



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
TRABALHO DE CONCLUSÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE
E AUTOMAÇÃO

Software para Projeto e Otimização de Máquinas de Indução Trifásicas e Pentafásicas Usando o Matlab

Autor: Rodrigo Lautert Hamester

Orientador: Luís Alberto Pereira

Porto Alegre, dezembro de 2013

Sumário

Sumário	ii
Agradecimentos	iv
Resumo	v
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	vi
Lista de Símbolos	vii
Lista de Abreviaturas e Siglas	viii
1 Introdução	1
2 Materiais e Métodos	2
2.1 Dimensionamento básico de máquinas de indução	2
2.1.1 Dados básicos para dimensionamento	2
2.1.2 Relação Torque Volume e Dimensões principais	4
2.1.3 Entreferro	5
2.1.4 Estator	5
2.1.5 Número de Espiras do Estator	6
2.1.6 Número de Ranhuras e Projeto do Enrolamento	6
2.1.7 Dimensionamento da Coroa do Estator	7
2.1.8 Dimensionamento do Rotor	7
2.1.9 Corrente de Magnetização	9
2.1.10 Cálculo dos parâmetros e recálculo das dimensões	9
2.2 Máquinas Pentafásicas	9
2.3 Modelo Geral da Máquina de Indução	10
2.4 Algoritmos Genéticos	10
3 Desenvolvimento	12
3.1 Descrição do Aplicativo	14
3.2 Estrutura do aplicativo	14
3.2.1 Cálculos preliminares	16
3.2.2 Dados Gerais	16
3.2.3 Limites e Verificação da Consistência de Dados	16
3.2.4 Circuito Magnético	17
3.2.5 Parâmetros Elétricos	17
3.2.5.1 Parâmetros Elétricos do Estator	17
3.2.5.2 Parâmetros Elétricos do Rotor	17
3.2.5.3 Parâmetros Elétricos Transformados	17
3.2.6 Circuito Elétrico	17
3.2.7 Análise a Vazio	17
3.2.8 Curvas típicas de desempenho	18
3.2.9 Análise sob Carga	18
3.2.9.1 Cálculo do Escorregamento	18
3.2.9.2 Dados sob Carga	18
3.2.10 Induções	18
3.2.11 Cálculo de potências e perdas sob carga	18
3.2.11.1 Perdas Mecânicas	18
3.2.11.2 Perdas Joule	18

3.2.11.3	Perdas Magnéticas	19
3.2.11.4	Fator de Potência	19
3.2.11.5	Torques	19
3.2.11.6	Potências	19
3.2.11.7	Densidades de Corrente	19
3.2.12	Cálculos Complementares	19
3.3	Apresentação dos Resultados	19
3.4	Parametrização	20
3.5	Otimização	20
4	Resultados	22
4.1	Cálculo das Máquinas	22
4.1.1	Máquina trifásica	22
4.1.2	Máquina pentafásica	24
4.2	Parametrização	26
4.2.1	Máquina trifásica	26
4.2.2	Máquina pentafásica	27
4.3	Otimização	28
4.4	Comparação dos resultados	28
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	29
6	Referências	31

Agradecimentos

Dedico este trabalho aos meus pais.

Resumo

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo para auxílio no projeto de máquinas de indução trifásicas e pentafásicas. Após apresentar os procedimentos básicos para o projeto de máquinas de indução, é citado o modelo geral da máquina de indução m-fásica utilizado. Também é apresentado o conceito de algoritmos genéticos, utilizados para otimização de problemas.

O aplicativo desenvolvido partiu de uma interface gráfica pré-desenvolvida e se deteve na renovação e reestruturação das rotinas de cálculo da máquina. Além disso, o programa contém um modo de parametrização que executa o cálculo da máquina a partir da varredura de um parâmetro, de forma que são apresentadas curvas de rendimento, fator de potência e torque para possibilitar a seleção do melhor valor para o parâmetro da máquina. Foi incluído um módulo de otimização baseado em uma rotina de algoritmo genético já existente, que coleta os dados de entrada do aplicativo e aplica o algoritmo de acordo com os parâmetros do mesmo e da escolha da função de otimização. São apresentados dois casos de cálculo, um para uma máquina trifásica e um para uma máquina pentafásica. Para cada um dos casos, posteriormente, é executada uma varredura em um dos parâmetros de forma a encontrar um rendimento melhor em relação ao calculado originalmente. Para a máquina pentafásica, também é aplicado o módulo de otimização para obter uma solução na qual são modificados diversos parâmetros simultaneamente para que seja obtida a melhor resposta para o rendimento da máquina ou menor custo, ou ainda usar uma função ponderada de ambos. Ao final são apresentadas as comparações dos resultados.

O objetivo principal é obter um software para auxílio no projeto de máquinas de indução trifásicas e pentafásicas. Através do mesmo, é possível, a partir de parâmetros de partida, calcular a máquina para obter os resultados de grandezas fundamentais e de desempenho da máquina, de forma a verificar a necessidade de alteração de algum parâmetro de projeto. Através da parametrização é possível obter o melhor aproveitamento do material, alterando características geométricas ou de dimensionamento da máquina. Além disso, o vínculo com o módulo de otimização permite, a partir dos dados de entrada previamente fornecidos, buscar as melhores configurações possíveis para um objetivo escolhido através da variação simultânea de diversos parâmetros da máquina, gerando uma resposta possível de ser recalculada para representar os resultados da máquina baseados no modelo utilizado.

Ao mesmo tempo, deseja-se que a ferramenta também seja robusta, apresentando resultados coerentes, não permitindo uma configuração inadequada da máquina. Assim, são reduzidas as possibilidades de respostas que não sejam coerentes ou de projetos que não possam ser de fato construídos devido a limitações dos processos de fabricação.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Identificação das partes do estator	3
Figura 2.2: Identificação das partes do rotor	3
Figura 3.1: Interface de entrada de dados	12
Figura 3.2: Aba de curvas na interface de resultados	14
Figura 3.3: Estrutura do programa	15
Figura 3.4: Janela de erro	16
Figura 3.5: Interface de resultados da parametrização	20
Figura 4.1: Desenho do estator da máquina trifásica	23
Figura 4.2: Desenho do rotor da máquina trifásica.....	23
Figura 4.3: Desenho do estator da máquina pentafásica dado pelo software	25
Figura 4.4: Desenho do rotor da máquina pentafásica dado pelo software	25
Figura 4.5: Curvas de parametrização da máquina trifásica	26
Figura 4.6: Curvas de parametrização da máquina pentafásica	27

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Combinações aconselhadas para número de ranhuras	8
Tabela 3.1: Descrição dos parâmetros de entrada do aplicativo	13
Tabela 3.2: Dados principais de entrada do algoritmo genético	21
Tabela 4.1: Dados de entrada da máquina trifásica.....	22
Tabela 4.2: Aspectos gerais da máquina trifásica	24
Tabela 4.3: Dados de entrada da máquina pentafásica	24
Tabela 4.4: Aspectos gerais da máquina pentafásica.....	26
Tabela 4.6: Aspectos gerais da máquina pentafásica parametrizada.....	28
Tabela 4.7: Aspectos gerais da máquina pentafásica otimizada.....	28
Tabela 4.8: Comparação dos rendimentos obtidos	29

Lista de Símbolos

- A - Densidade linear de corrente eficaz
 B_s - Indução máxima admitida no estator
 B_δ - Indução máxima no entreferro
 $\cos(\varphi)$ - Fator de potência
D - Diâmetro do rotor
E - Tensão induzida
f - Frequência da rede
 h_s - Altura da coroa do estator
 I_{ar} - Corrente em um anel do rotor
 I_{br} - Corrente em uma barra do rotor
 i_{br} - Corrente em uma barra do rotor
 I_m - Corrente de magnetização
J - Densidade de corrente
 J_{ar} - Densidade de corrente de um anel do rotor
 J_{br} - Densidade de corrente em uma barra do rotor
 K_c - Fator de Carter
 K_{d1} - Fator de distribuição
 K_e - Fator de tensão induzida
 K_{es} - Fator de enchimento
 K_f - Fator de forma
 K_{p1} - Fator de encurtamento de passo
 K_s - Fator de saturação
 K_{sd} - Fator de saturação
 K_{w1} - Fator de enrolamento
l - Comprimento do pacote de chapas
 N_r - Número de ranhuras do rotor
 N_s - Número de ranhuras do estator
 N_w - Número de espiras conectadas em série em uma fase
p - número de pares de polos
 P_m - Potência mecânica
q - Número de ranhuras por polo e fase
R - Raio do rotor
 S_{ar} - Seção de um anel do rotor
 S_{br} - Seção de uma barra do rotor
 S_i - Potência aparente interna
 S_n - Área da ranhura do estator
T - Torque mecânico
 U_{dr} - Tensão magnética nos dentes do rotor
 U_{ds} - Tensão magnética nos dentes do estator
 U_o - Tensão magnética no entreferro
 V_a - Volume ativo
 α_i - Fator de correção de saturação
 α_{nr} - Relação entre a corrente de uma barra e de um anel do rotor
 δ - Entreferro
 η - Rendimento
 λ - Relação do passo polar com o número de polos da máquina
 μ_o - Permeabilidade magnética do ar
 τ_p - Passo polar

φ - Ângulo de fase

ϕ_p - Fluxo que atravessa um polo do estator

ϕ_s - Fluxo que atravessa o estator

ω_m - Velocidade angular mecânica

Lista de Abreviaturas e Siglas

- AG – Algoritmo Genético
- Alum. – Alumínio
- Arred. – Arredondada
- FP – Fator de Potência
- GUIDE – Graphic User Interface Design Environment
- MI – Máquina de Indução
- Par. – Parâmetro
- UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- Unid. - Unidade

1 Introdução

As máquinas de indução são as mais utilizadas na indústria atualmente devido principalmente à sua construção robusta. Nos dias atuais, com o desenvolvimento dos inversores de frequência, a aplicação de máquinas de indução tornou-se ainda maior, pois em casos em que são necessárias variações de velocidade seu uso também se tornou possível.

Outro benefício dos inversores de frequência é a possibilidade de utilização de máquinas de indução pentafásicas, as quais possuem uma forma de onda de indução mais próxima à retangular, que pode conduzir a um aumento no torque para um mesmo volume ativo.

Diversos pontos podem resultar em alterações dos parâmetros da máquina durante o projeto. De acordo com a aplicação, pode ser necessário que a máquina de indução possua torques mais elevados para a partida ou uma limitação de corrente na partida em função dos condutores empregados. Em indústrias de produção de motores em larga escala, entretanto, fatores como o volume de cobre e o volume de alumínio utilizado na fabricação das máquinas de indução trifásicas e pentafásicas pode significar elevadas economias de capital para a empresa. Em um lote de grande porte, uma pequena parcela de economia de material pode vir a acarretar em uma grande economia para a empresa. Assim, a otimização de parâmetros geométricos e a utilização do número mais adequado de ranhuras no rotor ou no estator de uma máquina pode acarretar em um melhor aproveitamento do material utilizado, sem resultar em prejuízos no desempenho pretendido para a mesma. Além disso, nos dias de hoje, a energia é um bem cada vez mais valioso. Dessa forma, máquinas que apresentem um melhor rendimento são tendência de âmbito global em um ambiente voltado à sustentabilidade.

Para projetos de máquinas, é necessário avaliar diversas alternativas, de forma a verificar o atendimento das especificações de projeto. Dessa forma, um modelo que calcule parâmetros da máquina a partir de dados básicos de projeto é muito importante. Os métodos utilizados atualmente, como elementos finitos e outros métodos numéricos podem se tornar de difícil resolução e acabar por levar muito tempo para se plotar resultados. Métodos analíticos como o abordado neste trabalho tem a sua devida importância, pois apresentam resultados consistentes e que são obtidos de forma rápida.

Os modelos matemáticos são muito úteis para avaliar o projeto e o desempenho de máquinas de indução. O modelo utilizado neste trabalho leva em consideração o terceiro harmônico na indução no entreferro, o qual pode trazer aumentos de desempenho através do acréscimo de torque à máquinas de indução pentafásicas.

