecimento e domínio da máquina quanto à seus parâmetros e influências nos aspectos eletromagnéticos da máquina.

A simulação com outras configurações dos algoritmos genéticos, variando o tamanho da população, as probabilidades de recombinação e as inúmeras técnicas de crossover e mutação contemplam as implementações futuras. Neste trabalho, o enfoque para a determinação dos parâ-

metros da máquina além da configuração do algoritmo nesta aplicação, limitou em tempo, o número de combinações para a simulação do algoritmo.

Ainda como trabalhos futuros, as implementações com populações paralelas ou subpopulações tendem a diminuir o tempo de simulação do algoritmo reduzindo assim o seu custo computacional, principal desvantagem encontrada nesta aplicação.

A proposição da técnica como otimização dos projetos de máquinas de corrente contínua é uma das aplicações deste método que não está restrito somente à configuração elétrica do motor. Propostas de otimização magnética das chapas do rotor e estator podem ser verificadas em trabalhos como [6,11,12].

### Anexo 1: Primeira Simulação

Método de seleção: Roleta	Pressão seletiva: -
Total de indivíduos: 800	Número de pontos de crossover: 2
Indivíduos selecionados: 2 ( pares )	Probabilidade de crossover: 96 %
Método de crossover: Múltiplo	Probabilidade de mutação: 4.8 %

Nota	P	Ua	Uexc	Nnc	Nf	La	la	Peso	ZapN	fioA	cp	Ench.	Dta	wwc	flowp	Dtw	WEP	ppe	fio	Dte
0.7823	12	500	300	1525	1500	130	28.4	4.49	66	0.95	1	54.99	93	75	5.52	42	950	1	0.71	93
0.7999	12	500	300	1568	1500	130	28.57	3.78	62	0.9	1	46.77	103	75	5.52	42	850	1	0.75	107
0.7823	12	500	300	1566	1500	130	27.52	5.59	66	1.06	1	67.37	53	75	5.52	39	950	1	0.71	93
0.7142	12	500	300	1465	1500	130	28.57	4.03	66	0.9	1	49.78	117	75	5.52	42	850	1	0.75	107
0.7633	12	500	300	1559	1500	130	28.57	4.62	68	0.95	1	56.66	100	85	4.91	53	1200	1	0.63	68
0.7822	12	500	300	1508	1500	130	27.6	5.76	68	1.06	1	69.41	57	85	4.91	50	950	1	0.71	93
0.7612	12	500	300	1515	1500	130	28.57	4.76	70	0.95	1	58.33	106	85	4.91	53	1200	1	0.63	68
0.7822	12	500	300	1466	1500	130	27.68	5.92	70	1.06	1	71.45	61	85	4.91	50	950	1	0.71	93
0.7823	12	500	300	1534	1500	130	28.4	4.49	66	0.95	1	54.99	93	75	5.52	42	1850	2	0.5	97
0.7823	12	500	300	1465	1500	130	28.57	4.62	68	0.95	1	56.66	100	85	4.91	53	950	1	0.71	93

## Anexo 2: Segunda Simulação

Método de seleção: Roleta	Pressão seletiva: -
Total de indivíduos: 800	Número de pontos de crossover: 2
Indivíduos selecionados: 1 (par)	Probabilidade de crossover: 96 %
Método de crossover: Múltiplo	Probabilidade de mutação: 4.8 %

Nota	P	Ua	Uexc	Nnc	Nf	La	la	Gtot	ZapN	fioA	cp	Ench.	Dta	wwc	flowp	Dtw	WEP	ppe	fio	Dte
0.7823	12	500	300	1534	1500	130	28.4	4.49	66	0.95	1	54.99	93	75	5.52	42	1850	2	0.5	97
0.7823	12	500	300	1489	1500	130	28.07	5.12	68	1	1	62.29	77	85	4.91	51	950	1	0.71	93
0.7785	12	500	300	1532	1500	130	27.52	5.59	66	1.06	1	67.37	53	75	5.52	39	850	1	0.75	107
0.7823	12	500	300	1534	1500	130	28.4	4.49	66	0.95	1	54.99	93	75	5.52	42	1850	2	0.5	97
0.7593	12	500	300	1539	1500	130	28.16	5.27	70	1	1	64.13	83	85	4.91	52	1200	1	0.63	68
0.7823	12	500	300	1525	1500	130	28.4	4.49	66	0.95	1	54.99	93	75	5.52	42	950	1	0.71	93
0.7822	12	500	300	1531	1500	130	27.34	6.43	68	1.12	1	76.91	44	85	4.91	49	1850	2	0.5	97
0.7190	12	500	300	1584	1500	130	28.33	4.35	64	0.95	1	53.33	87	75	5.52	41	1850	2	0.5	97
0.7823	12	500	300	1474	1500	130	28.57	4.62	68	0.95	1	56.66	100	85	4.91	53	1850	2	0.5	97
0.7644	12	500	300	1554	1500	130	28.57	4.62	68	0.95	1	56.66	100	85	4.91	53	2300	2	0.45	72

