

HUMBERTO FERREIRA VINHAIS

nota final
10 (dez)

Am

PROJETO OTIMIZADO DE UM MICRO-MOTOR ELETROSTÁTICO

Monografia de trabalho de formatura
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do Título em Engenharia

São Paulo

2004

HUMBERTO FERREIRA VINHAIS

PROJETO OTIMIZADO DE UM MICRO-MOTOR ELETROSTÁTICO

Monografia de trabalho de formatura
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do Título em Engenharia

Área de concentração:
Engenharia Mecatrônica

Orientador:
Prof. Dr. Emilio Carlos Nelli Silva

São Paulo

2004

RESUMO

Esse trabalho tem por objetivo o estudar e desenvolver um projeto otimizado de micro-motor eletrostático. Esse projeto foi desenvolvido em três perspectivas: simulação computacional, micro-fabricação e desenvolvimento de um software em linguagem C para realizar o projeto otimizado de um micro-motor eletrostático aplicado para MEMS usando o Método de Otimização Topológica (MOT). Em um motor eletrostático, essencialmente, as cargas elétricas induzidas no rotor são atraídas pelas cargas elétricas do estator, dando origem à força eletrostática que cria o torque do motor. A partir de 1980, com o advento da tecnologia de micro-fabricação de MEMS (do inglês "Micro-Electromechanical systems", micro-estruturas que acoplam movimentos e características mecânicas em micro-circuitos eletrônicos), esses motores ganharam uma nova perspectiva internacional. Os micro-motores vêm sendo pesquisados atualmente em diversos campos da engenharia (como para o desenvolvimento de micro-válvulas, micro-bombas, micro-sensores, etc), no entanto, existem poucos estudos na literatura quanto ao projeto desses motores através de meios computacionais e matemáticos, com o objetivo de otimizar aspectos de projeto, como, por exemplo, seu torque. Dessa forma, foram realizadas simulações em elementos finitos e o resultado dessas simulações foi considerado para fabricação de protótipos em micro-escala. Por fim, técnicas de otimização foram usadas para se obter a geometria otimizada do rotor do motor eletrostático de forma a maximizar o torque final.

ABSTRACT

This work has the objective of developing a software in C language to create an optimized project of an electrostatic side-drive micromotor applied for MEMS using the Topology Optimization Method (TOM). In an electrostatic side-drive motor, essentially, the induced electric loads in the rotor are attracted by electric loads of the stator, generating an electrostatic force that creates a mechanical torque in the rotor of the micro-motor. After 1980, the electrostatic motors has gained a new international perspective with the technology of micro manufacture of MEMS (Micro-Electromechanical systems), which are microstructures that have movements and mechanical characteristics. The micromotors have becoming more popular in scientific researches in diverse fields of engineering, however, there are a few studies in literature about the design of these micromotors through computational and mathematical approaches, with the objective to optimize project aspects, as, for example, its torque. Thus, the development of a methodology of optimization of these motors is very important to systemize its project. Therefore, techniques of optimization are used in this project to get the optimized topology of the rotor of the electrostatic micromotor intending to maximize its final torque.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motor eletrostático	1
1.2. Introdução a MEMS	3
1.2.1. Processos de fabricação em MEMS	4
1.2.2. Micro-motores eletrostáticos x eletromagnéticos para MEMS	7
1.3. Motores Eletrostáticos aplicados em MEMS	8
1.3.1. Aplicações Recentes para Micro-Motores Eletrostáticos	10
2. OBJETIVOS	13
3. JUSTIFICATIVA	14
4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	15
4.1. Introdução ao Método de Elementos Finitos	15
4.2. MEF Eletrostático	16
4.3. Introdução ao ANSYS	24
4.4. MEF Eletrostático no ANSYS	26
4.4.1. Simulação computacional do projeto do motor	26
4.5. Principais Conceitos de Otimização	31
4.5.1. Tipos Básicos de Otimização	32
4.5.2. Conceitos de Otimização	34
4.5.3. Introdução à Otimização Topológica	36
4.5.4. Estrutura de Software de Otimização	37
4.6. Otimização Topológica aplicada ao projeto de micro-motor eletrostático	39
4.6.1. Solução do problema de otimização topológica	42
4.6.2. Análise de sensibilidade	45

4.7. Micro-fabricação aplicada à micro-motores.....	51
4.7.1. Introdução à micro-fabricação de micro-motores.....	51
4.7.2. Processo de Micro-fabricação.....	54
4.7.3. Estudo de projetos de micro-motores.....	59
4.7.4. Tecnologia de polisilício x eletrodeposição	62
4.8. Introdução à dinâmica do micro-motor.....	64
4.9. Introdução aos conceitos de CAD da interface do software desenvolvido	66
5. IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA.....	68
5.1. Estrutura do software desenvolvido.....	68
5.1.1. Características do software desenvolvido.....	73
5.1.2. Interface do software desenvolvido	75
6. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	79
7. RESULTADOS DA MICRO-FABRICAÇÃO	96
7.1. Projeto dos protótipos e desenho de máscaras da foto-litografia	96
7.2. Fabricação dos protótipos de micro-motor.....	100
8. RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA	108
9. CONCLUSÃO	113
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116
APÊNDICE A	120
APÊNDICE B.....	122
APÊNDICE C.....	125
ANEXO A.....	129
ANEXO B	130
ANEXO C	131
ANEXO D.....	132
ANEXO E	134
ANEXO F.....	135

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - A “roda elétrica” de Benjamin Franklin, 1748.....	1
Figura 2 - Interação e cargas eletrostáticas entre o rotor e o estator.....	2
Figura 3 - Menor motor eletrostático do mundo.	3
Figura 4 - Processos de fabricação.	5
Figura 5 - “Surface micromachining”.....	7
Figura 6 - Alguns exemplos de motores encontrados na literatura.	8
Figura 7 - Micro-motor utilizado em scanner de alta precisão.....	11
Figura 8 - Esquema do micro-motor utilizado no endoscópio.	11
Figura 9 - Micro-motor usado para armazenamento de informação.	12
Figura 10 - Transformação de elemento isoparamétrico.	19
Figura 11 - Organização do ANSYS	26
Figura 12 - Força eletrostática em 4 dentes do rotor.	28
Figura 13 - Situação das forças normais durante o funcionamento do micro-motor..	29
Figura 14 - Força radial resultante no micro-motor.....	30
Figura 15 - Exemplo de 3 tipos de otimização estrutural: (a) otimização paramétrica; (c) otimização de forma; (e) otimização topológica.	33
Figura 16 - Possíveis variáveis de projeto.....	35
Figura 17 - Estrutura lógica e um software de otimização.....	37
Figura 18 - Estrutura lógica de um software de otimização topológica.	38
Figura 19 - Micro-motor a ser otimizado pela Otimização Topológica	39
Figura 20 - Rotação do rotor do ponto de referência A para o ponto B.	40
Figura 21 - Exemplo de projeto de micro-motor eletrostático usando o MOT	42
Figura 22 – Limites móveis.....	44
Figura 23 - Exemplo de máscaras para projeto de micro-motor (FRANGOULT, 1994): trilha (à esquerda) e estrutura do motor (à direita).	52
Figura 24 - Montagem da eletrodeposição do níquel.	53
Figura 25 - Secção transversal da estrutura da trilha, do eixo e do estator do micro- motor durante o processo de fabricação.	55
Figura 26 - Exemplo de moldes de resiste SU8 do projeto de micro-motor da referência CHIEN-HUNG (2002).	56

Figura 27 - Exemplos de problemas na remoção do molde de resiste (CHIEN-HUNG, 2002).	57
Figura 28 - Secção transversal da estrutura do rotor do micro-motor durante o processo de fabricação.	58
Figura 29 - Esquema de corte transversal desse motor de MOURLAS (1996).	60
Figura 30 - Foto do micro-motor de TAVROW (1991).	60
Figura 31 - Foto do motor fabricado em BART (1992).	61
Figura 32 - Formatos de <i>bushing</i> encontrados na literatura.	65
Figura 33 - Mudança de coordenadas no plano $z=0$	67
Figura 34 - Organograma das atividades e do funcionamento do programa desenvolvido.	69
Figura 35 - Janela do programa de interface com explicação de seus elementos gráficos.	77
Figura 36 - Transformação de coordenadas para a tela de visualização da interface.	78
Figura 37 - Esquema de entrada de dados na simulação.	79
Figura 38 - Defasagem entre o dente do rotor e o pólo do estator.	79
Figura 39 - Um modelo de MEF tridimensional com desalinhamento máximo em vista cavaleira.	81
Figura 40 - Distribuição de potencial elétrico nodal no modelo de MEF.	83
Figura 41 - Distribuição de campo elétrico nodal no modelo de MEF.	83
Figura 42 - Resposta vetorial do campo elétrico (à esquerda) e resposta vetorial da força eletrostática (à direita).	83
Figura 43 - Distribuição do campo elétrico vetorial em todos os casos de desalinhamento no modelo padrão antes de se completar o “switching”.	84
Figura 44 - Distribuição do campo elétrico no alinhamento (à esquerda) e distribuição das forças eletrostáticas (à direita).	85
Figura 45 - Gráfico do torque do motor do modelo padrão.	85
Figura 46 - Gráfico do torque para variação do raio do rotor.	86
Figura 47 - Gráfico do torque para variação do <i>gap</i> do motor.	87
Figura 48 - Interações eletrostáticas entre pólos e dentes ativos e inativos.	88
Figura 49 - Superposição angular no desalinhamento máximo.	88
Figura 50 - Gráfico do torque para variação da largura do conjunto dente/pólo.	89