Para obter um melhor aproveitamento do material e um melhor desempenho da máquina, podem ser utilizados desde métodos simples à métodos mais modernos de otimização. Uma simples varredura de um determinado parâmetro pode gerar uma curva que demonstre a variação do desempenho da máquina de forma a ser possível escolher o melhor valor para aquela característica da máquina. Métodos de otimização clássicos ou métodos heurísticos também podem ser utilizados de forma a obter geometrias mais favoráveis para determinada configuração desejada de máquina.

Os algoritmos genéticos, por sua vez, podem ser utilizados de forma a obter uma geometria ótima de uma máquina para obter o melhor resultado para diversos parâmetros simultaneamente. Desta forma, para determinados dados iniciais de projeto, o algoritmo pode fazer uma busca para que sejam encontradas as melhores soluções e configurações da máquina para determinado critério ou até mais de um critério simultaneamente.

2 Materiais e Métodos

Os assuntos abordados em materiais e métodos são projeto de máquinas, modelo da máquina e algoritmos genéticos.

2.1 Dimensionamento básico de máquinas de indução

As máquinas abordadas neste trabalho são trifásicas e pentafásicas de baixa e média potência, isto é, potências inferiores a 100kW, e baixa tensão, tensão abaixo de 600V (Boldea & Nasar, 2010). Rotores bobinados não são considerados, sendo considerados apenas rotores do tipo gaiola. A partir de equações básicas é possível determinar as dimensões básicas de partes ativas principais do rotor e do estator, enrolamentos e partes ferromagnéticas.

2.1.1 Dados básicos para dimensionamento

Existem alguns pontos chave que são levados em consideração durante o projeto da máquina. Estes dados podem sair de especificações que variam de acordo com a aplicação da máquina.

- potência nominal
- velocidade síncrona
- tensão nominal
- número de fases
- frequência
- rendimento
- fator de potência
- relação entre torque nominal e torque máximo
- torque de partida
- corrente de partida
- tipo de refrigeração
- grau de proteção
- condições do ambiente
- fator de serviço

Para o projeto de máquinas, devem ser dimensionadas as principais partes do rotor e do estator, entre as quais estão as ranhuras, os dentes e a coroa. A seguir seguem as figuras com a identificação das partes básicas constituintes da máquina:

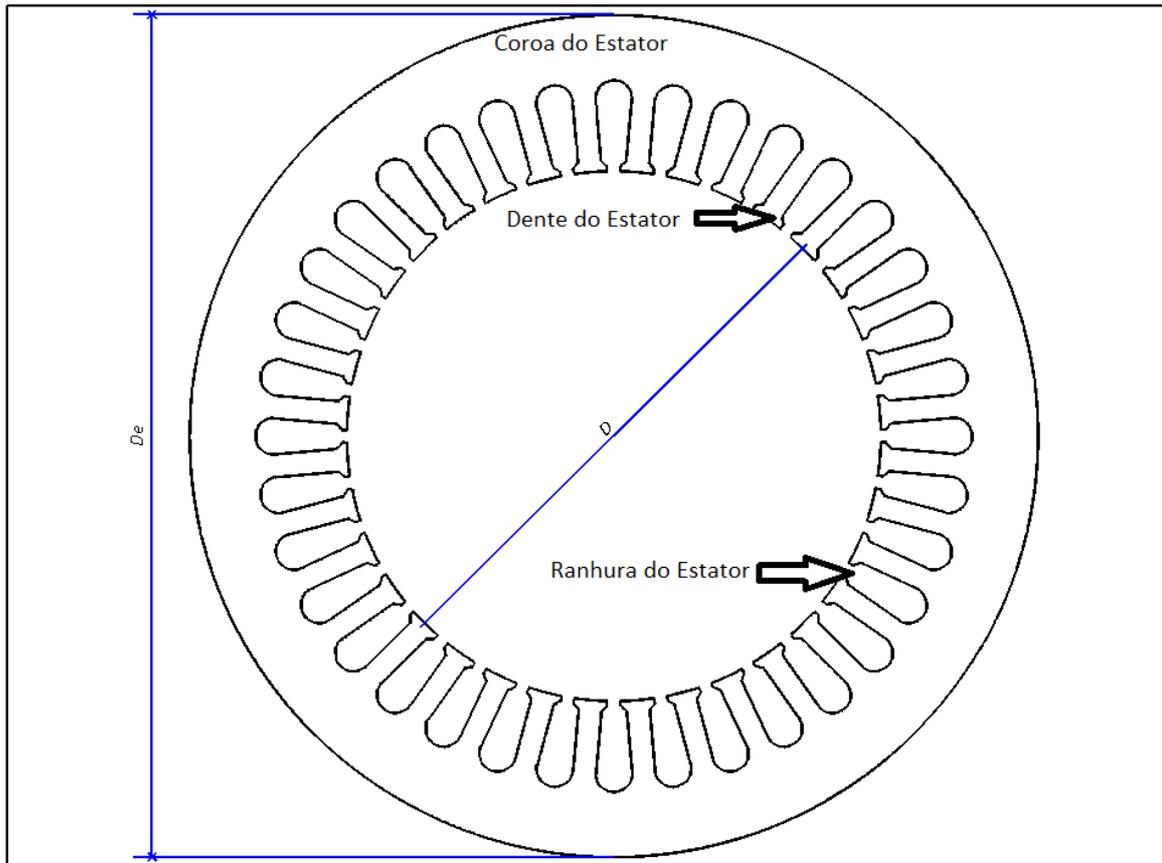


Figura 2.1: Identificação das partes do estator

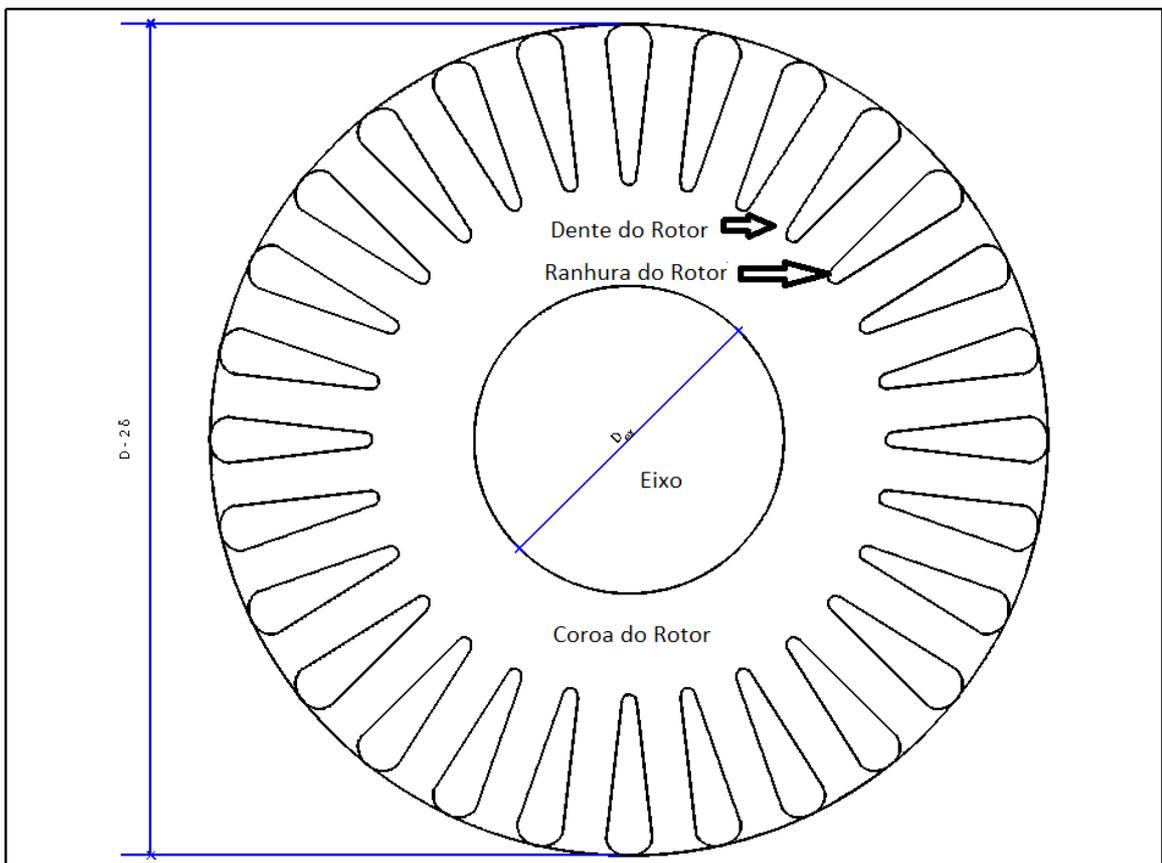


Figura 2.2: Identificação das partes do rotor

A partir destas partes básicas, parte-se para o dimensionamento da máquina.

2.1.2 Relação Torque Volume e Dimensões principais

O dimensionamento de uma máquina de indução parte da potência mecânica (P_m) que deverá ser fornecida no eixo de saída. A potência aparente interna da máquina depende da indução e do fluxo resultante no entreferro e, por isso, é menor que a potência retirada da rede. O fator de potência ($\cos(\phi)$) e o rendimento (η) desejados também são pontos de partida para o dimensionamento. Estes valores podem ser obtidos de curvas típicas de fabricantes ou de normas. Assim, parte-se da potência aparente interna da máquina. A expressão é dada por:

$$S_i = K_e \cdot \frac{P_m}{\eta \cdot \cos(\phi)} \quad (2.1)$$

Segundo (Boldea & Nasar, 2010), o valor da constante K_e é dado por:

$$K_e = 0,98 - 0,005 \cdot p \quad (2.2)$$

Em que p é o número de pares de polos da máquina.

A partir da potência aparente interna e da velocidade angular mecânica (ω_m), pode-se definir o torque:

$$T = \frac{S_i}{\omega_m} \quad (2.3)$$

Assim, a partir do Tensor de Maxwell (Schuisky, 1960), pode-se obter uma relação para o volume ativo:

$$V_a = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot l}{4} \quad (2.4)$$

Em que D é o diâmetro do rotor e l é o comprimento do pacote de chapas.

A partir disto, pode ser determinado o volume de material necessário, a partir do que é apresentado em (Schuisky, 1960) e (Müller et al., 2007), utilizando-se o passo polar (τ_p), o raio do rotor (R), o número de pares de pólos e o comprimento l :

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot R}{p} \quad (2.5)$$

$$\lambda = \frac{l}{\tau_p} \quad (2.6)$$

O valor λ representa a relação do passo polar com o número de pólos da máquina. Valores típicos são apresentados em (Müller et al., 2007), (Richter, 1954) e (Boldea & Nasar, 2010).

2.1.3 Entreferro

O dimensionamento do entreferro leva em conta a obtenção da menor corrente de magnetização possível e maiores rendimento e fator de potência. A limitação da dimensão do entreferro se deve a fatores do processo de fabricação e da resistência mecânica.

(Boldea & Nasar, 2010) e (Müller et al., 2007) apresentam expressões para a dimensão do entreferro em função da potência mecânica da máquina como a que segue:

$$\delta \cong (0,1 + 0,012 \cdot \sqrt[3]{P_m}) \quad (2.7)$$

2.1.4 Estator

O dimensionamento do estator para máquinas de indução é semelhante ao dimensionamento do estator de máquinas síncronas. O ponto de partida para o dimensionamento das partes ferromagnéticas é o fluxo sob um polo da máquina. Para um melhor aproveitamento do material, máquinas de indução costumam operar com certo grau de saturação para obter um melhor aproveitamento de material (Pereira, 2011c). Deste modo, a onda de indução apresenta uma forma de onda mais achatada em relação a uma senóide perfeita. Considerando uma indução máxima adotada para o entreferro (B_δ), o fluxo que atravessa um pólo (Φ_p) será dado por:

$$\Phi_p = \alpha_i \cdot l \cdot B_\delta \cdot \tau_p \quad (2.8)$$

Os valores para fator de correção α_i são apresentados em (Boldea & Nasar, 2010).