### Anexo 3: Terceira Simulação

Método de seleção: Rank	Pressão seletiva: -
Total de indivíduos: 500	Número de pontos de crossover: 3
Indivíduos selecionados: 250 ( pares )	Probabilidade de crossover: 96 %
Método de crossover: Múltiplo	Probabilidade de mutação: 4.8 %

Nota	P	Ua	Uexc	Nnc	Nf	La	la	Peso	ZapN	fioA	cp	Ench.	Dta	wwc	fiowp	Dtw	WEP	ppe	fio	Dte
0.5689	12	500	300	1441	1500	130	26.94	9.71	74	1.32	1	113.91	25	85	4.91	47	1850	2	0.5	97
0.7823	12	500	300	1465	1500	130	28.57	4.62	68	0.95	1	56.66	100	85	4.91	53	950	1	0.71	93
0.7785	12	500	300	1541	1500	130	28.33	4.35	64	0.95	1	53.33	87	75	5.52	41	850	1	0.75	107
0.7823	12	500	300	1474	1500	130	28.57	4.62	68	0.95	1	56.66	100	85	4.91	53	1850	2	0.5	97
0.7822	12	500	300	1491	1500	130	27.2	7.34	70	1.18	1	87.28	37	85	4.91	48	950	1	0.71	93
0.7822	12	500	300	1474	1500	130	27.68	5.92	70	1.06	1	71.45	61	85	4.91	50	1850	2	0.5	97
0.7822	12	500	300	1466	1500	130	27.68	5.92	70	1.06	1	71.45	61	85	4.91	50	950	1	0.71	93

### Anexo 4: Quarta Simulação

Método de seleção: Roleta + fitness	Pressão seletiva: -
Total de indivíduos: 800	Número de pontos de crossover: 3
Indivíduos selecionados: 1 (par)	Probabilidade de crossover: 96 %
Método de crossover: Múltiplo	Probabilidade de mutação: 4.8 %

Fits	P	Ua	Uexc	Nnc	Nf	La	la	Custos	ZapN	fioA	cp	Ench.	Dta	wwc	fiowp	Dtw	WEP	ppe	fio	Dte
0.7823	12	500	300	1575	1500	130	27.52	92785.9	66	1.06	1	67.37	53	75	5.52	39	1850	2	0.5	97
0.7999	12	500	300	1568	1500	130	28.57	92775	62	0.9	1	46.77	103	75	5.52	42	850	1	0.75	107
0.7637	12	500	300	1549	1500	130	28.57	92775.9	64	0.9	1	48.27	110	75	5.52	42	950	1	0.71	93
0.7247	12	500	300	1602	1500	130	28.57	92775	62	0.9	1	46.77	103	75	5.52	42	950	1	0.71	93
0.7785	12	500	300	1514	1500	130	27.97	92783.3	66	1	1	60.46	71	75	5.52	40	850	1	0.75	107
0.6872	12	500	300	1446	1500	130	27.61	92799.2	76	1.12	1	85.95	57	96	4.37	62	1200	1	0.63	88
0.7823	12	500	300	1474	1500	130	28.57	92779.6	68	0.95	1	56.66	100	85	4.91	53	1850	2	0.5	97
0.7823	12	500	300	1525	1500	130	28.4	92780	66	0.95	1	54.99	93	75	5.52	42	950	1	0.71	93
0.7785	12	500	300	1532	1500	130	27.52	92787.6	66	1.06	1	67.37	53	75	5.52	39	850	1	0.75	107
0.7785	12	500	300	1541	1500	130	28.33	92778.9	64	0.95	1	53.33	87	75	5.52	41	850	1	0.75	107

### Anexo 5: Quinta Simulação

Método de seleção: Roleta + fitness	Pressão seletiva: -
Total de indivíduos: 800	Número de pontos de crossover: 3
Indivíduos selecionados: 1 ( par )	Probabilidade de crossover: 96 %
Método de crossover: Múltiplo	Probabilidade de mutação: 4.8 %