Figura 51 - Gráfico do torque para variação da largura somente do dente do rotor...	90
Figura 52 - Primeiro alinhamento de faces do micro-motor com largura de dentes e de pólos diferentes.	91
Figura 53 - Caso de defasagem máxima maior devido a problemas após o primeiro alinhamento.	91
Figura 54 - Curva de torque do modelo padrão para 10V, 50V e 100V aplicados. ...	92
Figura 55 - Torque máximo do micro-motor em função da voltagem aplicada.....	92
Figura 56 - Forças tangencial e normal em um dente ativo usando o modelo padrão.	93
Figura 57 - Comportamento do coeficiente de atrito máximo permitido.	94
Figura 58 - Esquema de construção dos desenhos das máscaras.	96
Figura 59 - Desenho dos 50 tipos diferentes de rotores propostos nesse projeto.....	99
Figura 60 - Desenho dos 12 tipos diferentes de conjuntos eixo/estator propostos nesse projeto.	99
Figura 61 - Desenho da máscara das trilhas de circuito elétrico dos protótipos desse projeto.....	100
Figura 62 - Equipamentos usados no LNLS para deposição do molde de resiste....	101
Figura 63 - Equipamentos usados no LNLS para eletrodeposição das estruturas metálicas do micro-motor.....	101
Figura 64 - Equipamentos usados no LNLS para monitoramento das estruturas. ...	102
Figura 65 - Resultado de problema de descolamento do molde de resiste na placa da fabricação do rotor.	103
Figura 66 - Nova sequência para micro-fabricação dos rotores.	103
Figura 67 - Foto da etapa de remoção da camada de sacrifício na nova sequência de fabricação dos rotores.....	104
Figura 68 - Problema de dissolução do SU-8 na estrutura do estator s702025.....	104
Figura 69 - Fabricação do protótipo de rotor r352020g4: à esquerda, o molde e resiste e, à direita, a estrutura de níquel.	105
Figura 70 - Fabricação do protótipo de estator s702525: à esquerda, o molde e resiste e, à direita, a estrutura de níquel finalizada sobre a trilha elétrica.....	106
Figura 71 - Foto da placa final da estrutura do motor.	106

Figura 72 - Foto da estrutura do eixo e de bushing da trilha t5045 e do estator s501015.	107
Figura 73 - Foto da estrutura final do micro-motor no caso de estator s501020se e rotor r401520.	107
Figura 74 - Diferença do uso do filtro no processo de otimização.	109
Figura 75 - Formato do rotor do micro-motor durante 50 iterações de otimização.	110
Figura 76 - Gráficos que mostram os resultados da otimização topológica do rotor com restrição de 50% de volume: à esquerda, o volume; ao centro, a função objetivo; e à direita, a convergência.	110
Figura 77 - Rotores otimizados com restrição de volume: 90%, 80% e 70%.	111
Figura 78 - Rotores otimizados com restrição de volume: 60%, 50% e 40%.	111
Figura 79 - Rotores otimizados com restrição de volume: 30%, 20% e 10%.	111
Figura 80 - Valor máximo da função objetivo para cada porcentagem de restrição de volume.	112
Figura 81 - Exemplo de capacitor simples (à esquerda) e resposta nodal das voltagens (à direita).	120
Figura 82 - Malha de MEF quadrada usada nessa comparação.	122
Figura 83 - Resposta de distribuição de potencial elétrico nodal do ANSYS (à esquerda) e resposta do programa de MEF (à direita).	123
Figura 84 - Malha de MEF triangular usada nessa comparação.	123
Figura 85 - Resposta de distribuição de potencial elétrico nodal do ANSYS (à esquerda) e resposta do programa de MEF (à direita).	124
Figura 86 - Modelo de finitos do ANSYS para interpretação dos eletrodos no programa desenvolvido.	125
Figura 87 - Imposição de voltagem e carga elétrica padronizada para o caso A (à esquerda) e para o caso B (à direita).	126
Figura 88 - Malha do ANSYS com distinção por cor dos tipos de elementos diferentes.	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões do micro-motor de YASSEEN (1999a).....	59
Tabela 2 – Dimensões do micro-motor de TAVROW (1991),	61
Tabela 3 – Dimensões do micro-motor de BART (1992).....	62
Tabela 4 – Comparação entre a tecnologia de polisilício e eletrodeposição de metais.	62
Tabela 5 – Comparação entre polisilício e níquel.	63
Tabela 6 – Valores dos parâmetros do modelo padrão nas análises.....	82
Tabela 7 - Variação dos valores dos parâmetros dos protótipos.	97

1. INTRODUÇÃO

Nessa seção, busca-se introduzir os principais conceitos de micro-motores através de um estudo que foi realizado em inúmeros artigos científicos com o objetivo de entender melhor seu funcionamento e conhecer aplicações e novas tecnologias que estão sendo desenvolvidas atualmente nessa área da engenharia. Inicialmente, discute-se a história e o funcionamento básico desses motores. Em seguida, apresentam-se alguns conceitos de MEMS, como algumas aplicações recentes e fundamentos de sua fabricação e tecnologias envolvidas. Também são discutidas novas aplicações tecnológicas para micro-motores eletrostáticos e a situação atual das linhas de pesquisa relacionadas com aplicações desses motores. Por fim, é dada uma breve introdução aos principais conceitos da otimização para projetos de micro-motores eletrostáticos.

1.1. Motor eletrostático

Os motores eletrostáticos foram os primeiros motores elétricos a serem desenvolvidos. O primeiro motor eletrostático foi desenvolvido em 1742 (“Electric Bell”, por Gordon), no século 18. Em 1748, Benjamin Franklin completou seu projeto, chamado “roda elétrica”, que nada mais era que um motor eletrostático (que é mostrado na figura abaixo). Em seguida, até o começo do século 19, foram desenvolvidos outros modelos de motores eletrostáticos. Entretanto, esses motores exigiam altas voltagens para seu funcionamento, o que limitou muito seu uso prático.

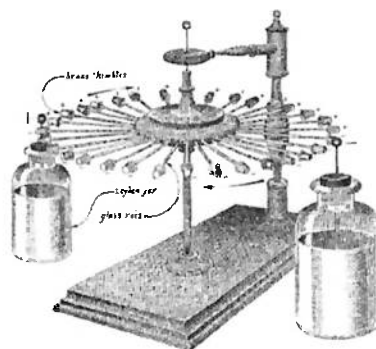


Figura 1 - A “roda elétrica” de Benjamin Franklin, 1748.

O funcionamento da “roda elétrica” de Franklin e de um motor eletrostático comum é basicamente o mesmo. Esse motor baseia-se na força eletrostática criada entre dois pólos opostos, que são representados pelo rotor e pelo estator, como mostra a figura abaixo.

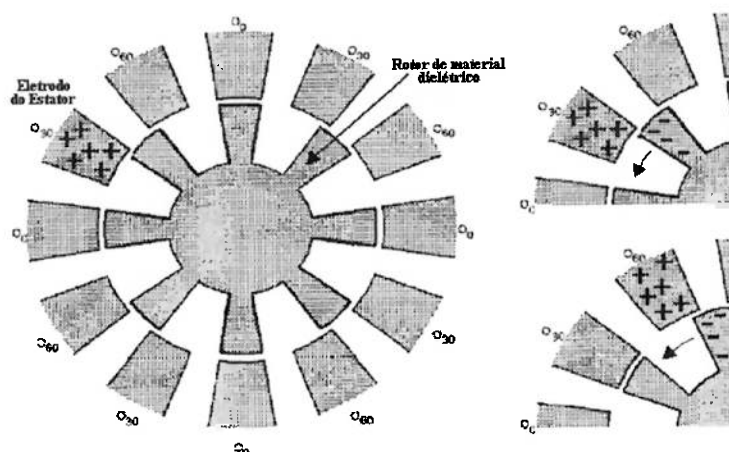


Figura 2 - Interação e cargas eletrostáticas entre o rotor e o estator.

O rotor normalmente é feito de um material dielétrico, no caso da “roda elétrica”, inúmeros “espelhos” de vidro conectados entre si. Uma vez que um de seus dentes se aproxima de um dos eletrodos do estator, suas cargas internas se rearranjam, criando uma carga oposta que é atraída para o eletrodo. Em seguida, graças a um circuito elétrico equipado com um seqüenciador, o eletrodo deixa de ser ativo (sua voltagem cai a zero) e seu eletrodo adjacente passa a ser ativo, atraindo o dente do rotor e rotacionando o mesmo (DELFINO, 2002 e KUCUKKOMURLER, 2000). Mais adiante esse funcionamento será melhor abordado, uma vez que na literatura existem muitas configurações diferentes de projeto e operação de motores eletrostáticos.

A partir de 1980 esses motores ganharam uma nova perspectiva no meio científico internacional. A atenção de muitos pesquisadores se voltou para a possibilidade de fabricação de micro-motores eletrostáticos. Os motivos que levaram os pesquisadores a micro-fabricação de motores eletrostáticos em vez de outros tipos de motores foram porque os motores eletrostáticos poderiam ser fabricados em duas dimensões (enquanto outros tipos, como eletromagnéticos, precisariam ser fabricados

em três dimensões, o que implica em maiores dificuldades de fabricação) e porque sua miniaturização não diminui a densidade de força gerada (enquanto que para motores eletromagnéticos isso acontece) (TAI, 1995).

Dessa forma, com o desenvolvimento de novas técnicas de micro-fabricação e com o surgimento dos MEMS (“Microelectromechanical Systems”), foram abertas grandes oportunidades para os motores eletrostáticos na micro-fabricação e na nanotecnologia.

Hoje em dia, essa área de micro-motores anda expandindo seus horizontes e diminuindo suas dimensões cada vez mais. Tanto, que em julho de 2003, foi desenvolvido na Universidade da Califórnia o menor motor do mundo (mostrado na Figura 3 abaixo), um motor eletrostático de 500 nanômetros, 300 vezes menor que o diâmetro de um fio de cabelo humano, como encontrado no site da Universidade de Berkeley. Seu funcionamento é similar a um motor eletrostático comum: a peça situada no meio do desenho é o rotor e ao seu redor está posicionado o estator com seus eletrodos. De acordo com a ativação dos eletrodos, temos a rotação do rotor.

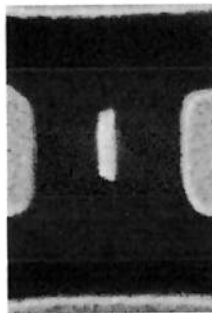


Figura 3 - Menor motor eletrostático do mundo.

1.2. Introdução a MEMS

Uma vez que esse projeto consiste na otimização de um motor eletrostático aplicado a “Microelectromechanical Systems” (MEMS), é de fundamental importância introduzir esse assunto.