O fator de saturação K_{sd} é dado pela soma das tensões magnéticas nos dentes do rotor, do estator e do entreferro, conforme a expressão:

$$K_{sd} = \frac{U_{ds} + U_{dr} + U_o}{U_o} \quad (2.9)$$

Em que U_{ds} é a tensão magnética nos dentes do estator, U_{dr} é a tensão magnética nos dentes do rotor e U_o é a tensão magnética no entreferro.

O fator de saturação varia entre 1,3 e 1,5, podendo-se assumir um valor de 1,4 para dimensionamento (Pereira, 2011c).

2.1.5 Número de Espiras do Estator

O número de espiras necessário no estator é determinado a partir da tensão induzida (E). Este valor pode ser determinado a partir do circuito elétrico equivalente da máquina, a partir da tensão nominal de alimentação, sendo descontadas as quedas de tensão na resistência do estator e na reatância de dispersão. Como os dados de resistências e reatâncias de dispersão da máquina ainda não podem ser determinados, o valor da tensão induzida pode ser aproximado pela expressão que segue:

$$E=4 \cdot K_f \cdot K_{w1} \cdot N_w \cdot \Phi_p \cdot f \quad (2.10)$$

$$K_{w1}=K_{d1} \cdot K_{p1} \quad (2.11)$$

Em que K_f é o fator de forma, K_{w1} é o fator de enrolamento, N_w é o número de espiras conectadas em série em uma fase, e f é a frequência da rede. Os valores típicos das constantes são apresentados em (Pereira, 2011c).

Assim, o número de espiras conectados em série em uma fase é dado pela expressão:

$$N_w = \frac{E}{4 \cdot K_f \cdot K_{w1} \cdot \Phi_p \cdot f} \quad (2.12)$$

Após, o valor deve ser ajustado para um número inteiro para que seja compatível com o enrolamento e o número de ranhuras por polo e fase (q).

2.1.6 Número de Ranhuras e Projeto do Enrolamento

O número de ranhuras do estator leva em conta outras características como número de camadas utilizadas, número de ranhuras por polo e fase e passo do enrolamento. A restrição básica para a escolha do número de ranhuras é a redução de campos harmônicos no entreferro. Além disso, as dimensões mínimas possíveis de serem fabricadas devem ser levadas em conta, não devendo ser utilizados dentes muito estreitos, menor que 3,5mm segundo (Pereira, 2011c).

Para máquinas de baixa tensão, é preferível a utilização de dentes retos, o que possibilita uma distribuição uniforme quanto à saturação do dente. Além disso, a seção de fios utilizada para este grupo de máquinas é, em geral, circular. Devido aos isolantes utilizados e à própria geometria do condutor, existe um fator de enchimento da ranhura, que representa o percentual da área de fato ocupado por condutores. Segundo (Boldea & Nasar, 2010) este fator varia de 0,35 a 0,40 para máquinas com potência inferior a 10kW e de 0,40 a 0,44 para máquina acima desta potência.

A relação da altura e largura da ranhura também deve ser limitada, não devendo ser superior a 6, nem inferior a 3. Ainda conforme (Boldea & Nasar, 2010), deve ser respeitada a faixa de 3 a 8 A/mm² para a densidade de corrente. A partir da escolha da densidade de corrente (J) e do fator de enchimento (K_{es}) e da densidade linear de corrente eficaz (A) pode ser determinada a área da ranhura (S_n) (Pereira, 2011a).

$$S_n = \frac{A \cdot \tau_n}{K_{es} \cdot J} \quad (2.13)$$

2.1.7 Dimensionamento da Coroa do Estator

Para dimensionar a coroa, deve ser considerado o fluxo que a atravessa. Esse fluxo é o mesmo que atravessa o entreferro somado a uma parcela de dispersão. Conforme (Pereira, 2011c), pode-se considerar uma dispersão de 6%, e o fluxo (ϕ_s) será dado por:

$$\phi_s \cong 1,06 \cdot \frac{\phi_p}{2} = 0,53 \cdot \phi_p \quad (2.14)$$

Em que ϕ_p é o fluxo que atravessa um polo.

A partir de uma indução máxima admitida (B_s), a altura da coroa será calculada por:

$$h_s = \frac{0,53 \cdot \phi_p}{l \cdot B_s} \quad (2.15)$$

2.1.8 Dimensionamento do Rotor

A principal característica para dimensionamento do rotor é a relação entre o número de ranhuras do estator (N_s) e do rotor (N_r). A fim de evitar torques parasitas, existem algumas regras básicas para a escolha do número de ranhuras do rotor segundo (Müller et al., 2007).

a) redução de torques assíncronos

$$N_r \leq 1,25 \cdot N_s \quad (2.16)$$

b) redução de torques síncronos

$$N_r \neq N_s \quad (2.17)$$

$$N_r \neq N_s \pm 2 \cdot p \quad (2.18)$$

c) redução de torques de vibração

$$N_r \neq N_s \quad (2.19)$$

$$N_r \neq N_s \pm 1 \quad (2.20)$$

$$N_r \neq N_s \pm (2 \cdot p \pm 1) \quad (2.21)$$

(Boldea & Nasar, 2010) apresentam uma tabela com outras combinações aconselhadas (tabela 2.1):

Tabela 2.1: Combinações aconselhadas para número de ranhuras

2p	N _s	N _r
2	24	18, 20, 22, 28, 30, 33, 34
	36	25, 27, 28, 29, 30, 43
	48	30, 37, 39, 40, 41
4	24	16, 18, 20, 30, 33, 34, 35, 36
	36	28, 30, 32, 34, 45, 48
	48	36, 40, 44, 57, 59
	72	42, 48, 54, 56, 60, 61, 62, 68, 76
6	36	20, 22, 28, 44, 47, 49
	54	34, 36, 38, 40, 44, 46
	72	44, 46, 50, 60, 61, 62, 82, 83
8	48	26, 30, 34, 35, 36, 38, 58
	72	42, 46, 48, 50, 52, 56, 60
12	72	69, 75, 80
	90	86, 87, 93, 94

A seção das barras e do anel é determinada a partir da relação entre as correntes do estator e do rotor e da densidade de corrente admitida nos mesmos. Assim, a partir da corrente na barra (I_{br}) a seção da barra (S_{br}) é dada por:

$$I_{br} \cong \frac{6 \cdot K_{w1} \cdot N_w \cdot \cos(\phi)}{N_r} \cdot I \quad (2.22)$$

$$S_{br} = \frac{I_{br}}{J_{br}} \quad (2.23)$$

A relação entre a corrente da barra e do anel (α_{nr}) é dada por:

$$\alpha_{nr} = \frac{2 \cdot \pi \cdot p}{N_r} \quad (2.24)$$

E a corrente no anel será:

$$I_{ar} = \frac{I_{br}}{2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{nr}}{2}\right)} \quad (2.25)$$

Assim, a seção será dada por:

$$S_{ar} = \frac{I_{ar}}{J_{ar}} \quad (2.26)$$

Segundo (Boldea & Nasar, 2010), a densidade de corrente do anel é de 75 a 80% da densidade de corrente da barra.

2.1.9 Corrente de Magnetização

A corrente de magnetização I_m tem influência importante sobre o fator de potência e o rendimento da máquina. Para determinar esta corrente, conforme (Pereira, 2011c), é utilizada a expressão:

$$I_m = \frac{B_\delta \cdot \pi \cdot p \cdot K_c \cdot K_s \cdot \delta}{\mu_o \cdot 3 \cdot \sqrt{2} \cdot N_w \cdot K_{w1}} \quad (2.27)$$

Na qual μ_o é a permeabilidade magnética do ar e K_c é o fator de Carter que surge devido ao fato de que a presença de ranhuras no estator e no rotor criam uma deformação na indução no entreferro. Assim, a relutância no entreferro aumenta. Esse efeito é considerado através do cálculo do entreferro efetivo, o qual é obtido a partir do fator de Carter.

$$K_c = \frac{\tau_n}{\tau_n - x \cdot b_o} \quad (2.28)$$

$$x = \frac{\left(\frac{b_o}{\delta_o}\right)}{5 + \frac{b_o}{\delta_o}} \quad (2.29)$$

Dessa forma, o entreferro corrigido será dado pelo produto do entreferro real com o fator de Carter e do fator de saturação.

O fator K_s é o fator de saturação, e é obtido a partir das quedas de tensão no circuito magnético da máquina, dado por:

$$K_s = \frac{\sum U_n}{U_o} \quad (2.30)$$

O cálculo detalhado de todas as tensões pode ser encontrado em (Pereira, 2011b).

2.1.10 Cálculo dos parâmetros e recálculo das dimensões

Após a definição das dimensões principais, deve-se calcular os parâmetros da máquina para determinar, através de modelos, a performance da máquina, tanto a vazio como sob carga. Desta forma, é possível alterar os parâmetros previamente estabelecidos a fim de atingir o desempenho pretendido. Pode-se também utilizar a varredura de parâmetros e métodos de otimização para obter o melhor valor para um determinado parâmetro da máquina para que dada condição de projeto seja satisfeita.

2.2 Máquinas Pentafásicas

A crescente aplicação de inversores de frequência na indústria possibilita cada vez mais o aumento do uso de máquinas de indução para aplicações em que é necessária

variação de velocidade. Além deste benefício, os conversores estáticos também possibilitam o emprego de máquinas de indução com número de fases diferente da rede elétrica disponível. Máquinas pentafásicas são bons exemplos desta aplicação.

As máquinas pentafásicas possuem como principais benefícios o aumento de torque e maior confiabilidade. O aumento de torque se deve à mudança na distribuição do campo no entreferro, que possui uma forma de onda mais parecida à retangular, diferente da máquina trifásica que apresenta geralmente uma distribuição senoidal achatada (Pereira et al., 2006). A maior confiabilidade se deve ao fato de máquinas pentafásicas poderem operar mesmo com falha de uma ou duas fases.

Além disso, em máquinas pentafásicas existe a possibilidade de se empregar a terceira harmônica da indução para gerar torque útil, gerando um acréscimo ao torque nominal de saída na máquina.

2.3 Modelo Geral da Máquina de Indução

O modelo utilizado para representar as máquinas de indução trifásicas e pentafásicas utilizado neste trabalho considera os efeitos da fundamental e também do terceiro harmônico de campo. Neste modelo, é obtido um desacoplamento entre os campos de forma a serem representados independentemente. Este modelo pode ser estendido para máquinas com número arbitrário de fases. Este modelo foi retirado de (Pereira et al., 2004a), (Pereira et al., 2004b), (Pereira et al., 2006), (Pereira et al., 2009) e (Pereira et al., 2012).

2.4 Algoritmos Genéticos

A otimização do projeto de máquinas de indução é um problema muito complexo, tendo em vista que possui diversos objetivos simultâneos, como, por exemplo, redução do volume de material utilizado juntamente com aumento do rendimento. Para resolver estes tipos de problemas, algoritmos evolucionários, dentro dos quais se encaixam os algoritmos genéticos têm sido desenvolvidos em diversas aplicações de engenharia.

Algoritmos genéticos são algoritmos de busca baseados na genética e na teoria Darwiniana. São algoritmos iterativos que reproduzem um modelo simplificado de evolução das espécies. A partir de uma população, é associado a cada indivíduo, que é correspondente à uma solução do problema, um valor de adequabilidade (fitness), que determina as chances de sobrevivência deste indivíduo. Após um processo de seleção, os indivíduos que restaram são recombinados para obter uma nova população para que seja repetido o processo. Desta forma, a cada iteração pode ser obtido, em média, um melhor valor de adequabilidade para a população.

Desta forma, um algoritmo Genético é um processo interativo que busca soluções candidatas em uma população, que são classificadas após cada nova geração de forma a buscar a solução mais apta à sobrevivência. Assim, cada nova população é gerada utilizando-se operadores genéticos como reprodução (seleção), cruzamento (recombinação) e mutação, conforme (Grefenstette, 1993) e (Goldberg, 1989).

Alguns parâmetros influenciam fortemente o desempenho dos algoritmos genéticos, dentre eles:

- tamanho da população inicial
- probabilidade de cruzamento
- probabilidade de mutação

Em (De Jong, 1975) e (Grefenstette, 1986) são sugeridos alguns valores para estes parâmetros. A população inicial pode ser gerada de diversas formas, como, por exemplo, geração aleatória, geração determinística ou segmentação do espaço de parâmetros.