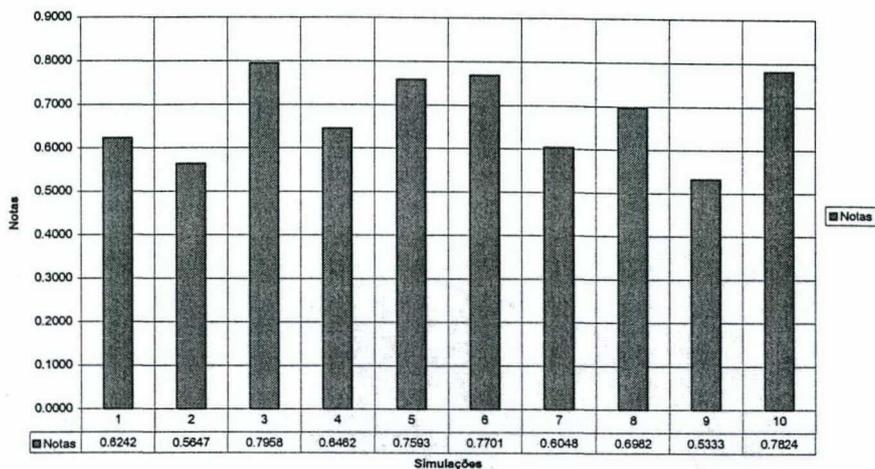
Fits	P	Ua	Uexc	Nnc	La	fioA	cp	Ench.	Dta	wvc	low	Dtw	WEP	ppe	fio	Dte
0,782254	12	500	300	1575	130	1,06	1	67,37	53	75	6	39	1850	2	0,5	97
0,79986	12	500	300	1568	130	0,9	1	46,77	103	75	6	42	850	1	0,75	107
0,763742	12	500	300	1549	130	0,9	1	48,27	110	75	6	42	950	1	0,71	93
0,724682	12	500	300	1602	130	0,9	1	46,77	103	75	6	42	950	1	0,71	93
0,778481	12	500	300	1514	130	1	1	60,46	71	75	6	40	850	1	0,75	107
0,687237	12	500	300	1446	130	1,12	1	85,95	57	96	4	62	1200	1	0,63	68
0,782265	12	500	300	1474	130	0,95	1	56,66	100	85	5	53	1850	2	0,5	97
0,782265	12	500	300	1525	130	0,95	1	54,99	93	75	6	42	950	1	0,71	93
0,778475	12	500	300	1532	130	1,06	1	67,37	53	75	6	39	850	1	0,75	107
0,778486	12	500	300	1541	130	0,95	1	53,33	87	75	6	41	850	1	0,75	107

### Anexo 6: Resultados da simulação genérica

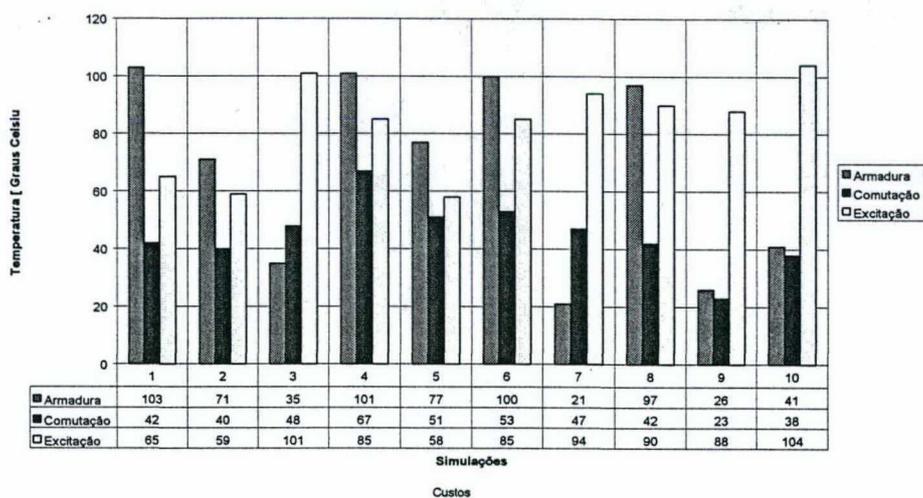
Fits	P	Ua	Uexc	Mnc	ZapN	fioA	cp	Ench.	Dta	wwc	flowp	Dtw	WEP	ppe	fio	Dte	eL	er
0.624191	12	500	300	1565	62	0.9	1	46.77	103	75	5.52	42	2479	2	0.5	65	38.19	5.93
0.564669	12	500	300	1499	66	1	1	60.46	71	75	5.52	40	1328	1	0.71	59	38.54	6.95
0.795836	12	500	300	1547	68	1.18	1	84.79	35	85	4.91	48	1780	2	0.5	101	39.32	6.95
0.646219	12	500	300	1426	76	1	1	69.62	101	96	4.37	67	2050	2	0.45	85	43.59	9.08
0.759295	12	500	300	1563	68	1	1	62.29	77	85	4.91	51	1335	1	0.63	58	40.6	7.18
0.770059	12	500	300	1455	68	0.95	1	56.66	100	85	4.91	53	1024	1	0.71	85	39.69	7.31
0.604832	12	500	300	1554	68	1.32	1	104.68	21	85	4.91	47	1895	2	0.5	94	39.05	6.87
0.698197	12	500	300	1600	60	0.9	1	45.26	97	75	5.52	42	980	1	0.75	90	37.59	5.73
0.533298	12	500	300	1932	54	1.12	1	61.07	26	60	7.07	23	994	1	0.71	88	36.43	4.26
0.782391	12	500	300	1477	66	1.12	1	74.64	41	75	5.52	38	873	1	0.8	104	37.62	6.77