No passado, a grande maioria das aplicações para MEMS se limitava ao desenvolvimento de micro-sensores. Recentemente, no entanto, houve um significativo aumento de pesquisas de MEMS relacionadas a micro-motores e micro-

atuadores envolvendo muitos mecanismos diferentes, como MEMS eletrostáticos, magnetostáticos, piezelétricos e termo-elásticos. Essas novas aplicações apresentam grande apelo comercial, como micro-atuadores aplicados em micro-válvulas e no micro-posicionamento para micro cirurgias (TAI, 1995 e XINLI, 2002).

O crescente interesse de pesquisadores e industriais sobre os micro-sistemas, nesses últimos anos, é facilmente justificado pelos inúmeros dispositivos e aplicações potenciais nas mais diversas áreas emergentes de telecomunicações, automobilística, médica e biomédica. O interesse nessa nova área de desenvolvimento é o mesmo que motivou a evolução dos CIs digitais nas últimas décadas, ou seja, redução de tamanho (peso), melhor desempenho, menor consumo, maior flexibilidade de projeto, além dos menores custos de fabricação para grande escala de produção (RIBAS, 2000).

O termo 'micro-máquinas' ("micromachines") é muito usado na Ásia, enquanto que os pesquisadores europeus preferem o termo 'micro-sistemas' ("microsystems"). Nos EUA a sigla 'MEMS' permanece o termo dominante para referenciar não apenas dispositivos eletro-mecânicos, mas também estruturas micro-usinadas de forma geral. O termo "micromachining", por sua vez, refere-se às técnicas ou ao processo de micro-usinagem propriamente dito. Embora os micro-sistemas não sejam realmente novos (sensores de pressão miniaturizados datam da década de 60), a nomenclatura utilizada ainda não está padronizada.

O mercado mundial de micro-sistemas representava 12 bilhões de dólares e 1,3 bilhões de unidades em 1996, e deverá passar para 34 bilhões de dólares e 5,4 bilhões de unidades até o ano 2002. Hoje o crescimento dos mercados de sensores de pressão e acelerômetros (1 eixo) é de 18% e 15%, respectivamente. Sensores de pressão são uma das mais antigas aplicações para MEMS e são utilizados em diversas indústrias como automotiva (sensores de airbag), médica (sensor de pressão sanguínea) e aeronáutica (RAÍ-CHOUDHURY, 2000).

1.2.1. Processos de fabricação em MEMS

O grande desafio consiste em fabricar micro-sensores e micro-atuadores sobre um substrato antes utilizado apenas para a construção de componentes eletrônicos

(transistores, diodos, resistores, etc.). Estes dispositivos têm sido construídos principalmente através do uso de micro-estruturas suspensas ou micro-usinadas. As estruturas comumente encontradas são pontes, vigas e membranas, embora outras geometrias possam também ser realizadas para as mais diversas aplicações.

É possível dividir as técnicas de fabricação de micro-estruturas em dois grandes grupos: processos específicos para micro-sistemas e processos compatíveis com a microeletrônica. Os processos específicos para a construção de micro-sistemas, como, por exemplo, o LIGA e o SCREAM, geralmente comprometem a integração da eletrônica e, por consequência, apenas micro-sistemas híbridos podem ser realizados (NEUMANN, 2003). As técnicas compatíveis com os processos de fabricação de circuitos integrados (microeletrônica), por sua vez, poderiam ainda ser classificadas segundo as regiões ou camadas que são removidas (corroídas) para a liberação das estruturas suspensas:

- Remoção do substrato pela face anterior ou frontal (“front-side bulk micromachining”);
- Remoção do substrato pela face posterior (“back-side bulk micromachining”);
- Remoção de camadas sacrificiais da superfície do substrato (“surface micromachining”).

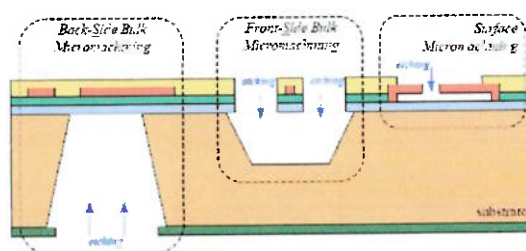


Figura 4 - Processos de fabricação.

A construção de tais estruturas é geralmente feita após a fabricação dos circuitos eletrônicos devido à complexidade dos processos de microeletrônica, enquanto que muitas vezes uma simples etapa de corrosão é suficiente para a liberação das estruturas suspensas. O ato ou etapa de corrosão do material é chamado de “etching”.

Bulk Micromachining:

Micro-estruturas suspensas são facilmente construídas a partir da corrosão da face anterior e/ou posterior do substrato (micro-usinagem em volume), “front-“ e “back-side etching”, respectivamente. As diferenças entre essas duas técnicas de micro-usinagem são bastante acentuadas tanto no processo de fabricação quanto no tipo de estrutura desejada. No caso da usinagem pela face anterior, a suspensão da estrutura deve-se principalmente ao processo de corrosão lateral (“underetching”). Neste caso o alinhamento da máscara para a etapa de gravação é muito simples (convencional dos processos de microeletrônica), permitindo a obtenção de estruturas menores e refinadas. A geometria da estrutura é determinada pelo posicionamento das aberturas na máscara previstas para a corrosão do substrato. Esta técnica é eficiente em termos de custos e tempo de fabricação assim como em relação à compatibilidade com a eletrônica. Porém, a quase inexistente liberdade de alteração das etapas do processo e as características das camadas existentes (espessura, resistividade, dopagem, etc.) comprometem a flexibilidade do projeto e limitam as aplicações alvejadas (NEUMANN, 2003).

A usinagem pela face posterior do substrato, por sua vez, é bastante utilizada para a realização de membranas. O objetivo principal é a realização de uma corrosão profunda e praticamente sem corrosão lateral significativa. Porém, neste caso, o alinhamento da máscara posterior geralmente representa uma dificuldade, assim como o controle da profundidade da corrosão, resultando conseqüentemente em estruturas maiores e mais grosseiras. As soluções químicas utilizadas na corrosão do substrato podem ser tanto úmidas (líquidas) quanto secas (gases, plasmas). Elas apresentam propriedades bastante particulares que fogem, porém do escopo deste texto. As soluções úmidas têm sido preferidas por sua simplicidade e facilidade de aplicação. Uma característica importante da gravura úmida é a sua anisotropia, quando as direções de ataque do material são preferenciais segundo a disposição dos seus planos cristalográficos, e a seletividade do ataque entre diferentes materiais, onde o princípio é remover um material, chamado de camada sacrificial, sem atacar

outros, denominados como camadas de parada de ataque (“etch stop layers”) (NEUMANN, 2003).

Surface Micromachining:

O termo em inglês “surface micromachining”, ou seja, a micro-usinagem de superfície refere-se exatamente aos processos de construção de micro-estruturas suspensas a partir da remoção ou corrosão de camadas presentes na superfície do substrato. Estas camadas podem ser tanto dielétricos quanto metais que quando utilizadas para tal fim são denominadas de camadas sacrificiais. Portanto, após a fabricação do CI, uma certa camada que esteja acessível externamente pode ser removida através de um ataque seletivo. O óxido de silício e o alumínio são bastante utilizados como camadas sacrificiais em processos de silício. Um problema que merece muita atenção durante a construção das estruturas é a colagem das camadas suspensas (“stiction effects”) devido às forças de capilaridade presentes nas soluções de corrosão líquidas (úmidas), (NEUMANN, 2003).



Figura 5 - “Surface micromachining”.

1.2.2. Micro-motores eletrostáticos x eletromagnéticos para MEMS

Nesse ponto, é importante fazermos uma breve discussão a respeito de qual micro-motor, eletrostático ou eletromagnético, é mais conveniente para aplicações em MEMS (mais detalhes sobre essa comparação podem ser vistos na referência XINLI, 2002).

Algumas entidades físicas são sensíveis ao efeito de escala, vamos considerar como dimensão característica do micro-motor o seu comprimento L , linear, como o comprimento do estator, diâmetro do núcleo e etc. Fazendo a análise das forças em ambos os tipos de motores, chegou-se ao seguinte resultado:

Para o motor eletromagnético: $F \propto [L^3]$. Ou seja, se o comprimento L for diminuído de um fator de 10, a força será reduzida de 1000. Portanto no domínio de MEMS a força eletromagnética é muito fraca para ser utilizada.

Para o motor eletrostático: $F \propto [L^0]$. Ou seja, a força eletrostática é independente da dimensão característica L . Assim a força eletrostática é forte o suficiente para atuar no micro-domínio.

Analisando a performance dos dois motores quanto aos critérios potência por unidade de volume e eficiência em ambos, o motor eletrostático se mostrou superior.

1.3. Motores Eletrostáticos aplicados em MEMS

Na literatura existem vários trabalhos envolvendo motores eletrostáticos aplicados a MEMS. Na Figura 6 a seguir apresentam-se vários tipos de motores eletrostáticos (A, B, C e D) encontrados na literatura. Esses motores eletrostáticos são também chamados de “salinet-pole motors” e “step motors”. Segundo sua nomenclatura, o motor A é um motor 6:8, pois possui 6 eletrodos no estator e 8 dentes no rotor. Da mesma maneira, o motor B e D são motores 12:8 e o motor C é um motor 18:6.

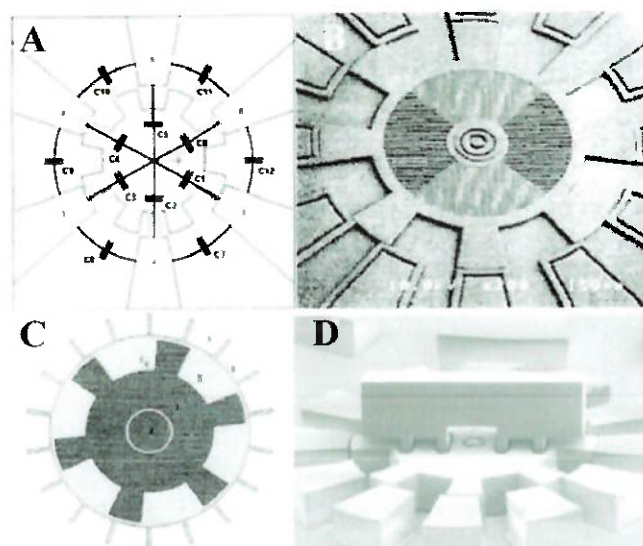


Figura 6 - Alguns exemplos de motores encontrados na literatura.