Algoritmos genéticos podem ser aplicados em diversos tipos de problemas devido à sua robustez. (Wainwright & Sekharan, 1993) citam algumas classes de problemas em que podem ser utilizados AGs, como problemas de projeto, problemas de controle, problemas de aprendizado de máquinas, problemas combinatoriais, problemas de processamento de imagens e problemas médicos.

3 Desenvolvimento

Em projetos de máquinas, a parte final do projeto, após a definição dos parâmetros principais, consiste na avaliação dos resultados do desempenho da máquina projetada. Desta forma, é possível determinar se os requisitos de projeto foram atingidos ou verificar a necessidade da alteração de parâmetros da máquina de forma a buscar um melhor desempenho ou aproveitamento de material. A seguir será apresentada a ferramenta desenvolvida e que pode ser aplicada a esta etapa do projeto.

O programa desenvolvido no trabalho é baseado em um aplicativo já existente. Esse programa contém uma interface gráfica para realizar os cálculos da máquina baseados em características e parâmetros de projeto pré-calculados. A interface gráfica foi desenvolvida com a ferramenta GUIDE (Graphic User Interface Design Environment) do Matlab por Samuel de Oliveira Carvalho, graduando em engenharia elétrica, no projeto de iniciação científica “Desenvolvimento de um Aplicativo para Análise de Máquinas de Indução Pentafásicas usando o Matlab” no ano de 2011 na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob orientação do professor Luís Alberto Pereira.

Através desta interface, são acionadas as rotinas de desenho, cálculo, demonstração de resultados, gráficos e a função de parametrização. A interface de entrada de dados é mostrada na Figura 3.1.

Figura 3.1: Interface de entrada de dados

Os parâmetros de entrada para cálculo com suas respectivas descrições são mostrados na Tabela 3.1 a seguir:

Tabela 3.1: Descrição dos parâmetros de entrada do aplicativo

Símbolo	Descrição
b_{ar}	Largura do anel do rotor
b_{or}	Abertura da ranhura do rotor
b_{os}	Abertura da ranhura do estator
BVI	Tipo de cálculo
b_{3r}	Largura da ranhura no fim da região contendo condutores-rotor
b_{3s}	Largura da ranhura no fim da região contendo condutores-estator
D	Diâmetro interno do estator
D_e	Diâmetro externo da máquina
d_{f1}	Diâmetro do fio 1 do estator
d_{f2}	Diâmetro do fio 2 do estator
δ	Entreferro
D_{ex}	Diâmetro do eixo
f	Frequência nominal
G_p	Ramos em paralelo do enrolamento
h_{ar}	Altura do anel do rotor
h_{or}	Altura do canal de saída da ranhura do rotor
h_{os}	Altura do canal de saída da ranhura do estator
h_{1r}	Altura da região contendo condutores do rotor
h_{3r}	Altura da região inclinada de saída do rotor
h_{3s}	Altura da região inclinada de saída do estator
K_{ep}	Fator de empilhamento (chapas)
K_{pn}	Porcentagem da potencia nominal (carga)
K_{tr}	Fator de temperatura para resistências do rotor
K_{ts}	Fator de temperatura para resistências do estator
K_{vn}	Porcentagem da tensão nominal aplicada no estator
K_{31}	Relação entre a terceira harmônica e a fundamental
l_p	Comprimento do pacote de chapas
m	Número de fases
N_c	Número de camadas do enrolamento
N_{f1}	Número de fios em paralelo com diâmetro $df1$
N_{f2}	Número de fios em paralelo com diâmetro $df2$
N_{ir}	Inclinação das ranhuras do rotor em número de ranhuras
N_r	Número de ranhuras do rotor
p	Número de polos
P_n	Potência nominal
q	Número de bobinas por polo e fase do estator
ρ_r	Resistividade do material do enrolamento do rotor
ρ_s	Resistividade do material do enrolamento do estator
T_{Chp}	Tipo de chapa
T_{ran}	Tipo de ranhura
V_n	Tensão nominal
W_{bs}	Número de espiras por bobina
Y_b	Passo médio do enrolamento em número de ranhuras

3.1 Descrição do Aplicativo

Foi constatado que o programa existente apresentava diversos erros que geravam travamento e alguns resultados incoerentes. Estes erros se deviam principalmente a erros nas rotinas de cálculo. Assim, as mesmas foram substituídas, tendo como base uma rotina mais atual já implementada. Juntamente com a atualização, foi feita uma nova divisão das rotinas em diversas sub-rotinas. Com isso, foi necessário que a estrutura de funcionamento do programa fosse alterada. Isso acabou gerando também um benefício, visto que os cálculos se tornaram mais rápidos, sendo que anteriormente diversos cálculos eram realizados mais de uma vez. Além disso, rotinas que eram muito semelhantes foram transformadas em rotinas únicas, tendo diferença apenas no momento em que a função é chamada, buscando apenas os parâmetros que interessam.

Outra alteração foi na interface de resultados, em que foram criados dois novos botões e adicionada uma função a um botão que já existia, mas não era utilizado. Dessa forma, na nova versão são mostradas as curvas de desempenho da máquina para diversos pontos de operação e também é possível fazer a chamada do método de otimização diretamente desta janela. A interface de resultados é mostrada na Figura 3.2.

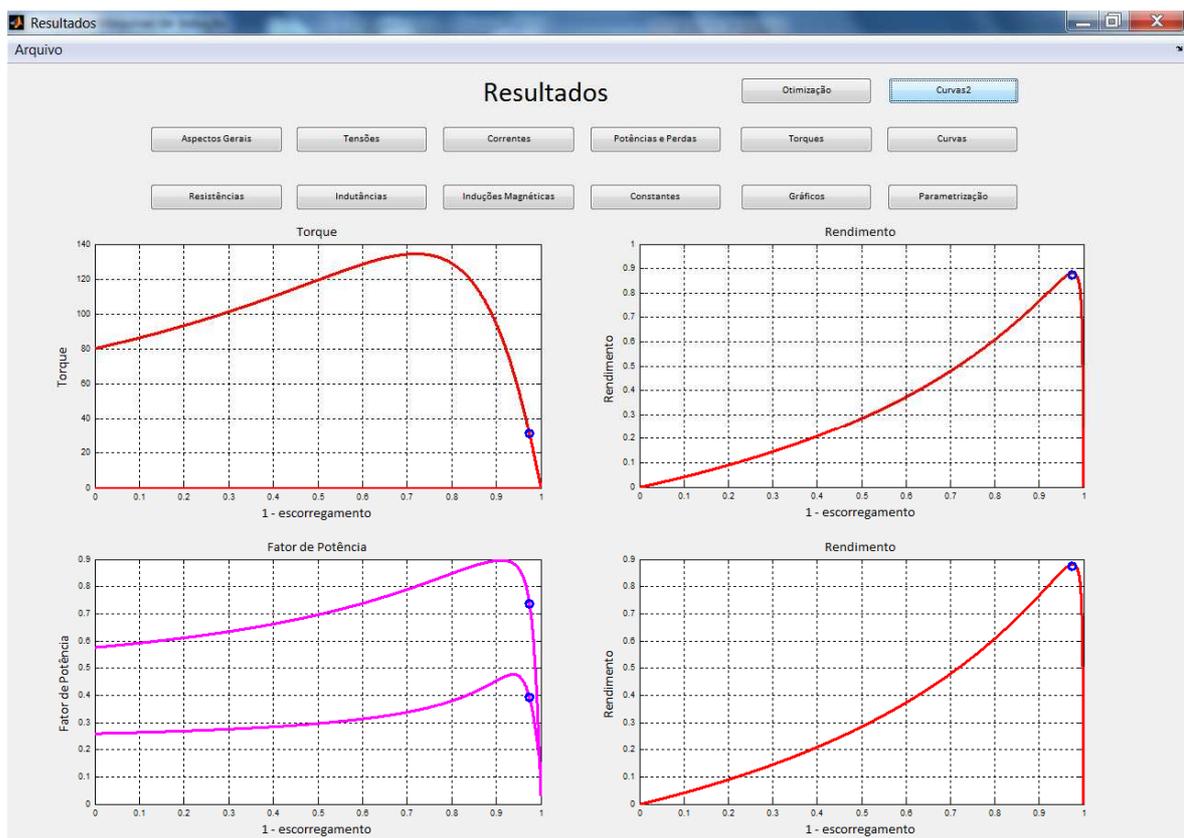


Figura 3.2: Aba de curvas na interface de resultados

3.2 Estrutura do aplicativo

Para facilitar a manutenção e a depuração de erros, o aplicativo foi dividido em diversas sub-rotinas, cada qual responsável por uma parte do cálculo da máquina. A seguir é apresentado um esquemático da estrutura de funcionamento do programa, em que são mostradas as rotinas de interfaces gráficas que chamam as rotinas principais de cálculo, bem como as sub-rotinas, traçado de gráficos, parametrização e otimização.

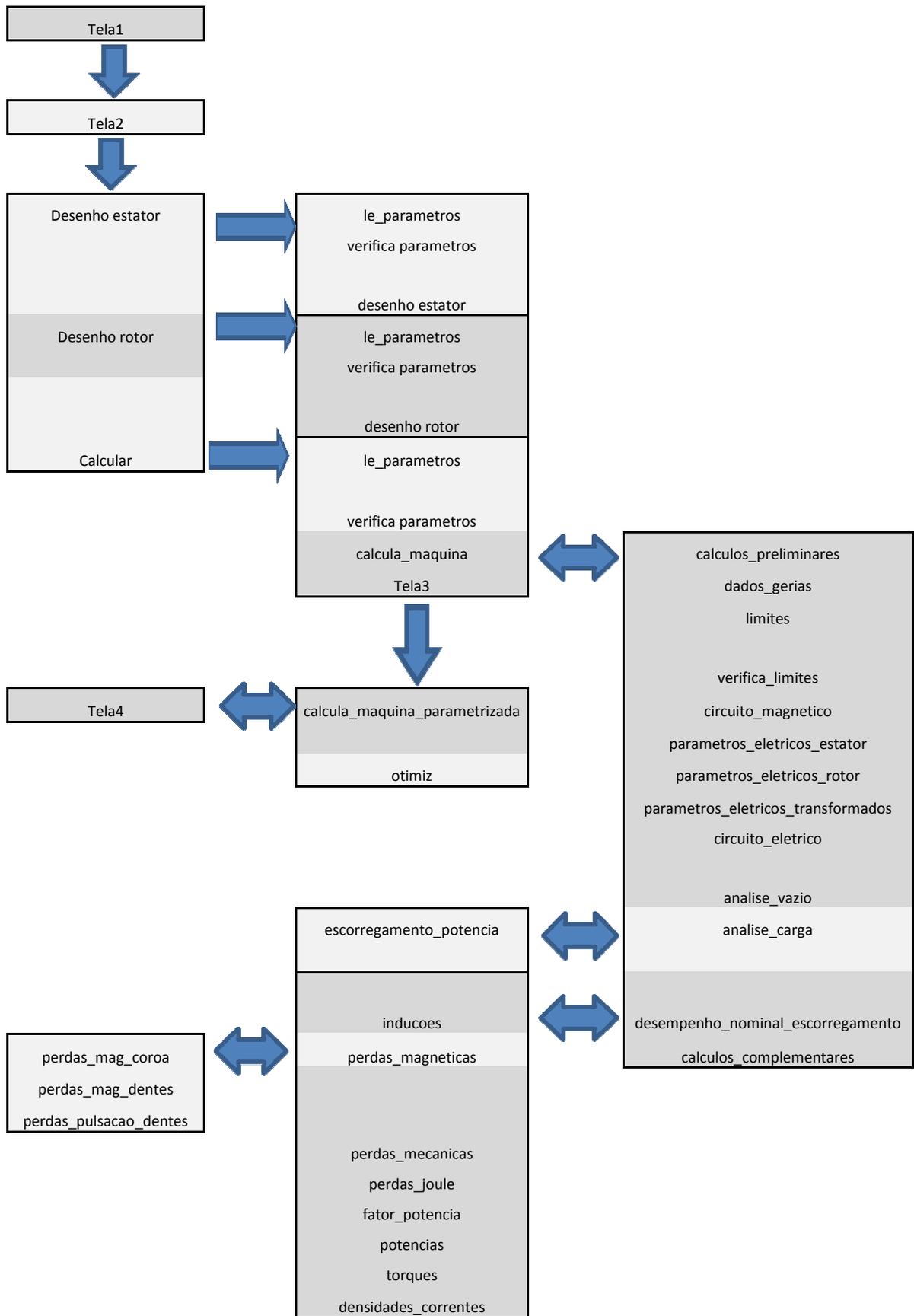


Figura 3.3: Estrutura do programa

3.2.1 Cálculos preliminares

Na rotina dos cálculos preliminares, são ajustados certos parâmetros da máquina para que os mesmos sejam coerentes. O número de ranhuras do estator é calculado conforme o número de bobinas por polo e fase (q) e o passo de enrolamento (Y_b). Estes valores, porém, precisam ser ajustados para que sejam múltiplos, de tal forma que não haja incoerência no projeto da máquina. Tendo estes parâmetros sido ajustados, o programa segue para a próxima rotina, na qual são calculados dados gerais da máquina.