## Anexo 7: Comparação Prática

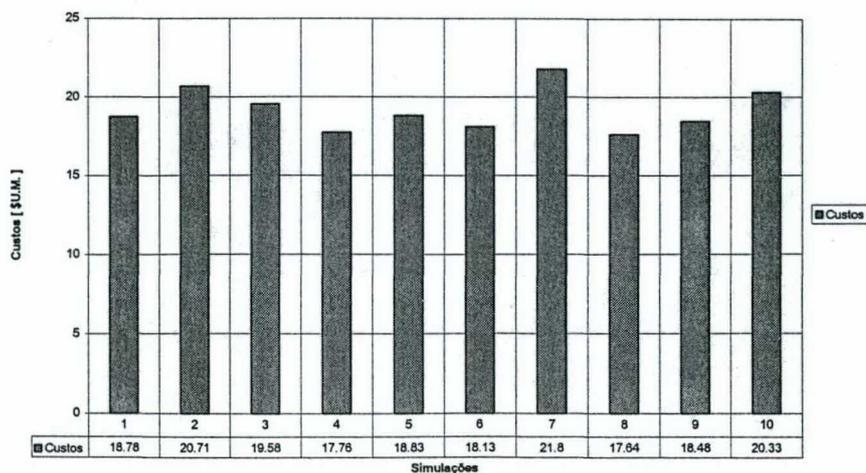
Avaliação das Simulações



Elevação de Temperatura



Custos



## Anexo 8: Dados detalhados

### Dados de entrada

Carcaça IEC: 132  
 Comprimento Mag. Estimado: 180 [ mm ]  
 Potência Nominal: 22.00 [ kW ]  
 Conjugado: 105.05 [ N.m ]  
 Tensão de armadura: 440 [ V ]  
 Tensão de excitação: 190 [ V ]  
 Rotação nominal requerida: 2000 [ rpm ]  
 Rotação nominal calculada: 2072 [ rpm ] - 103.6 percentuais  
 Rotação máxima: 2000 [ rpm ]

### Dados de Calculo

Comprimento da armadura: 180 [ mm ]  
 Rotacao : 2000 [ rpm ]  
 Ia : 55.51 [ A ]  
 Sa : 7.85 [A/mm<sup>2</sup>]  
 Custo : 128446.76 [ \$U.M ]  
 Rendi. : 0.90

### Dados dos condutores da armadura

Cond/Ranh: 34  
 Cond. Tot: 1156  
 Cond. Nu : 1.50 [ mm ]  
 Cond. Par: 1  
 Secao Cu : 1.77 [ mm<sup>2</sup> ]  
 Enchim. : 66.66  
 l<sub>mia</sub> : 360.0  
 dT Armadura : 68

### Dados da comutacao

Numero de espiras: 42  
 Area do fio : 8.64 [ mm<sup>2</sup> ]  
 dT Comutacao: 75

### Dados da excitacao

Numero de espiras: 1200  
 Polos em paralelo: 2  
 Diametro do fio : 0.63 [ mm ]  
 dT Excitacao: 83

### Dados de reatancia

KCW: 1.10 X : 1.16  
 Ln: 0.78 Lz : 1.44 Ls: 0.50  
 Pichel: 3.88  
 er : 3.93 ermax : 6.83  
 eL : 12.94 eLmax : 34.81  
 Lid: 18.30 Van: 17.36  
 AS : 319