Como já mencionado, o funcionamento desses motores se dá por forças eletrostáticas entre os eletrodos ativos do estator e os dentes do rotor. O valor dessa força para cada dente é periódico de acordo com a rotação do rotor. Como o material do rotor é um material dielétrico, pode-se considerar que entre cada dente do rotor e um eletrodo do estator há uma relação que pode ser representada por um capacitor (como pode ser observado na parte A da figura acima). Devido à própria rotação do rotor, como alguns dentes ficam alinhados com determinados eletrodos de acordo com o passo percorrido, a capacitância entre esses dois componentes é variável (KUCUKKOMURLER, 2000). Por esse motivo, alguns autores se referem a esses motores como motores de capacitância variável. Assim, uma vez que essa capacitância, que define a diferença de voltagem entre os dois componentes, é variável, o torque também é variável. Por esse motivo, também existem alguns trabalhos na literatura que tentam estabilizar o valor do torque nesses motores (BYUN, 2002).

Motores eletrostáticos apresentam algumas limitações que devem ser levadas em consideração. Uma de suas grandes limitações é o fato das forças eletrostáticas envolvidas serem muito pequenas (da ordem de μN). Para se produzir forças maiores é necessário aumentar a área ou usar altas voltagens. No entanto, aumentar a área constitui um grande problema de design, uma vez que a idéia de MEMS é produzir micro-mecanismos. Na literatura já existem trabalhos relacionados a aumentar as forças eletrostáticas envolvidas através do aumento da área, como é mencionado na referência (TAI, 1995).

Quanto ao uso de altas voltagens, isso inviabilizaria várias aplicações para esses motores, como, por exemplo, aplicações na medicina.

Outra limitação desses motores é que a força eletrostática que movimenta o motor pode somente ser atrativa, por isso motores eletrostáticos não se aplicam quando também há a necessidade de forças repulsivas (TAI, 1995).

Também faz parte do escopo desse trabalho a simulação do motor eletrostático estudado e na literatura existem muitos trabalhos relacionados à simulação computacional desses motores através do Método dos Elementos Finitos (MEF). Na referência (DELFINO, 2002), é abordado uma metodologia de modelagem e simulação de um motor eletrostático para diminuir erros no resultado e utilizar uma

malha de elementos (“mesh”) menos discretizada, o que implica em menor custo computacional. Também é reportado na literatura modos de operar os eletrodos do estator do motor, para se obter uma resposta mais rápida e estável na rotação do rotor (KUCUKKOMURLER, 2002). Também existem trabalhos na literatura com o objetivo de simular e testar experimentalmente esses motores analisando sua dinâmica e sua resposta transiente no tempo, como é o caso da referência (BART, 1999).

Existem também alguns trabalhos de fabricação de micro-motores 12:8 usando técnicas de micro-fabricação reportados na literatura (FRANGOULT, 1995 e CHIEN-HUNG, 2002). Ambos reportam as técnicas de micro-fabricação usadas e alguns problemas ocorridos na fabricação de protótipos, como deslocamento de partes do material final.

1.3.1. Aplicações Recentes para Micro-Motores Eletrostáticos

As linhas de pesquisa para micro-motores vêm se expandindo em diversos campos da engenharia. A seguir são listadas algumas das aplicações mais recentes de promissoras dessa área.

Uma aplicação de motores eletrostáticos em MEMS que vem crescendo bastante é seu uso em scanners de alta precisão (YASSEEN, 1999a). Basicamente, uma camada de níquel reflexivo é depositada em uma área poligonal na superfície do rotor do micro-motor, como mostrado na Figura 6-B. Dessa forma, o feixe de laser incidente nessa camada é difratado em múltiplos feixes que fazem a varredura do scanner. Uma figura dessa aplicação é apresentada em seguida.

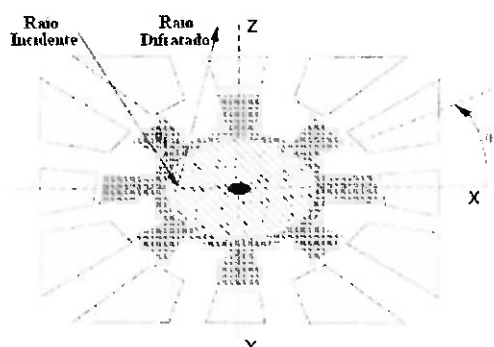


Figura 7 - Micro-motor utilizado em scanner de alta precisão.

Uma das possibilidades de aplicação de micro-motores eletrostáticos é na área de cirurgias minimamente invasivas, ou “minimally invasive surgery” (MIS), que utiliza como principal ferramenta o endoscópio. Este tipo de cirurgia é muito importante, pois reduz os custos de tratamento e de recuperação do paciente, além de reduzir o sofrimento do paciente e aumentar a probabilidade de sucesso da operação. Um endoscópio comum possui um campo de visão limitado, sendo necessário trocar de catéteres durante a operação para se obter outros ângulos de visão. Utilizando-se um micro-motor eletrostático para girar um prisma na ponta do endoscópio, o campo de visão poderia alcançar 360° (DUFOUR, 1997, TENDICK, 1998 e KONTARINIS, 1995)

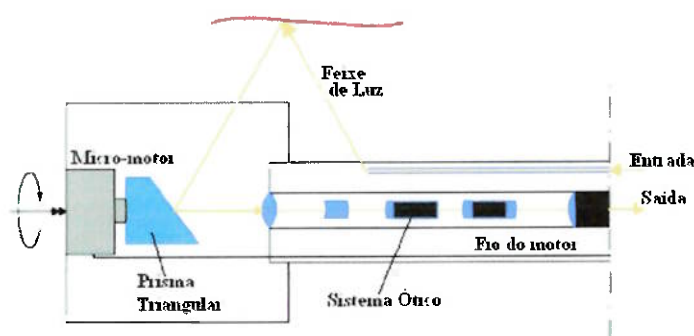


Figura 8 - Esquema do micro-motor utilizado no endoscópio.

Outra aplicação para o micro-motor é o de “switch” óptico, utilizado em redes de fibra óptica. A idéia desse atuador é que possa haver várias opções para se posicionar o “switch” de forma a obter várias interconexões para que se tenha uma rede independente de protocolos de comunicação, taxa de bits, comprimento de onda usado e comprimento de banda. Atualmente, muito está sendo feito nesta direção, como, por exemplo, o “switch” óptico 1x8, que consiste em um micro-motor eletrostático que suporta um espelho (YASSEN, 1999b), mostrado na Figura 6-D.



Figura 9 - Micro-motor usado para armazenamento de informação.

Outra linha de pesquisa, nos Estados Unidos, vem tentando usar micro-motores eletrostáticos para armazenamento de dados em bits impressos em seu rotor (MOURLAS, 1996), como se fossem micro-discos de armazenamento de dados. Isso gera a necessidade de se otimizar o controle desses micro-motores para que se consiga uma velocidade de rotação constante para que não haja perda de dados na sua leitura. No mesmo trabalho, discute-se também a possibilidade de se armazenar de 0.1 até 4000 GB dependendo da arquitetura do rotor. Também sugere-se que esse sistema de armazenamento pode ser somente para leitura de dados, como também para leitura e escrita de dados (“read/writable”). A partir dessas opções todas, pode-se inferir que esse ramo da engenharia é muito promissor para aplicações de micro-motores eletrostáticos. A Figura 9 mostra um desses micro-motores usados como micro-discos.

2. OBJETIVOS

Esse projeto consiste no desenvolvimento de um software baseado no projeto de um motor eletrostático otimizado. Assim, esse projeto tem por objetivos, inicialmente, o estudo de micro-motores eletrostáticos, seu funcionamento e suas principais características, o estudo do Método de Elementos Finitos (MEF) aplicado à análise de elementos eletrostáticos e o estudo de métodos de otimização (incluindo o método de otimização topológica, que será foco da segunda parte desse trabalho). Após esses estudos iniciais, com melhor conhecimento do micro-motor, serão feitas análises do projeto desses motores através de simulações computacionais em elementos finitos (usando o software comercial ANSYS), para poder se conhecer melhor a influência de seus aspectos de projeto no torque final do motor. Em paralelo a essa fase de análises do projeto, pretende-se também otimizar o projeto de um micro-motor buscando seu torque máximo. Para isso, primeiro será implementada uma rotina para simulação de elementos finitos em linguagem C (que é o foco dessa primeira parte do projeto). Fazendo uso dessa rotina, será implementado um software para otimização do projeto de um micro-motor usando o Método de Otimização Topológica (MOT), o que será mais focado na segunda parte do trabalho, no próximo semestre.

3. JUSTIFICATIVA

Como foi mencionado na introdução, a utilização de MEMS em diversos de ramos de pesquisa, como engenharia e medicina, entre os principais, vem sendo amplamente utilizada para desenvolvimento de micro-sensores e micro-atuadores. Pesquisas nesta área vêm crescendo cada vez mais, possibilitando o surgimento de novas tecnologias de micro-fabricação, justificando o crescente interesse pela área que existe atualmente.

O projeto de micro-motores aplicado em MEMS vem se tornando cada vez mais atrativo para pesquisadores envolvidos não somente na área de micro-fabricação, como também na medicina, na bioengenharia, na comunicação de dados e em muitas outras aplicações.

Por esse motivo, o micro-motor eletrostático otimizado e projetado neste trabalho, pode ter múltiplas aplicações, como mencionado na introdução: micro-válvulas, micro-bombas, posicionador de micro-espelhos para endoscópio e “switch” óptico e outros.

Vale ressaltar que muitos métodos de projeto de micro-motores já existem e são reportados na literatura, no entanto, nenhum deles se propõem a projetar o motor através de metodologias que possam ser implementadas computacionalmente com o intuito de otimizar o motor, como é o caso do Método de Otimização Topológica, em que será fundamentado esse trabalho.