3.2.2 Dados Gerais

A partir dos cálculos preliminares, foram obtidos os parâmetros ajustados para a máquina. Com isto, é possível seguir calculando os dados fundamentais, tanto para o cálculo da máquina a vazio quanto sob carga. Dados como passo das ranhuras do estator e do rotor são calculados nesta rotina, bem como o valor de entreferro corrigido pelo fator de Carter.

Além disso, a partir dos dados dimensionais fornecidos, são calculadas outras dimensões fundamentais da máquina como, por exemplo, altura das coroas do estator e do rotor para que possa ser calculado o circuito magnético da máquina de forma a serem calculadas, entre outros parâmetros, as perdas que ocorrem no ferro. Também são calculadas as áreas das ranhuras para que possa ser estabelecida a configuração possível dos condutores e também serem calculadas as densidades de correntes da máquina para que, posteriormente, possa ser calculado o torque.

3.2.3 Limites e Verificação da Consistência de Dados

Foi adicionada ao programa uma rotina que é responsável por verificar as dimensões de determinadas partes da máquina. Dessa forma, evita-se que no cálculo apareçam discontinuidades ou pontos sem solução, que corresponderiam a configurações incoerentes decorrentes de situações como, por exemplo, sobreposição de ranhuras, dimensões reduzidas da coroa ou dimensões reduzidas dos dentes da máquina. Situações como essa acabariam por gerar perdas magnéticas excessivamente elevadas, resultando em uma potência de saída negativa, rendimento superior a 100% ou outros dados incoerentes.

Assim, quando ocorre algum destas situações, aparece uma mensagem de erro na tela, mostrado na Figura 3.4, para que o usuário corrija o parâmetro especificado de forma a atender às especificações.

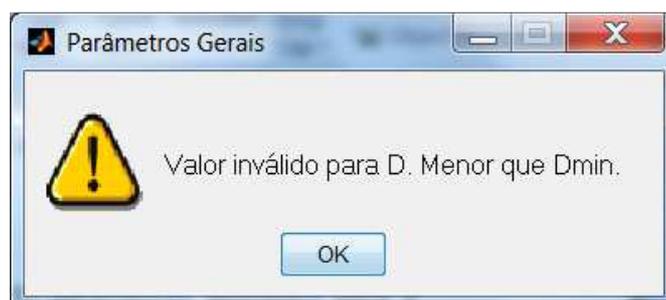


Figura 3.4: Janela de erro

3.2.4 Circuito Magnético

Na rotina do circuito magnético são calculadas as quedas de tensão magnética em todo o circuito magnético da máquina, desde a coroa do estator, passando pelo entreferro e pelos dentes. Assim, é possível determinar também o fator de saturação (K_s) em que a máquina está operando. Neste ponto, são utilizados os dados fornecidos das curvas de saturação do tipo de chapa utilizada (nova ou antiga), as quais foram obtidas experimentalmente e previamente fornecidas juntamente com a versão anterior do programa.

3.2.5 Parâmetros Elétricos

Nos parâmetros elétricos, são calculadas as resistências e indutâncias da máquina a partir dos dados de projeto fornecido e também dos dados previamente calculados nas demais rotinas. O cálculo dos parâmetros elétricos foi dividido em três sub-rotinas para facilitar a compreensão e melhorar a organização.

3.2.5.1 Parâmetros Elétricos do Estator

Nos parâmetros do estator são calculadas as resistências e indutâncias próprias do estator. A área de ocupação dos condutores é previamente calculada, a partir da qual são calculadas as resistências. Também são calculadas as indutâncias de dispersão para posterior cálculo do circuito equivalente da máquina. As indutâncias mútuas entre fases do estator também são calculadas nesta rotina.

3.2.5.2 Parâmetros Elétricos do Rotor

Com os parâmetros do estator calculados, são calculados na rotina dos parâmetros do rotor os seus parâmetros próprios, como resistências, indutâncias próprias e de dispersão, bem como os parâmetros mútuos entre fases do rotor

3.2.5.3 Parâmetros Elétricos Transformados

Nos parâmetros transformados, são calculadas as transformações das resistências e indutâncias tanto do rotor como do estator. Estes parâmetros são utilizados para o cálculo do circuito elétrico equivalente da máquina. Os parâmetros são todos transformados para o sistema de coordenadas do estator (Pereira et al., 2004a), (Pereira et al., 2004b).

3.2.6 Circuito Elétrico

O circuito elétrico equivalente da máquina é obtido através do cálculo das impedâncias e reatâncias da mesma, a partir dos parâmetros previamente calculados para o rotor e para o estator. Assim, é possível obter posteriormente o cálculo da tensão induzida para diversos pontos de operação da máquina, a partir do modelo do circuito equivalente.

3.2.7 Análise a Vazio

No cálculo da análise a vazio são calculados os parâmetros da máquina para operação sem carga. As correntes do rotor e do estator, as tensões induzidas, potências, perdas e fator de potência são calculados nesta rotina.

3.2.8 *Curvas típicas de desempenho*

Para avaliar o desempenho de uma máquina, para determinado ponto de operação, existem curvas típicas que devem ser avaliadas. Estas curvas são determinadas nas rotinas que calculam o desempenho da máquina para diversos pontos de operação. As mesmas curvas são plotadas em uma aba da janela de saída de dados do aplicativo. Sobre estas curvas também é apresentado o ponto de operação para o qual a máquina foi calculada para os parâmetros inseridos.

Na rotina de curvas típicas de desempenho, são levantadas as curvas de operação da máquina para 2000 pontos.

3.2.9 *Análise sob Carga*

3.2.9.1 *Cálculo do Escorregamento*

Para calcular o escorregamento, é utilizada a função 'fzero' do Matlab para determinar o escorregamento nominal a partir da potência. Porém, este método pode não encontrar um zero. Caso isso ocorra, existe outro método que faz uma varredura na curva de potência da máquina para buscar pelo escorregamento. O método de procura do zero busca o ponto em que a potência de saída encontra a potência fornecida para a máquina, de forma a encontrar o ponto de operação em questão.

3.2.9.2 *Dados sob Carga*

Depois de obtido o escorregamento, são fornecidos todos os dados previamente calculados para que sejam obtidos os parâmetros da máquina para o ponto de operação que está sendo calculado.

O cálculo de todos estes dados da máquina também foi separado em sub-rotinas, de forma que, caso seja necessário fazer alguma manutenção ou substituição do método de cálculo este processo seja mais simples.

3.2.10 *Induções*

Primeiramente são calculadas as induções resultantes no entreferro e nas outras partes da máquina na condição de operação sob carga, conforme o fator de carga (K_{pn}) fornecido.

3.2.11 *Cálculo de potências e perdas sob carga*

3.2.11.1 *Perdas Mecânicas*

São calculadas em uma rotina específica, que tem como dados de entrada o escorregamento, velocidade angular mecânica e outros parâmetros.

3.2.11.2 *Perdas Joule*

As perdas joule são calculadas a partir das correntes e resistências calculadas para cada fase da máquina. O número de fases equivalente calculado para o rotor também entra no cálculo, de forma a obter as perdas joule por fase e também as perdas joule totais.

3.2.11.3 Perdas Magnéticas

As perdas magnéticas são calculadas através dos dados obtidos no cálculo do circuito magnético da máquina. Desta forma, podem ser obtidas as perdas em todas as partes ferromagnéticas da máquina, como, por exemplo, na coroa ou nos dentes.

3.2.11.4 Fator de Potência

O fator de potência é um cálculo simples do cosseno do ângulo entre tensão e corrente da máquina correspondente ao ponto de operação.

3.2.11.5 Torques

No cálculo dos torques, é utilizada a onda fundamental e também o terceiro harmônico da indução. Dessa forma, é possível determinar qual a parcela de contribuição de cada uma destas componentes. Assim, posteriormente, pode ser calculado o torque resultante de saída da máquina.

3.2.11.6 Potências

Nesta rotina são calculadas todas as potências da máquina, como potência de entrada, potência fornecida ao rotor e potência de saída, baseados nos dados previamente calculados.

3.2.11.7 Densidades de Corrente

As densidades de corrente resultantes da máquina são calculadas baseadas nos dados dimensionais das ranhuras e nas correntes de operação.

3.2.12 Cálculos Complementares

Depois de obtidos todos os dados pertinentes de saída da máquina, ainda existem dados fundamentais que são interessantes para projeto. Informações como volume de alumínio e de cobre utilizados na construção da máquina são muito importantes para questões financeiras, pois podem significar uma economia significativa em um grande lote de fabricação de máquinas. Estes dados são calculados na rotina de cálculos complementares.

3.3 Apresentação dos Resultados

A interface de apresentação dos resultados já havia sido desenvolvida previamente. Existem diversas abas para divisão dos dados de saída a serem apresentados. Desta forma, é possível avaliar separadamente cada aspecto da máquina em que se esteja interessado.

Além dos dados numéricos, também já havia sido prevista a apresentação das curvas de distribuição de indução, tensão e corrente na máquina.

Foram adicionadas mais duas abas para apresentar as curvas de desempenho da máquina. As curvas apresentadas são as de torque, fator de potência e rendimento. São apresentadas também estas mesmas curvas separadas de forma a mostrar a contribuição da fundamental e do terceiro harmônico. As curvas de corrente no estator e no rotor em função da potência da máquina também são apresentadas.

Sobre as curvas de desempenho é mostrado também o ponto de operação para o qual a máquina foi calculada, facilitando a análise.

3.4 Parametrização

Para a parametrização foram escolhidas algumas variáveis de projeto que podem ser alterados de forma a encontrar o melhor desempenho. Assim, a rotina de parametrização faz o cálculo da máquina diversas vezes, chamando as rotinas supracitadas após realizar a variação de determinado parâmetro. Como resultados, são apresentadas curvas de torque, rendimento, fator de potência e relação do torque produzido pela fundamental e pelo terceiro harmônico para os diversos pontos calculados. Desta forma, é possível escolher o parâmetro para melhorar o fator que se deseja, por exemplo, torque ou rendimento, de forma a alterar o projeto da máquina.