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BEASLEY, D.B., David R., MARTIN, R.R. *An Overview of Genetic Algorithms: Part 1, Fundamentals*, University Computing, 1993.
- [2] BITTENCOURT, G. *Inteligência Computacional*, Editora da UFSC, pp 16-17, 1998.
- [3] S. Lin, E. D. GOODMAN, W. E. Punch *A Genetic Algorithm Approach to Dynamic Job Shop Scheduling Problems*, Michigan State University.
- [4] ALONGE F., D'Ippolito F., FERRANTE G., et al. *Parameter identification of induction motor model using genetic algorithms*, IEE Proc.-Control Theory Appl., Vol 145, no. 6, November, 1998.
- [5] BIANCHI N., BOLOGNANI S. *Brushless dc motor design: An optimization procedure based on genetic algorithms*, IEE Conference Publication n. 444, September, 1997
- [6] BIANCHI N., BOLOGNANI S. *Design optimization of electric motors by genetic algorithms*, IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol 145, no 5, September, 1998.
- [7] CHUNG P.Y., DÖLEN M., LORENZ R.D. *Parameter Identification for Induction Machines by Continuous Genetic Algorithms*, ANNIE 2000 Conference, St. Louis, MO, November 5 - 8, 2000
- [8] CHUNG T.K., KIM S.K. *Optimal Pole Shape Design for the Reduction of Cogging Torque of Brushless DC Motor Using Evolution Strategy*, IEEE Transactions on magnetics, Vol. 33, no. 2, March 1997.
- [9] CVETKOVSKI, G., PETKOVSKA, L., CUNDEV, M., GAIR, S., *Optimal Designing of Electrical Machines Using Genetic Algorithms*, COMPUMAG – the 11th Conference on the Computation of Electromagnetic Field, November, 1997.
- [10] NANGSUE, P., PRAGASEN, P., CONRY, S. E., *Evolutionary Algorithms for Induction Motor Parameter Determination*, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 14, no 3, September, 1999.
- [11] SARENI, B. KRÄHENBÜHL, NICOLAS, A., *Niching Genetic Algorithms for Optimization in Electromagnetics I. Fundamentals.*, IEEE Transactions on Magnetics, vol 34, n.5, September, 1998.

- [12]YONG-HWAN O., TAE-KYUNG C., MIN-KYU K., et al. *Optimal Design of Electric Machine using Genetic Algorithms Coupled with Direct Method*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35, no. 3, May 1999.
- [13]GOLDBERG, D. E. *A Meditation on the Application of Genetic Algorithms*, IlliGAL Report no. 98003, February, 1998.
- [14]BEASLEY, D.B., David R., MARTIN, R.R. *An Overview of Genetic Algorithms: Part 2, Research Topics*, University Computing, 1993.
- [15]GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley, 1989.
- [16]MILLER Brad L., GOLDBERG, David E., *Genetic Algorithms, Selection Schemes, and the Varying Effects of Noise*, November, 14, 1995.
- [17]*Genetic Algorithms: Principles, Methods and Algorithms*, Hartmut Pohlheim, Daimler Benz AG, Research and Technology
- [18]MILLER Brad L., GOLDBERG, David E. *Genetic Algorithms, Tournament Selection, and the effects of Noise*, July 12, 1995.
- [19]WHITLEY, D. *A Genetic Algorithm Tutorial*, Computer Science Department, Colorado State University.
- [20]ELECTRO-CRAFT, *DC Motors, Speed Controls and Servo Systems*, third edition, Electro-Craft Corporation, 1975.
- [21]FITZGERALD, A. E. KINGSLEY, C. KUSKO, A. *Máquinas Elétricas*, McGraw Hill do Brasil, 1975.
- [22]SOLARI, C. *La Construzione delle Macchine elettriche*, nona edizione, Editore Ulrico Hoepli Milano, 1952.
- [23]KOSTENKO, M. PIOTROVSKI L. *Máquinas Elétricas*, Edições Lopes da Silva – Porto, Volume I, 1979.
- [24]KOSOW, I. L. *Máquinas Elétricas e Transformadores*, 3ª edição, Editora Globo, Porto Alegre, 1979.
- [25]ALMEIDA, A.T.L. *Máquinas de Corrente Contínua*, IEE/DET- EFEI, 1995.
- [26]CEROVSKY, Z., *Design of Commutation by Means of a Computer, Conference on Commutation in Rotating Machines*, November, 1964.

[27]GRIMSHAW, K. P. *The Electromagnetic Design Problem of Commutation in Direct Current Machines*, Conference on Commutation in Rotating Machines, November, 1964.

[28]TSAPPI, P., SANDERS, G.J., TAYLOR P.L., *A Method of Reducing Sparking in Commutating DC Machines*, Conference on Commutation in Rotating Machines, November, 1964.