Também vale destacar que muitos poucos projetos na literatura se preocupam com a fabricação de protótipos desses micro-motores e não existem nenhum trabalho em nível nacional que trate da fabricação desses motores.

Portanto, esse projeto não somente representa um estudo significativamente importante para projeto de micro-motores no âmbito internacional, como também é inovador no âmbito nacional.

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Nessa seção, são apresentados os principais conceitos usados para implementação do programa de MEF (início do software de otimização do micro-motor) e para simulação do projeto de um micro-motor, que será apresentado na seção de resultados. Nessa seção, inicialmente será introduzida a formulação de MEF eletrostático. Em seguida, será apresentada a estruturação do software ANSYS, buscando compreender melhor seu funcionamento. Depois, são feitas considerações quanto a resolução de MEF eletrostático no ANSYS para se realizar as simulações propostas nesse projeto. Por fim, são introduzidos os principais tópicos da otimização, como também o conceito de Otimização Topológica e sua aplicação ao problema do projeto de micro-motor eletrostático.

4.1. Introdução ao Método de Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos é um procedimento numérico que pode ser usado para se obter soluções para uma abrangente variedade de problemas de engenharia envolvendo análise de tensões, transferência de calor, eletromagnetismo, comportamento de fluidos, etc. (BATHE, 1992).

Em geral, problemas de engenharia são modelos matemáticos de situações físicas. Modelos matemáticos são equações diferenciais com condições de contorno e parâmetros iniciais definidos (BATHE, 1992). Essas equações diferenciais são resultado de se aplicar Leis fundamentais ou Princípios da Natureza para sistemas ou volumes de controle e, dessa forma, representam um balanço de massa, força e energia da estrutura em estudo. As soluções exatas para essas equações possuem duas partes: uma parte homogênea e uma parte particular. Para se definir a solução da parte homogênea, são usados parâmetros do comportamento natural do sistema em questão e propriedades como o módulo de elasticidade, condutividade térmica, condutividade viscosa, etc. Em suma, são as propriedades físicas que definem esse comportamento natural. Quanto à parte particular da solução das equações diferenciais, cabem os parâmetros de distúrbio do sistema. Esses parâmetros podem ser expressos por forças externas, momentos, diferença de temperatura, diferença de

pressão, etc. Assim, esses parâmetros compõem as matrizes que definem as equações diferenciais: os parâmetros de comportamento do sistema representam, por exemplo, as matrizes de condutibilidade e rigidez; enquanto os parâmetros de distúrbio geram a matriz de carregamento.

No entanto, existem muitos problemas de engenharia em que não é possível obter a solução exata. Então, para resolver esses problemas, é preciso usar aproximações numéricas. Enquanto soluções exatas nos dão o exato comportamento do sistema em qualquer ponto, as aproximações numéricas apresentam o comportamento exato somente de pontos discretos, chamados de “nós”. Assim, o primeiro passo de um procedimento numérico é a discretização. Esse processo divide o domínio de interesse em pequenas sub-regiões (subdomínios) e nós (MOAVENI, 1999).

Hoje em dia, os métodos numéricos mais usados são o Método de Diferenças Finitas (MDF) e o Método dos Elementos Finitos (MEF) como mostrado em SILVA, 2003. Basicamente, pelas diferenças finitas, as equações diferenciais são escritas para cada nó através de diferenciações numéricas. Em oposição, o Método dos Elementos Finitos usa a Integral das equações diferenciais e as define em subdomínios resultantes da discretização do domínio, o que possibilita sua aplicação em domínios irregulares.

Nesse projeto será usado o MEF para simulação computacional do protótipo do micro-motor a ser construído e para implementar parte do software de otimização para micro-motores eletrostáticos. Na próxima seção, iremos discutir o MEF eletrostático que é implementado no software de elementos finitos desenvolvido nesse projeto e que é base para a formulação de MEF usada pelo ANSYS para análise eletrostática.

4.2. MEF Eletrostático

Para resolução de problemas de natureza eletrostática, considera-se que o campo eletrostático deva satisfazer às seguintes equações de Maxwell (BATHE, 1992), tanto no ANSYS quanto a teoria de Elementos Finitos:

$$\nabla \times \mathbf{E} = \mathbf{0} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2)$$

onde $\nabla \times$ é o operador rotacional, $\nabla \cdot$ é o operador divergente, \mathbf{E} é o vetor de campo elétrico, \mathbf{D} é o vetor de deslocamento elétrico e ρ é a carga elétrica livre.

A partir de outra relação constitutiva para campos elétricos, temos:

$$\mathbf{D} = \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{E} \quad (3)$$

onde $\boldsymbol{\varepsilon}$ é a matriz de permissividade elétrica:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{XX} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{YY} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{ZZ} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Também é importante levar em consideração as condições de contorno relevantes em uma interface dielétrica:

$$E_{T1} - E_{T2} = 0 \quad (5)$$

$$D_{N1} - D_{N2} = \rho_s \quad (6)$$

onde E_{T1} e E_{T2} são as componentes tangenciais do vetor \mathbf{E} em ambos os lados da interface, D_{N1} e D_{N2} são as componentes normais do vetor \mathbf{D} em ambos os lados da interface e ρ_s é a densidade de carga elétrica na superfície da interface.

A partir das expressões anteriores, uma solução para o problema pode ser obtida introduzindo a variável de potencial elétrico no problema, o que permite que o campo elétrico seja expresso por:

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (7)$$

Essa equação nos assegura que o campo eletrostático é irrotacional, nos permitindo ignorar a equação **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

Dessa forma, basta resolver a equação de Maxwell **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** e a equação constitutiva **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** Assim, temos a seguinte equação diferencial, que deve ser resolvida levando em consideração as condições de contorno **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** e **Erro! A origem da referência não foi encontrada.:**

$$-\nabla \cdot (\varepsilon \nabla V) = \rho \quad (8)$$

Uma vez que o grau de liberdade de cada nó é a voltagem (potencial elétrico), considerando a matriz de função de forma N , podemos expressar a voltagem V como sendo:

$$\mathbf{V} = \mathbf{N}^T \mathbf{V}_e \quad (9)$$

onde N é a matriz de funções de forma (funções de interpolação do elemento) e V_e é o vetor de potenciais elétricos nodais.

Para o elemento quadrilátero plano usado na rotina de MEF desenvolvida nesse projeto, utilizam-se como funções de forma, as funções de elemento quadrilátero, descritas abaixo:

$$N_1 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta) \quad (10)$$

$$N_2 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta) \quad (11)$$

$$N_3 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta) \quad (12)$$

$$N_4 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta) \quad (13)$$

Essas funções de forma derivam da formulação de MEF isoparamétrico (que pode ser visto na referência BATHE, 1992), que, além do fato de que seu uso é maior na literatura, apresenta uma metodologia de fácil implementação computacional.

Usando o elemento isoparamétrico nesse caso, podemos transformar qualquer elemento (de quaisquer dimensões) em um elemento quadrado de lados que vão de -1 a 1 nas coordenadas relativas (ξ, η), como mostra a figura abaixo.

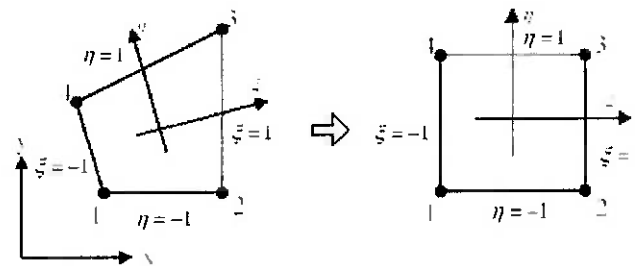


Figura 10 - Transformação de elemento isoparamétrico.

Dessa forma, podemos relacionar o valor do potencial absoluto dos nós com o novo valor de potencial parametrizado do elemento isoparamétrico, da figura anterior, usando as suas funções de forma, como é mostrado abaixo:

$$V = N_1V_1 + N_2V_2 + N_3V_3 + N_4V_4 \quad (14)$$

Já para o elemento SOLID128 do ANSYS, que é o elemento usado para simulação tridimensional do projeto do protótipo a ser fabricado, a função de forma pode ser encontrada na referência (ANSYS, 2004).

Dessa forma, pode-se montar a matriz K_e do elemento (BATHE, 1992):

$$K_e = \int_{Vol} (\nabla N^T)^T \epsilon (\nabla N^T) dVol \quad (15)$$

No entanto, após a parametrização, a integração deve ficar em função das variáveis (ξ, η). Para isso devemos observar a seguinte transformação:

$$dV = dx dy dz = t \cdot \det J \cdot d\xi d\eta \quad (16)$$

onde t é a espessura do elemento e J é a matriz Jacobiana, que no caso bidimensional pode ser dada por:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Assim, adicionando o Jacobiano do elemento para transformar as coordenadas globais em locais, a equação anterior pode ser expressa da seguinte forma:

$$\mathbf{K}_e = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 (\nabla \mathbf{N}^T)^T \boldsymbol{\varepsilon} (\nabla \mathbf{N}^T) h_e \det J d\xi d\eta \quad (18)$$

onde h_e é a espessura do elemento (considerando estado plano de tensão) e $\det J$ é o determinante da matriz jacobiana J , que já foi apresentada anteriormente.

Para resolução dessa integral, não é possível o cálculo analítico na maioria das vezes, portanto, a matriz de rigidez do elemento é calculada por métodos numéricos de integração, como por exemplo, a Quadratura de Gauss-Legendre (BATHE, 1992).

De forma análoga ao desenvolvimento da matriz \mathbf{K}_e , podemos obter a matriz de carga nodal \mathbf{Q}_e como:

$$\mathbf{Q}_e = \mathbf{Q}_e^c + \mathbf{Q}_e^{sc} \quad (19)$$

onde:

$$\mathbf{Q}_e^c = \int_{Vol} \rho \mathbf{N}^T dVol \quad (20)$$

$$\mathbf{Q}_e^{sc} = \int_S \rho_s \mathbf{N}^T dS \quad (21)$$

onde ρ , nesse caso, é o vetor de densidade de carga elétrica e ρ_s é o vetor de densidade de carga elétrica superficial, ambos dados como entrada pelo usuário.