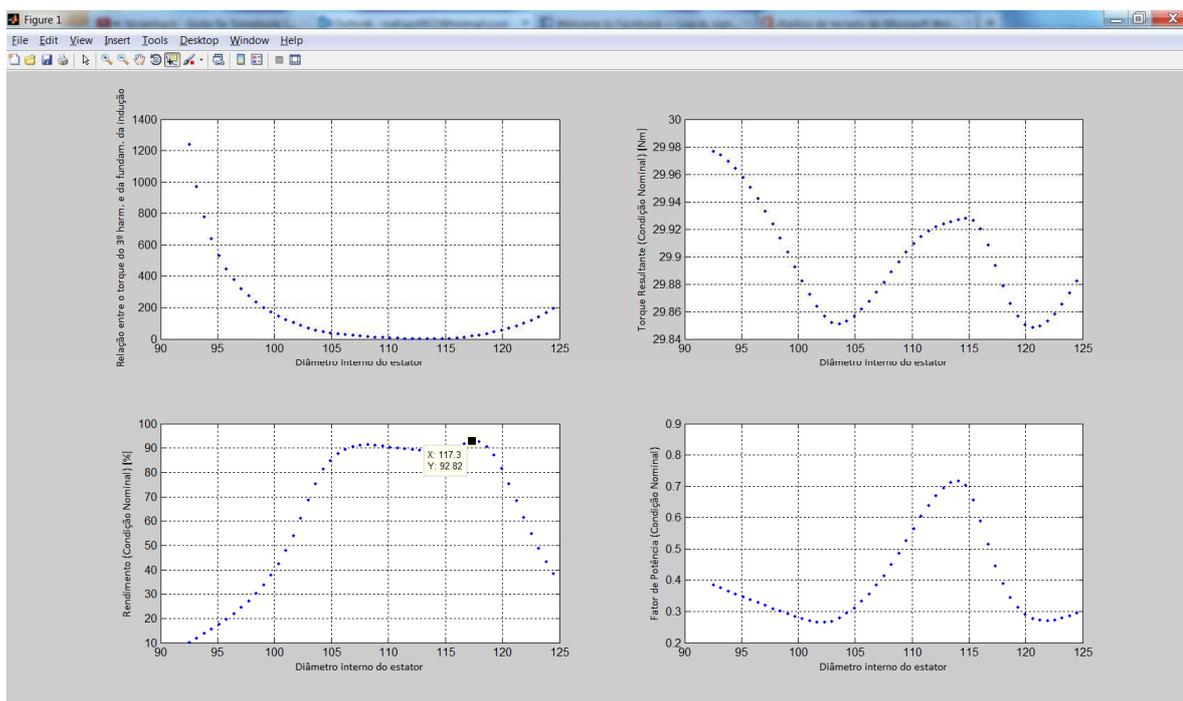


Figura 3.5: Interface de resultados da parametrização

3.5 Otimização

O algoritmo de otimização já existia, sendo um algoritmo genético de otimização para máquinas de indução pentafásicas, mas teve que ser alterado para se adequar à interface do aplicativo. A rotina de cálculo da máquina que era utilizada era outra, e foi alterada para utilizar a mesma rotina de cálculo das demais funções do programa. A estrutura de saída dos dados que são obtidos como respostas do algoritmo também foi alterada, de forma a gerar configurações de parâmetros passíveis de serem inseridas no aplicativo principal para que os demais dados da máquina possam ser apresentados. Assim, após rodar o algoritmo, o usuário pode aplicar os parâmetros calculados no aplicativo para obter o desenho do estator e do rotor e os demais dados da máquina.

Na tabela 3.2 são apresentados alguns dados de entrada que devem ser inseridos no algoritmo para realização do cálculo:

Tabela 3.2: Dados principais de entrada do algoritmo genético

Parâmetro	Descrição
npop	Número de cromossomos na população
maxger	Número máximo de gerações
probmutinicial	Probabilidade de mutação inicial
probmutfinal	Probabilidade de mutação final
probrecomb	Probabilidade de recombinação
taxaelite	Taxa de cromossomos de elite
ntorneio	Número de participantes no torneio
ddmin2ini	Distância mínima inicial entre indivíduos da população
ddmin2fim	Distância mínima final entre indivíduos da população
ddmin1ini	Distância mínima inicial entre indivíduos da elite
ddmin1fim	Distância mínima final entre indivíduos da elite

A partir dos dados de entrada da máquina dos parâmetros utilizados no algoritmo, mostrados na tabela 3.2, é calculada a população inicial, que nada mais é do que a solução da máquina para diversas configurações. A partir disto, é feita a avaliação e comparação da adequabilidade (fitness) dos indivíduos, para definir quais indivíduos são mantidos e quais serão descartados. A partir dos indivíduos mantidos, é gerada uma nova população através de cruzamentos e mutações, de forma a obter uma população com uma maior adequabilidade. Este processo é repetido até que seja atingido o critério de parada do método.

O algoritmo permite a seleção 5 funções de adaptação, que são:

- rendimento
- torque
- volume
- rendimento e volume
- torque e rendimento

Assim, conforme a necessidade é possível selecionar qual dado da máquina se deseja aprimorar. Através dos dados iniciais de entrada do software para máquinas pentafásicas, pode ser acionado o algoritmo genético de forma a buscar a melhor solução para uma das funções de adaptação supracitadas. Com isso, os novos parâmetros da máquina são calculados e podem ser inseridos novamente no programa para que os dados possam ser recalculados.

4 Resultados

Após a substituição das rotinas de cálculo da máquina no programa, foram realizados testes para diversas configurações de máquinas, comparando os resultados obtidos pelo aplicativo com os resultados obtidos calculados diretamente a partir da rotina base que foi utilizada para o desenvolvimento das novas rotinas de cálculo. Desta forma, pode-se observar que o programa não apresenta mais os problemas anteriores de travamento e também apresenta resultados compatíveis com os previamente calculados para as configurações testadas. A seguir são apresentados os casos de cálculo, parametrização e otimização aplicados para uma máquina trifásica e para uma máquina pentafásica. O módulo de otimização é aplicado somente à máquina pentafásica, tendo em vista que o mesmo foi desenvolvido apenas para tal.

4.1 Cálculo das Máquinas

Após a validação do aplicativo, foram calculados dois casos: um para uma máquina trifásica e um para uma máquina pentafásica.

4.1.1 Máquina trifásica

A máquina trifásica escolhida para cálculo tem os seguintes dados de entrada:

Tabela 4.1: Dados de entrada da máquina trifásica

Símbolo	Valor	Unidade	Símbolo	Valor	Unidade
b_{ar}	10	mm	K_{tr}	1,39	-
b_{or}	0	mm	K_{ts}	1,36	-
b_{os}	2,8	mm	K_{vn}	1	-
BVI	B	-	K_{31}	0,15	-
b_{3r}	6,198	mm	l_p	140	mm
b_{3s}	5,444	mm	m	3	-
D	114,6	mm	N_c	1	-
D_e	182	mm	N_{f1}	1	-
d_{f1}	0,8	mm	N_{f2}	1	-
d_{f2}	0,85	mm	N_{ir}	1,2307	-
δ	0,6	mm	N_r	28	-
D_{ex}	42	mm	p	2	-
f	60	Hz	P_n	5500	W
G_p	2	-	q	3	-
h_{ar}	25	mm	ρ_r	1,7E-8	-
h_{or}	0	mm	ρ_s	2,65e-8	-
h_{os}	1	mm	T_{Chp}	Antiga	-
h_{1r}	18,384	mm	T_{ran}	Arred.	-
h_{3r}	2,6	mm	V_n	440	V
h_{3s}	1,148	mm	W_{bs}	45	-
K_{ep}	0,97	-	Y_b	9	-
K_{pn}	1	-			

A partir dos dados de entrada, é possível obter o desenho básico do estator e do rotor da máquina, a partir do módulo já existente na versão inicial do programa.

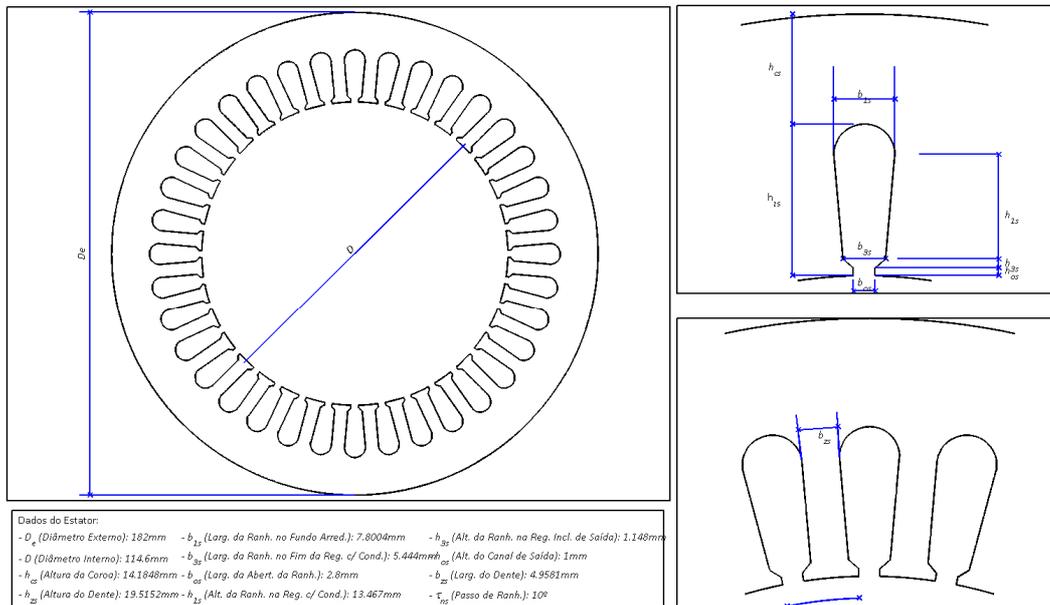


Figura 4.1: Desenho do estator da máquina trifásica

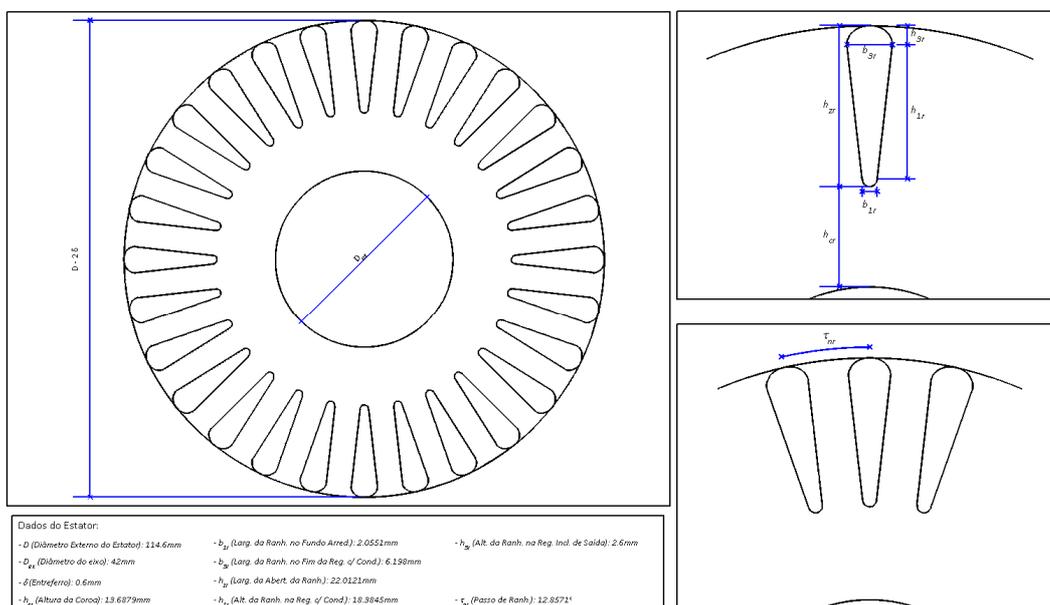


Figura 4.2: Desenho do rotor da máquina trifásica

Sendo inseridos os dados de entrada e pressionado o botão calcular, a máquina é calculada. A seguir são apresentados alguns resultados obtidos.

Tabela 4.2: Aspectos gerais da máquina trifásica

Par.	Valor	Unid.	Descrição
δ	1,225	mm	Entreferro corrigido.
FP_{N1}	70,89	%	Fator de potência nominal
G_p	2		Número de grupos do enrolamento em paralelo.
N	14		Número de fases do rotor.
N_s	36		Número de ranhuras do estator.
η	89,21	%	Rendimento, na condição nominal.
q	3		Número de ranhuras por polo e por fase.
Rotação	1754,93	rpm	Velocidade.
s_N	2,5038	%	Escorregamento da máquina na condição nominal.
Chapa	Antiga		Chapa utilizada.
Valumi	444,54	cm ³	Volume de alumínio utilizado.
Vcobre	476,75	cm ³	Volume de cobre utilizado.

Os resultados mostrados na tabela 4.2 são os dados principais de interesse para o desempenho de uma máquina. A partir destes dados é possível determinar se parâmetros básicos de desempenho foram atendidos no projeto. Caso seja necessário verificar algum parâmetro mais específico, é possível visualizar estes parâmetros nas outras abas disponíveis no aplicativo.

4.1.2 Máquina pentafásica

A máquina pentafásica tem os seguintes dados de entrada:

Tabela 4.3: Dados de entrada da máquina pentafásica

Símbolo	Valor	Unidade	Símbolo	Valor	Unidade
b_{ar}	10	mm	K_{tr}	1,39	-
b_{or}	0	mm	K_{ts}	1,36	-
b_{os}	1,8	mm	K_{vn}	1	-
BVI	B	-	K_{31}	0,15	-
b_{3r}	4,082	mm	l_p	140	mm
b_{3s}	3,114	mm	m	5	-
D	115	mm	N_c	2	-
D_e	182	mm	N_{f1}	3	-
d_{f1}	0,71	mm	N_{f2}	0	-
d_{f2}	0	mm	N_{ir}	1,2307	-
δ	0,6	mm	N_r	44	-
D_{ex}	42	mm	p	2	-
f	60	Hz	P_n	5500	W
G_p	1	-	q	3	-
h_{ar}	0	mm	ρ_r	1,7e-8	-
h_{or}	25	mm	ρ_s	2,65e-8	-
h_{os}	0	mm	T_{Chp}	Antiga	-
h_{1r}	0	mm	T_{ran}	Arred.	-
h_{3r}	11,754	mm	V_n	220	V
h_{3s}	2,041	mm	W_{bs}	11	-
K_{ep}	0,872	-	Y_b	12	-
K_{pn}	1	-			

Assim como para a máquina trifásica, para a máquina pentafásica também são mostrados os desenhos do estator e do rotor da máquina:

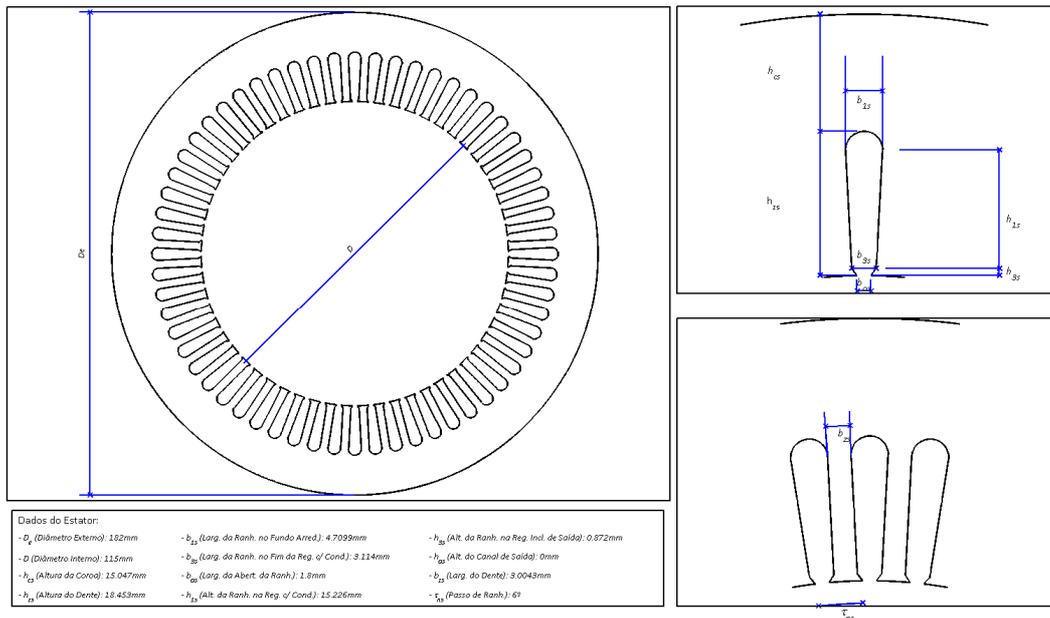


Figura 4.3: Desenho do estator da máquina pentafásica dado pelo software

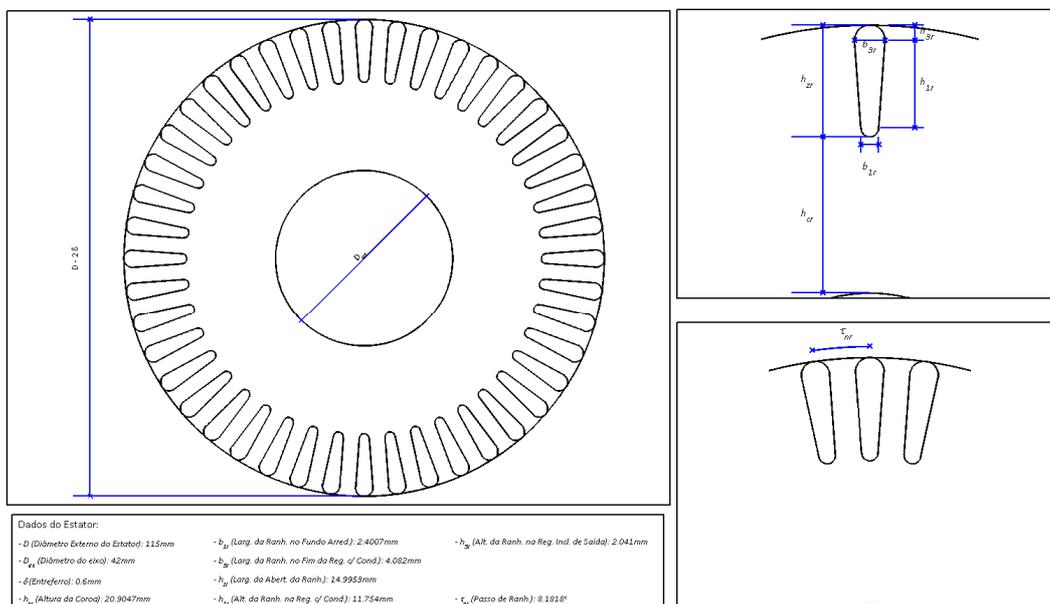


Figura 4.4: Desenho do rotor da máquina pentafásica dado pelo software

Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4.4:

Tabela 4.4: Aspectos gerais da máquina pentafásica

Par.	Valor	Unid.	Descrição
δ	1,089	mm	Entreferro corrigido.
FP_{N1}	73,78	%	Fator de potência nominal
G_P	1		Número de grupos do enrolamento em paralelo.
N	22		Número de fases do rotor.
N_S	60		Número de ranhuras do estator.
η	87,45	%	Rendimento, na condição nominal.
q	3		Número de ranhuras por polo e por fase.
Rotação	1754,43	rpm	Velocidade.
s_N	2,53	%	Escorregamento da máquina na condição nominal.
Chapa	Antiga		Chapa utilizada.
Valumi	369,23	cm ³	Volume de alumínio utilizado.
Vcobre	389,43	cm ³	Volume de cobre utilizado.

A avaliação destes dados permite verificar se os dados básicos de projeto foram atendidos para definir a necessidade de alteração de algum parâmetro ou reprojeção da máquina.

4.2 Parametrização

4.2.1 Máquina trifásica

Para cada uma das máquinas escolheu-se variar um parâmetro. Para a máquina trifásica foi variado o parâmetro diâmetro interno do estator (D) e foram obtidas as seguintes curvas:

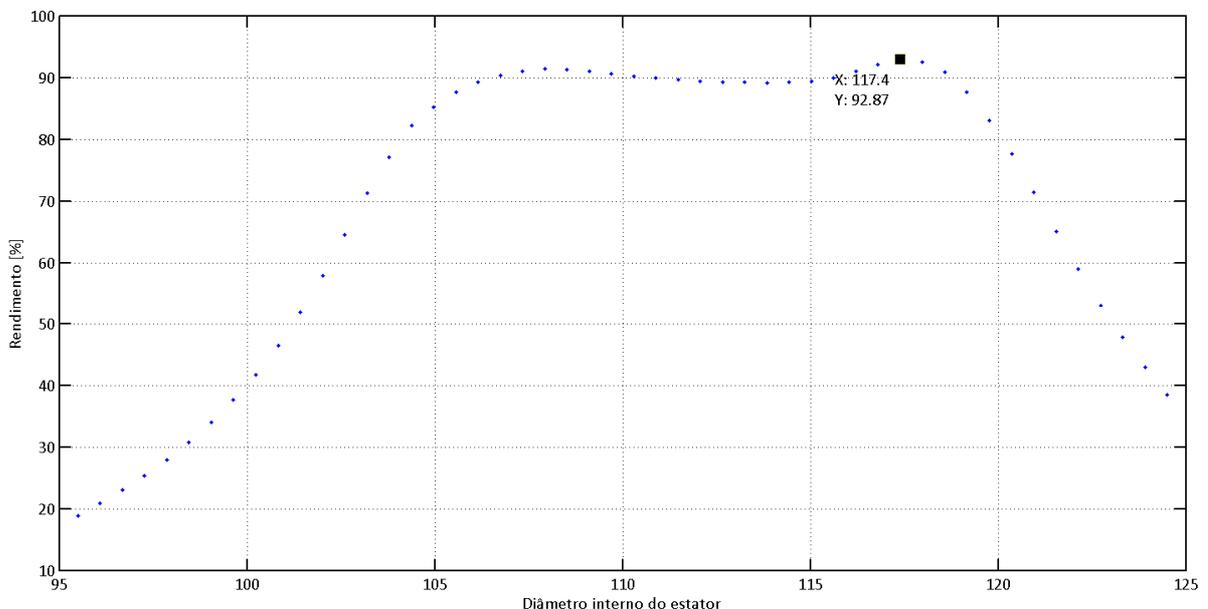


Figura 4.5: Curvas de parametrização da máquina trifásica

Após ser identificado o diâmetro que faz com que a máquina possua o melhor rendimento com os demais parâmetros inalterados, foi feito o cálculo da máquina.

Tabela 4.5: Aspectos gerais para a máquina trifásica parametrizada

Par.	Valor	Unid.	Descrição
δ	2,872	mm	Entreferro corrigido.
FP_{N1}	44,72		Fator de potência nominal
G_P	2		Número de grupos do enrolamento em paralelo.
N	14		Número de fases do rotor.
N_S	36		Número de ranhuras do estator.
η	92,80	%	Rendimento, na condição nominal.
q	3		Número de ranhuras por polo e por fase.
Rotação	1756,92	rpm	Velocidade.
s_N	2,39	%	Escorregamento da máquina na condição nominal.
Chapa	Antiga		Chapa utilizada.
Valumi	446,77	cm ³	Volume de alumínio utilizado.
Vcobre	482,26	cm ³	Volume de cobre utilizado.

Pode-se observar que houve variação de todos os parâmetros e o rendimento foi o mesmo retirado da curva de parametrização, sendo superior à configuração original. Porém, o fator de potência nominal apresentou um resultado bem pior.