A partir dessas expressões, podemos definir para cada elemento da nossa malha a equação de MEF que rege seu comportamento elétrico:

$$[K_{\phi\phi}]_e [V]_e = [Q]_e \quad (22)$$

Essa equação representa o comportamento eletrostático de apenas um elemento. No cálculo de problemas de MEF, consideram-se vários elementos que apresentam alguns graus de liberdade em comum. Após juntar as equações matriciais de cada elemento, obtém-se o que é chamada de equação global, que, nesse caso, vamos definir como:

$$[K_{\phi\phi}] [\phi] = [Q] \quad (23)$$

onde $[K_{\phi\phi}]$ é a matriz de rigidez global, $[\phi]$ é a matriz de potenciais elétricos globais e $[Q]$ é a matriz de carga global.

A partir da resolução dessa equação, fornecendo o valor da matriz $[Q]$ (valores de carga elétrica de cada nó da malha), obtém-se os valores dos potenciais elétricos nos nós da malha de elementos finitos.

No entanto, no caso em que impomos os valores de potencial elétrico de alguns nós (em vez de impor valores de carga elétrica), devemos tratar matematicamente a eq.(23) para que possamos resolver o problema de MEF de maneira similar ao caso da imposição de carga elétrica. Esse tratamento matemático é conhecido como “Condições de Contorno de Dirichlet” (SILVA, 2003).

Para introduzir esse método, vamos considerar primeiro o exemplo de uma equação de MEF eletrostático com quatro graus de liberdade, como segue abaixo.

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Nesse exemplo, o valor do primeiro grau de liberdade da matriz de potencial elétrico está prescrito, ou seja, é uma imposição do problema. Para resolver o problema da mesma forma que se resolve um problema em que somente a carga elétrica é imposta, devemos considerar que este grau de liberdade é uma variável e devemos garantir que, após a resolução do sistema, essa variável tenha o valor prescrito, como mostra a equação abaixo:

$$\phi_1 = \bar{\phi}_1 \quad (25)$$

Para impor essa condição no problema, devemos modificar a matriz de rigidez zerando os termos k_{1j} e k_{i1} (onde $i=2,3,4$ e $j=2,3,4$) e impondo valor unitário à variável k_{11} , como mostra a equação abaixo. Para impor essas modificações na matriz de rigidez, deve-se compensar a matriz de carga elétrica como é mostrado na equação abaixo.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ 0 & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ 0 & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\phi}_1 \\ q_2 - k_{21}\bar{\phi}_1 \\ q_3 - k_{31}\bar{\phi}_1 \\ q_4 - k_{41}\bar{\phi}_1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Dessa forma, toda vez que um grau de liberdade é prescrito, deve-se seguir esse método para obter uma equação final de MEF que possa ser solucionada matematicamente pelos mesmos métodos usados para o caso de imposição de carga elétrica.

Por fim, para resolver a eq.(23), são usados métodos numéricos como o método de eliminação de Gauss e o método dos gradientes conjugados (BATHE, 1992). Foge do escopo desse trabalho entrar em detalhes quanto a esses métodos, mas como será mostrado mais a diante, ambos os métodos são usados em rotinas em linguagem C para resolução do problema de MEF no programa de Otimização Topológica.

No modelo tridimensional do micro-motor eletrostático que é simulado em ANSYS para se projetar os modelos de motor a serem fabricados, uma das principais

características de projeto é a força eletrostática no dente do rotor para cada modelo de motor testado. Para entender melhor a obtenção dessas forças no modelo de MEF, devemos expressar sua formulação. Tais forças são determinadas usando o tensor de tensão de Maxwell nas superfícies do elemento (para melhor compreensão, ver referência ANSYS, 2004), resultando na expressão abaixo:

$$\mathbf{F}_e^{\text{MX}} = \varepsilon_0 \int_S \begin{bmatrix} \frac{1}{2} E_x^4 E_y^2 & E_x E_y \\ E_x E_y & \frac{1}{2} E_x^2 E_y^4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{Bmatrix} dS \quad (27)$$

onde ε_0 é a permissividade do espaço livre (no caso, o ar), S é a superfície do elemento, n_1 e n_2 são a componente na direção x e a componente da direção y , respectivamente, do vetor unitário normal à superfície S .

Essa formulação de elementos eletrostáticos será usada nesse projeto não somente para conhecer melhor o funcionamento do software comercial ANSYS, mas também para ser implementado em C uma rotina de MEF eletrostático. Como a eq.(22) mostra, deve-se entrar com os valores da carga elétrica em alguns pontos do domínio para se obter a resposta do problema. Dessa forma, devemos definir como encontrar a carga elétrica que deve ser aplicada para podermos simular o micro-motor eletrostático.

Assim, podemos aproximar a interação entre um dente do rotor com um pólo do estator como sendo um capacitor simples de duas placas paralelas. No caso da rotina de MEF que foi implementada nesse projeto, deve-se considerar a situação estática do dente do rotor alinhado com o pólo do estator.

Dessa forma, primeiro devemos levar em consideração a equação física que relaciona carga elétrica e capacitância em um capacitor de duas placas planas (SERWAY, 1992):

$$Q = CV \quad (28)$$

onde Q é a carga elétrica nas placas do capacitor, C é a capacitância e V é a diferença de potencial elétrico.

Para o caso do capacitor de duas placas, podemos definir sua capacitância como sendo:

$$C = \frac{\epsilon L h}{d} \quad (29)$$

onde ϵ é a permissividade do material dielétrico entre as duas placas, L é o comprimento de cada placa, h é a profundidade de cada placa e d é a distância entre as duas placas.

No caso estático que é considerado na rotina de MEF desse projeto, o “material dielétrico” do capacitor equivalente é o próprio ar entre rotor e estator e a distância d é o gap do motor. Assim, o valor de ϵ deve ser substituído por ϵ_0 que é a permissividade do vácuo, que é $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$ (SERWAY, 1992).

Portanto, a partir da formulação acima, podemos definir a carga elétrica a ser aplicada na malha de elementos finitos da rotina de MEF desse projeto.

4.3. Introdução ao ANSYS

ANSYS é um dos softwares comerciais mais usados na engenharia para resolução de problemas que envolvem o MEF.

Atualmente, o ANSYS pode ser usado em muitos ramos da engenharia, abrangendo a aeroespacial, automotiva, eletrônica e nuclear. No entanto, para se usar o ANSYS ou qualquer outro programa que trabalhe com o MEF inteligentemente, é imperativo que se entenda conceitos básicos e limitações do Método dos Elementos Finitos (MEF), que já foram discutidos.

Para o uso do ANSYS ou qualquer outro software de CAE, é preciso conhecer os passos básicos que envolvem uma análise de MEF (MOAVENI, 1999):

Fase de Pré-Processamento:

Criar e discretizar o domínio no MEF, ou seja, ao modelá-lo, subdividir o problema em nós e elementos.

Assumir uma função de forma para representar o comportamento físico de cada elemento, ou seja, uma função de aproximação contínua é assumida para representar a solução do elemento.

Desenvolver equações para um elemento.

Juntar os elementos para representar o problema inteiro. Construir a matriz de rigidez global.

Aplicar condições de contorno, condições iniciais e carregamento.

Fase de Solução:

Resolver um conjunto de equações algébricas lineares simultaneamente para se obter soluções nodais, como valores de deslocamentos de diferentes nós, ou temperaturas, ou tensão mecânica, etc.

Fase de Pós-Processamento:

Obter as informações em formatos de listas ou gráficos, como a distribuição de pressão, tensão mecânica, temperatura e outros parâmetros importantes ao longo da estrutura ou mesmo ao longo do tempo.

Muitos dos passos acima são completados automaticamente pelo ANSYS após a definição do tipo de material e do tipo de análise a ser seguida. Em geral, após a modelagem e sua discretização – feito no PREP7, General Preprocessor, como indica a figura abaixo –, deve-se entrar com o tipo de elemento (da própria biblioteca de elementos do ANSYS) a ser usado e seus parâmetros, como as matrizes de massa, rigidez e acoplamento. Aplicam-se, então, as condições de contorno do passo 5, escolhe-se um tipo de análise – SOLU, Solution, na figura abaixo – para que o ANSYS determine o conjunto de equações a serem usadas e comece a resolução do problema. Após a resolução do problema, para se obter os resultados desejados nos formatos desejados (gráficos, listagens, gráficos estruturais da peça, etc.), deve-se optar por usar o POST1, General Postprocessor, ou o POST26, Time-History Postprocessor (ANSYS, 1994).

Esses conceitos todos são imprescindíveis para o entendimento da rotina de MATLAB usada para se criar um arquivo de entrada para o ANSYS (usando a linguagem ADPL própria do software ANSYS) para se modelar o protótipo do micro-motor desse projeto.

A figura abaixo ajuda na compreensão do funcionamento do software.

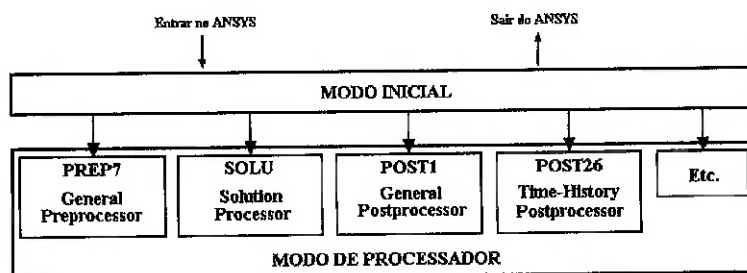


Figura 11 - Organização do ANSYS

4.4. MEF Eletrostático no ANSYS

A resolução do MEF Eletrostático no software comercial ANSYS é similar a uma análise estática comum, com exceção de que os elementos envolvidos são elementos específicos para uma análise eletrostática e as propriedades dos materiais devem condizer com as características do elemento. A seguir será mostrado como fazer a análise eletrostática no ANSYS para o caso da simulação de um protótipo do micro-motor. Isso é necessário, pois a resposta da rotina de MEF desenvolvida deve ser igual à resposta do ANSYS, se e somente se tivermos comprovado que o método usado para obter o modelo no ANSYS está correto. No Apêndice A, é apresentado um exemplo de aplicação do MEF eletrostático do ANSYS para um capacitor simples, de forma que é possível comparar o resultado do ANSYS com o resultado do cálculo analítico do capacitor plano simples, confirmando a eficácia da simulação de elementos de MEF eletrostático no ANSYS.