4.2.2 Máquina pentafásica

Para a máquina pentafásica, variando o parâmetro passo médio de enrolamento (Y_b) foram obtidos os seguintes resultados:

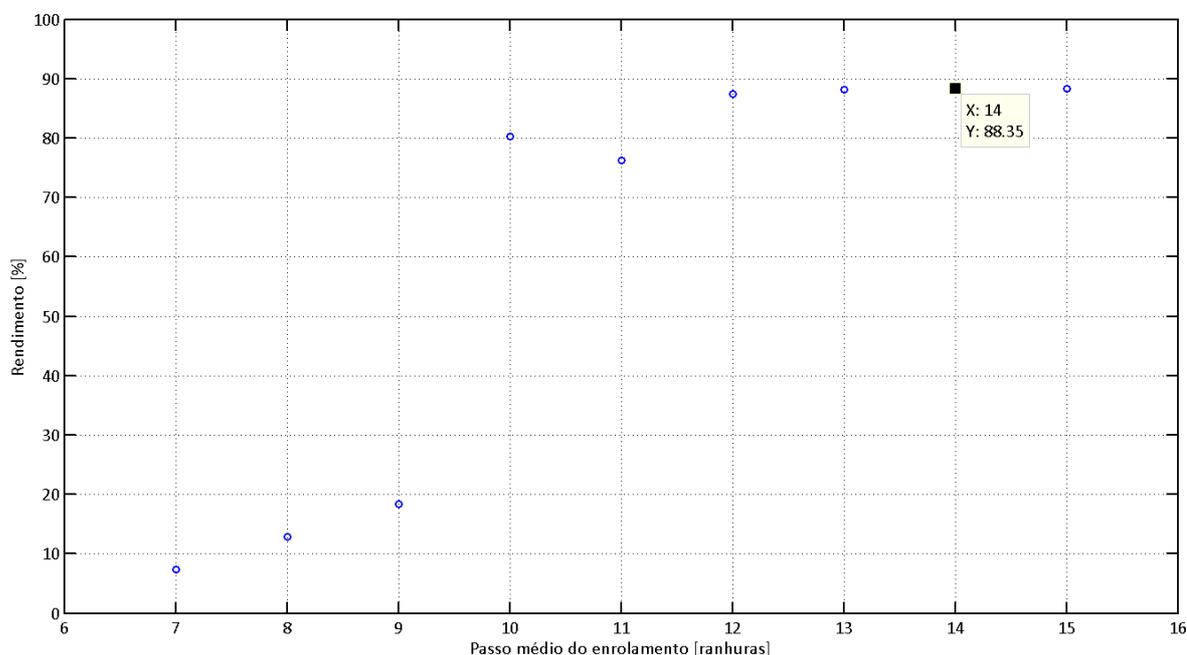


Figura 4.6: Curvas de parametrização da máquina pentafásica

A partir destes resultados, foi escolhido o ponto máximo da curva de rendimento para recalculer a máquina. Desta forma, o parâmetro escolhido foi substituído nos dados de entrada para recálculo, apresentando os seguintes resultados:

Tabela 4.6: Aspectos gerais da máquina pentafásica parametrizada

Par.	Valor	Unid.	Descrição
δ	0,988	mm	Entreferro corrigido.
FP_{N1}	78,98		Fator de potência nominal
G_p	1		Número de grupos do enrolamento em paralelo.
N	22		Número de fases do rotor.
N_s	60		Número de ranhuras do estator.
η	88,30	%	Rendimento, na condição nominal.
q	3		Número de ranhuras por polo e por fase.
Rotação	1749,52	rpm	Velocidade.
s_N	2,80	%	Escorregamento da máquina na condição nominal.
Chapa	Antiga		Chapa utilizada.
Valumi	369,23	cm ³	Volume de alumínio utilizado.
Vcobre	431,91	cm ³	Volume de cobre utilizado.

Novamente os valores foram diferentes e o rendimento superior ao original obtido foi o mesmo retirado da curva de parametrização.

4.3 Otimização

Para efeitos de comparação, foi utilizada a mesma configuração inicial da máquina pentafásica no módulo de otimização. Dessa forma, é possível comparar os resultados das configurações iniciais, da parametrização e da otimização. Para comparar com os resultados obtidos na parametrização, a função de otimização foi escolhida como rendimento. Desta forma, diversos parâmetros da máquina são ajustados simultaneamente para obter o melhor rendimento.

Após obter os parâmetros otimizados a partir dos dados de entrada das máquinas calculadas acima, foi feito novamente o cálculo da máquina.

Tabela 4.7: Aspectos gerais da máquina pentafásica otimizada

Par.	Valor	Unid.	Descrição
δ	0,786	mm	Entreferro corrigido.
FP_{N1}	79,88		Fator de potência, na condição nominal
G_p	1		Número de grupos do enrolamento em paralelo.
N	15		Número de fases do rotor.
N_s	40		Número de ranhuras do estator.
η	92,78	%	Rendimento, na condição nominal.
q	2		Número de ranhuras por polo e por fase.
Rotação	1754,05	rpm	Velocidade.
s_N	2,5529	%	Escorregamento da máquina na condição nominal.
Chapa	Antiga		Chapa utilizada.
Valumi	369,50	cm ³	Volume de alumínio utilizado.
Vcobre	747,76	cm ³	Volume de cobre utilizado.

4.4 Comparação dos resultados

A partir dos cálculos realizados para os diversos casos, foi montada a tabela 4.8 para que possa ser feita a comparação das máquinas calculadas.

Tabela 4.8: Comparação dos rendimentos obtidos

Máquina	Rendimento (%)	FP	Cobre (cm ³)	Alum. (cm ³)
Trifásica	89,21	70,89	476,75	444,54
Trifásica Parametrizada	92,80	44,72	482,26	446,77
Pentafásica	87,45	73,78	389,43	369,23
Pentafásica Parametrizada	88,30	78,98	431,91	369,23
Pentafásica Otimizada	92,78	79,88	747,76	369,50

Pode-se observar que, tanto para a parametrização quanto para a otimização foram obtidos melhores resultados para o ponto escolhido da máquina. Nos dois casos, tanto para a máquina trifásica quanto para a máquina pentafásica, os rendimentos obtidos foram melhores em relação aos originais. Isto mostra que a ferramenta pode realizar a sua função de revisão do projeto para obter uma máquina com rendimento melhor que a original através do uso dos módulos de parametrização ou de otimização. Porém, para a máquina trifásica o fator de potência apresentou um resultado inferior ao original. Para a otimização, o volume de cobre utilizado foi bem maior do que a configuração original. Isto se deu ao fato de que a função de otimização escolhida foi apenas rendimento. O algoritmo também apresenta a possibilidade de otimização simultânea de rendimento e volume, o que provavelmente acabaria por gerar um resultado mais satisfatório para os dois pontos simultaneamente.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

O aplicativo desenvolvido apresentou significativas melhorias em relação à versão inicial previamente produzida. Foi possível obter cálculos de parâmetros e desempenho de máquinas de indução trifásicas e pentafásicas de diversas configurações. Os resultados apresentados obtidos através do programa demonstraram ser bem completos, tendo em vista que utilizam o modelo e calculam diversas informações da máquina.

Houve dificuldade na parte de reestruturação do programa devido às chamadas de função, as quais necessitam ter os parâmetros chamados na ordem e quantidade correta. Em relação à versão anterior, porém, a estrutura facilita este ponto, visto que a organização modular permite a substituição ou manutenção de módulos individuais do programa.

As discontinuidades que eram apresentadas no cálculo de algumas máquinas com configurações incoerentes não ocorrem mais, o que foi resultado da inserção da avaliação das dimensões da máquina pelas novas rotinas. Isto possibilitou a obtenção de resultados melhores tanto para o cálculo inicial das máquinas quanto para o traçado das curvas de parametrização.

Através da interface de parametrização é possível obter aumento do desempenho da máquina através de uma rápida varredura de um determinado parâmetro. Os resultados mostrados nas curvas de resposta da variação do parâmetro são apresentados de forma clara, permitindo uma fácil avaliação para escolha do melhor ponto de interesse para a aplicação requerida.

O módulo de otimização também apresenta bons resultados, tendo em vista que seu vínculo com a ferramenta possibilita uma utilização conjunta de otimização e avaliação

dos resultados. Existe a possibilidade de otimizar diversas características da máquina como volume, rendimento, torque e fator de potência. Também é possível utilizar a otimização para aprimorar mais de um parâmetro simultaneamente.

Nas comparações realizadas para um caso de máquina trifásica e um caso de máquina pentafásica foi possível demonstrar a utilidade do programa. Para os dois tipos de máquina a função de parametrização demonstrou ser capaz de obter um rendimento superior ao original com a alteração de um parâmetro de construção. Porém, percebe-se que outras características da máquina podem ser prejudicadas, como no caso da máquina trifásica em que o fator de potência reduziu significativamente para o valor do parâmetro que apresentou rendimento superior. O módulo de otimização para a máquina pentafásica, por outro lado, permite a alteração simultânea de diversas características de projeto de forma a buscar a otimização de alguma característica da máquina sem prejudicar outros dados.

A interface gráfica do aplicativo apresenta facilidade de utilização, com resultados apresentados por grupos de dados e também com curvas características que permitem avaliação dos resultados. Porém, a ferramenta sobre a qual foram desenvolvidas tais interfaces possui limitações. De acordo com a resolução da tela do computador em que o aplicativo está rodando, as dimensões dos textos e dos botões não mantêm a configuração original, prejudicando a visualização de alguns resultados. Assim, em uma futura revisão pode ser prevista a substituição das interfaces gráficas por outras, desenvolvidas com ferramentas que apresente mais recursos e seja mais robusta.

Para o módulo de otimização também pode ser desenvolvida uma interface gráfica para a saída de dados. No trabalho atual os resultados são mostrados apenas em função dos dados das populações geradas pelo algoritmo e dos parâmetros de saída da máquina, gerando a necessidade de nova inserção no software principal para recálculo dos dados. Assim, o desenvolvimento de uma interface gráfica de resultados para o módulo de otimização também traria um acréscimo na funcionalidade e facilidade de utilização do software.

Portanto, espera-se que com as melhorias desenvolvidas o software possa ser utilizado como auxílio no desenvolvimento de novos trabalhos para otimização de máquinas e contribuir para os projetos que possuam melhor aproveitamento de material e melhor rendimento.

6 Referências

- Boldea, I., & Nasar, S. A. (2010). *The Induction Machine Design Handbook* (2nd edition ed.). CRC.
- De Jong, K. A. (1975). *Analysis of the behavior of a class of genetic adaptative systems*. PhD thesis, Univesity of Michigan.
- Goldberg, D. (1989). *Genetic algorithms in optimization, search and machine learning*. Addison Wesley.
- Grefenstette, J. (1993). *Navy Center for Applied Research in Artificial Intelligence*. Washington.
- Grefenstette, J. (1986). Optimization of control parametes for genetic algorithms. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*.
- Müller, G., Vogt, K., & Ponick, B. (2007). Berchnung Elektrisher Maschinen. isbn 3-527-40525-9. Wiley-VCH.
- Pereira, L. A. (Setembro de 2011). Determinação da Curva de Saturação da Máquina Síncrona de Polos Salientes. *Disciplina de Projeto de Dispositivos Eletromagnéticos* . DELET-UFRGS.
- Pereira, L. A. (Novembro de 2011). Projeto de Máquinas de Indução. *Disciplina de Projeto de Dispositivos Eletromagnéticos* . DELET-UFRGS.
- Pereira, L. A. (Setembro de 2011). Projeto do Estator da Máquina Síncrona de Polos Salientes. *Disciplina de Projeto de Dispositivos Eletromagnéticos* . DELET-UFRGS.
- Pereira, L. A., Scharlau, C. C., Pereira, L. F., & Haffner, J. F. (2006). General model of a five-phase induction machine allowing for harmonics in the air gap field. *IEEE Transactions on Energy Conversion* .
- Pereira, L. A., Scharlau, C. C., Pereira, L. F., & Haffner, J. F. (2004b). Model of a five-phase induction machine allowing for harmonics in the air-gap field part ii: transformation of coordinates and d-q models., *I*, pp. 1682-1687.
- Pereira, L. A., Scharlau, C. C., Pereira, L. F., & Haffner, J. F. (2004a). Model of a five-phase induction machine allowing for harmonics in the air-gap field. part i: Parameter determination and general equations. *Anual Conference of IEEE, I*, pp. 98-103.
- Pereira, L. A., Scharlau, C. C., Pereira, L. F., & Haffner, S. (2012). Influence of saturation on the airgap induction waveform of five-phase induction machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, (pp. 29-41).
- Pereira, L. A., Scharlau, C. C., Pereira, L. F., & Haffner, S. L. (2009). Controle de Máquinas de Indução Pentafásicas. *SBA:Controle & Automação* .
- Richter, R. (1954). *Elektrische Maschinen - Vierter Band - Die Induktionsmaschinen*. Birkhäuser.
- Schuisky, W. (1960). *Berechnung Elektrischer Maschinen*. Springer.
- Wainwright, R. L., & Sekharan, D. A. (1993). Manipulating Subpopulations in Genetic Algorithms for Solving the k-way Graph Partitioning Problem. *Proceedings of the Seventh Oklahoma Conference on Artificial Intelligence*, (pp. 215-225).