4.4.1. Simulação computacional do projeto do motor

Antes da fabricação de um protótipo, é importante simular computacionalmente o projeto do micro-motor para se analisar alguns aspectos

importantes no seu funcionamento, como a magnitude do campo eletrostático formado e o valor da força eletrostática no dente do rotor.

A simulação desse motor é feita em Elementos Finitos no software comercial ANSYS. Para análise desse micro-motor, utiliza-se a mesma análise usada em Comb-Drives que é chamada de Análise de Campo Eletrostático no ANSYS, segundo a referência ANSYS, 2004. Nessa análise, pode-se ter como entrada potencial elétrico ou carga elétrica e a saída é geralmente a distribuição do potencial elétrico e o campo elétrico. O software assume que essa análise é linear para sua resolução, em que o campo elétrico é proporcional à voltagem aplicada. No ANSYS existem dois métodos de resolução de problemas eletrostáticos, o método P (“p-method”) e o método H (“h-method”).

Basicamente ambos os métodos oferecem o mesmo tipo de formulação com exceção do fato de que o método P utiliza funções de interpolação de alta ordem (níveis P) de acordo com a necessidade de cada elemento, para diminuir o erro e se aproximar do valor da resposta real do problema. Dessa forma, de acordo com os critérios de convergência (que podem ser padrão ou pré-estabelecidos pelo usuário), o método seleciona alguns elementos para aumentar o nível P de sua função de forma, diminuindo a necessidade de se melhorar a malha de elementos finitos (“mesh”). Assim é possível a obtenção de resultados precisos para campos elétricos e forças elétricas sem necessidade de um estudo maior quanto ao refinamento da malha por parte do usuário, o que por muitas vezes representa um grande problema para acurácia e, até mesmo, resolução do problema (ANSYS, 1994).

Também se deve destacar que para obtenção das forças elétricas do modelo de finitos, é preciso usar elementos tridimensionais, pois no cálculo dessas forças, como pode ser observado na eq.(27), é calculada uma integral na superfície ortogonal ao vetor de força eletrostática, sendo necessário, portanto, o uso de elementos tridimensionais que apresentem essa superfície.

Portanto, nas simulações do projeto do micro-motor nesse trabalho, serão usados elementos tridimensionais que utilizam o método P para análise eletrostática.

Assim, o elemento usado para resolução do problema foi o elemento SOLID128, com 20 nós por elemento e somente um grau de liberdade (a voltagem)

em cada nó. A formulação desse elemento é similar à formulação apresentada para MEF eletrostático, mas aplicada a um elemento tridimensional.

Para essa simulação eletrostática, pode-se simplesmente simular um dente do rotor sendo atraído por forças eletrostáticas de um pólo do estator. Como já foi discutido anteriormente, para um motor 12:8, que é o caso do modelo principal que será simulado e fabricado, teremos 4 dentes do rotor (diametralmente opostos) que estarão sendo atraídos ao mesmo tempo a cada mudança de fase, como mostra a figura abaixo.

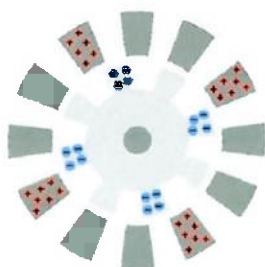


Figura 12 - Força eletrostática em 4 dentes do rotor.

Dessa forma, podemos observar na figura anterior que o posicionamento relativo entre dentes do rotor e pólos ativos do estator é igual para os 4 dentes que estão sob efeito de forças elétricas. Portanto, é válida a suposição de se analisar somente um par de pólos rotor/estator e multiplicar esse resultado por 4 para contribuição no cálculo do torque, ou seja, o valor da força encontrada para cada dente do rotor deve passar pela expressão abaixo para podermos encontrar o torque no motor.

$$T = 4rF_t \quad (30)$$

onde r é o raio do rotor, F_t é a força tangencial resultante e T é o torque do motor.

Assim, para simular essa interação eletrostática entre um dente do rotor e um pólo do estator (chamada de “switching”), devem-se impor diferentes ângulos de defasagem entre os dois, dentro da faixa de 0° (em que o dente está alinhado ao pólo do estator) até o ângulo máximo de desalinhamento de um dente, que no caso do

motor 12:8 é de 15° . Seguindo esse método, pode-se analisar a influência da força eletrostática para configurações diferentes do motor 12:8.

Para análise do atrito no eixo do micro-motor, devemos observar o comportamento das forças normais em cada dente do rotor. Temos, em cada switching, 4 dentes ativos no rotor (separados por 90°), como mostra na Figura 13(A).

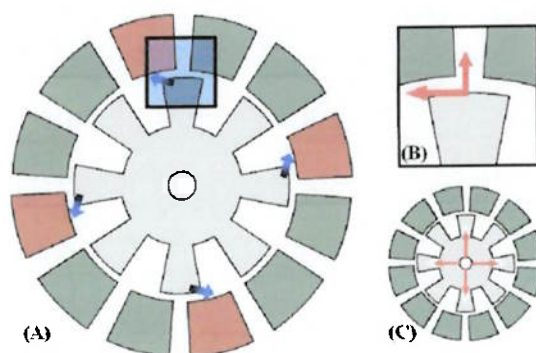


Figura 13 - Situação das forças normais durante o funcionamento do micro-motor.

Como pode ser observado na parte B, essas forças atrativas se decompõe em uma força tangencial que gera o torque (como já foi discutido) e uma força normal que gera a força de atrito com o eixo. Portanto, como mostra a parte C da figura, podemos considerar a existência de 4 forças normais, defasadas espacialmente de 90° , que devem estar em equilíbrio no funcionamento do motor. No entanto, na prática, sempre há diferenças que podem gerar uma força resultante, ou mesmo, problemas de acionamento dos pólos do estator que possam criar atrasos entre o acionamento dos pólos e gerar um desbalanceamento das forças do micro-motor.

Portanto, vamos analisar como pior caso possível, o caso em que 2 pólos adjacentes não são ativados, gerando a maior força radial possível no eixo do rotor, que seria composta das forças normais de cada um dos 2 dentes ativos do rotor, nesse caso, que são defasadas espacialmente de 90° , como mostra a Figura 14.

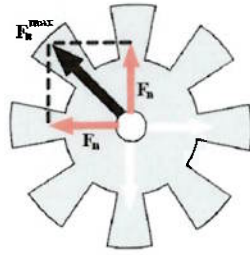


Figura 14 - Força radial resultante no micro-motor.

Dessa forma, calculando a composição das forças, temos:

$$F_n^{\max} = \sqrt{2}F_n \quad (31)$$

onde F_n é a força normal em cada dente ativo do rotor e F_n^{\max} é a força radial que pode gerar o atrito máximo entre o rotor e seu eixo.

Conhecendo essa força radial máxima, podemos então analisar o atrito no eixo do micro-motor através da seguinte fórmula para o caso de atrito:

$$F_t^{\text{atr}} = \mu_{\text{tor}} F_n^{\max} \quad (32)$$

onde F_t^{eq} é a força de atrito tangencial e μ_{tor} é o coeficiente de atrito que gera o contra-torque no rotor.

Substituindo a eq.(31) na eq.(32), obtemos a expressão final para obtenção do atrito torsional:

$$F_t^{\text{atr}} = \sqrt{2}\mu_{\text{tor}} F_n \quad (33)$$

Vale destacar que, mais adiante, o objetivo das análises será encontrar o coeficiente de atrito máximo que possa gerar um contra-torque igual ao torque final do motor. Nesse caso, a força que deve ser igualada a força de atrito tangencial é uma força tangencial equivalente, resultante da transferência do torque final para o ponto de análise. Essa transferência se dá dividindo o torque final pelo raio do ponto de análise, que no caso é o próprio raio do rotor. Assim, temos que a força

equivalente será igual a força tangencial multiplicada por 4, segundo a eq.(30), modificando a expressão (33) para:

$$4F_t = \sqrt{2}\mu_{tor}F_n \quad (34)$$

Essas equações serão necessárias para análise do torque e do atrito no modelo de elementos finitos do protótipo do micro-motor mais adiante.

Seguindo esses preceitos, foi implementado em MATLAB uma rotina que desenvolve um arquivo de entrada para o software ANSYS usando a linguagem ADPL (linguagem própria do ANSYS) para desenvolver o modelo de MEF no ANSYS. Essa rotina está no final deste documento no ANEXO A.

4.5. Principais Conceitos de Otimização

Essa primeira parte do projeto, foco deste trabalho, basicamente se restringe ao estudo e desenvolvimento da formulação do Método de Elementos Finitos (MEF) para o problema do micro-motor eletrostático. Entretanto, cabe a apresentação dos principais conceitos de otimização uma vez que a rotina de MEF desenvolvida nessa etapa do projeto faz parte da estrutura lógica da otimização do micro-motor, como será mostrado mais adiante. Dessa forma, a seguir serão apresentados alguns conceitos importantes da otimização para o entendimento do projeto otimizado do micro-motor, como características de otimização, parâmetros, formas, etc.

A otimização aplicada na engenharia consiste em se utilizar métodos computacionais para obter as dimensões, forma ou topologia (parâmetros de projeto) ótimas de estruturas. A aplicação dessas técnicas de otimização é um passo adiante do uso de um software de CAE para somente a análise da estrutura em si. As reduções de peso, volume e aumento de desempenho das peças, para o caso de otimização de peças mecânica, por exemplo, obtidas com o uso de técnicas de otimização são significativas a ponto de atualmente o seu uso ser decisivo para definir a competitividade das indústrias da área metal mecânica (autopeças, aeronáutica, naval, etc.) dos EUA, Japão e Europa, sendo a sua importância inegável na redução de custos. É importante salientar que o impacto do uso dessas técnicas

não se limita apenas à otimização do projeto mecânico da peça em si, mas se estende para toda a cadeia produtiva da empresa, pois uma peça com menor peso ou volume, economiza material usado, possibilita aumentar a produção, facilita o transporte (maior número de peças), além de outros fatores, e, portanto, permite reduzir o custo total final da peça (SILVA, 2004b).

A otimização vem se desenvolvendo com o passar do tempo e hoje em dia não se limita somente ao projeto de peças mecânicas. É possível melhorar o desempenho e inúmeros componentes eletrônicos e mecatrônicos que são dependentes de sua geometria (“design”). Esse campo é amplamente abordado nas pesquisas de MEMS, como já foi discutido na introdução. Dessa forma, métodos de otimização são usados para projetar inúmeras estruturas de MEMS (NEUMANN, 2003 e RAÍ-CHOUDHURY, 2000)

Assim, a otimização de estruturas MEMS se torna um ponto muito importante para esse projeto, uma vez que se pretende planejar um projeto ótimo de um micro-motor eletrostático.

A seguir são apresentados os conceitos básicos da otimização e, logo em seguida, são definidos os principais conceitos da otimização para o problema do projeto do micro-motor.

4.5.1. Tipos Básicos de Otimização

A otimização que se pretende realizar nesse projeto, embora tenha atributos eletrostáticos, é uma otimização estrutural, uma vez que pretendemos otimizar o design de uma peça, no caso o rotor do micro-motor. Assim, para entendermos melhor a otimização desse projeto, devemos conhecer diferentes formas de otimização estrutural existentes. A figura abaixo ilustra os 3 tipos de otimização estrutural mais conhecidos.

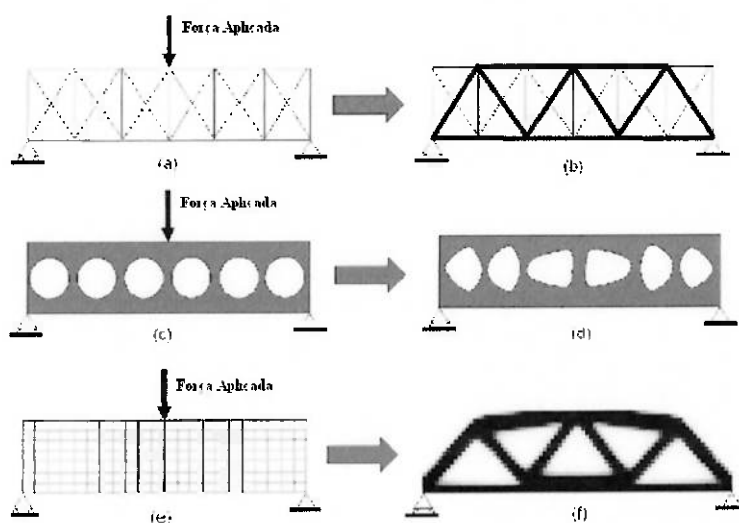


Figura 15 - Exemplo de 3 tipos de otimização estrutural: (a) otimização paramétrica; (c) otimização de forma; (e) otimização topológica.

Basicamente a otimização de estruturas busca a melhor configuração possível de maneira a atender uma função objetivo especificada. Dentro do projeto é necessário selecionar qual a melhor maneira de se obter a ótima configuração da estrutura. A primeira categoria de otimização estrutural (Figura 15 (a)) consiste em assumir para a estrutura uma forma fixa previamente definida, neste caso, a estrutura está discretizada com elementos de treliça, onde as características geométricas, como, por exemplo, a área da secção transversal de cada elemento (Figura 15 (a)) são as variáveis de projeto do problema, ou seja, os parâmetros que podem ser alterados para otimizar a estrutura, como já foi definido. Essa abordagem é conhecida por otimização paramétrica (ou “size optimization” como é conhecida na literatura internacional). Assim, utilizando um algoritmo computacional de otimização para encontrar as áreas individuais de cada elemento de treliça, que maximiza a rigidez da estrutura, respeitando uma determinada restrição (por exemplo, volume final da estrutura) (Figura 15 (b)). A segunda categoria é a otimização de forma (ou “shape optimization”), onde os contornos externos e internos da estrutura são parametrizados por curvas “splines” e os parâmetros dessas curvas constituem as variáveis de projeto (Figura 15 (c)). Dessa forma, através de um algoritmo computacional de otimização são determinados os parâmetros ótimos das curvas “splines”, e, portanto, a forma ótima da estrutura (Figura 15 (d)) que otimiza o custo

do projeto. A última categoria consiste em se obter a configuração ótima, buscando encontrar a distribuição de material no interior da estrutura (Figura 15 (e)), de tal forma a permitir a criação de “cavidades” nas regiões onde não houver a necessidade de material (Figura 15 (f)). Essa abordagem é chamada de Otimização Topológica (ou “topology optimization”). As variáveis de projeto podem ser, por exemplo, medidas que indicam a distribuição de material em cada ponto do domínio. A otimização topológica é mais genérica, sendo que a quantidade de material removida é maior que nos outros métodos de otimização e, conseqüentemente, obtém-se a estrutura mais leve e com melhor desempenho.

4.5.2. Conceitos de Otimização

A seguir são pré-definidos alguns parâmetros de otimização, apontando desde já algumas das possíveis características do projeto do micro-motor que devem ser levadas em consideração durante sua otimização.

Variáveis de Projeto:

Essencialmente, as variáveis de projeto são os parâmetros do problema que podem ser alterados para otimizar o sistema. As variáveis de projeto são classificadas em variáveis contínuas e discretas. As variáveis contínuas podem assumir qualquer valor, já as variáveis discretas estão limitadas a valores isolados.

Muitos dos parâmetros do micro-motor podem ser considerados como variáveis de projeto. Para um caso mais trivial de otimização, podemos citar, por exemplo, as seguintes propriedades geométricas do micro-motor como variáveis de projeto contínuas: raio do rotor (caso este não seja um parâmetro pré-definido), altura dos dentes do rotor, ângulo de largura do dente do rotor e do pólo do estator, valor de gap entre estator e rotor, configuração do motor (12:8, 6:8, etc., como já foi mencionado), etc. Entretanto, nesse projeto a configuração de número de pólos já é definida (como será visto mais à frente), eliminando esse parâmetro da lista de possíveis variáveis de projeto.

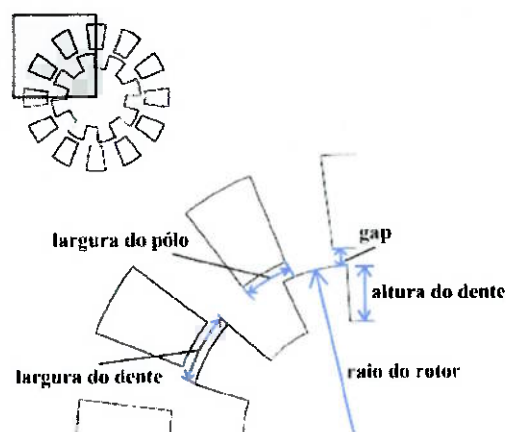


Figura 16 - Possíveis variáveis de projeto.

Mais adiante, nos resultados, esses valores, que podem ser considerados variáveis de projeto, são modificados na simulação computacional do protótipo do motor para se definir o torque de um modelo de micro-motor, no entanto, isso não é considerado uma otimização, por se tratar somente de uma análise da influência de cada variável no valor do torque.

Função Objetivo:

A função objetivo deve quantificar o que queremos otimizar e será função das variáveis de projeto escolhidas. A função objetivo deve ser usada como uma medida da eficiência do projeto, ou seja, em um projeto de otimização a função objetivo é a função matemática que define o que queremos maximizar ou minimizar. Essa função pode ser classificada em simples ou multi-objetivo. A função é dita simples quando temos apenas um objetivo e é denominada multi-objetivo quando queremos otimizar vários objetivos de uma só vez.

Restrições:

Essencialmente, as restrições são as limitações impostas para se obter a solução otimizada. Para o projeto do micro-motor, as restrições que podem ser consideradas, em sua grande maioria, restrições laterais tendo em vista um raio máximo para o rotor, ou uma largura máxima para os dentes do rotor de forma impedir interação eletrostática entre os dentes adjacentes do rotor, ou outras restrições. Para se obter restrições de igualdade ou desigualdade, deve-se impor

condições de projeto, como um valor específico (ou máximo) para a área do rotor, por exemplo.

Domínio:

O domínio viável de soluções depende das restrições que são consideradas para o problema. Uma vez definidas as variáveis de projeto e suas restrições, o domínio da otimização se dá no intervalo definido pelas restrições em que são possíveis vários valores de variáveis de projeto. No caso do micro-motor, podemos ter como domínio viável do raio do rotor, todos os valores de raios entre o raio mínimo e raio máximo, definidos pelas restrições.

4.5.3. Introdução à Otimização Topológica

Esse projeto consiste no desenvolvimento de um software para o projeto otimizado de um motor eletro-estático baseado no Método de Otimização Topológica (MOT). Dessa forma, o MOT representa um dos principais fundamentos para implementação desse projeto. Portanto, antes de prosseguirmos, deve-se introduzir alguns dos principais conceitos da otimização topológica para uma melhor compreensão desse projeto.

Otimização topológica (MOT) consiste num método computacional que permite projetar a topologia ótima de estruturas segundo um certo critério de custo (por exemplo, máxima rigidez e menor peso, ou toque máximo, como é o caso desse projeto). Basicamente, o método de otimização topológica distribui o material no interior de um domínio fixo de forma a maximizar ou minimizar uma função custo especificada (por exemplo, máxima rigidez e mínimo volume de material). O material em cada ponto do domínio pode variar de ar (não há presença de material) até sólido (total presença de material) podendo assumir densidades intermediárias entre ar e sólido de acordo com um modelo de material definido (BENDSOE, 2003).

Um algoritmo de otimização é usado para encontrar de forma iterativa a distribuição ótima de material, o que torna o processo rápido, caso contrário milhões de análises seriam necessárias para encontrar a distribuição ótima. Na aceleração do processo de busca da distribuição ótima de material, os métodos de otimização

utilizam-se da informação dos gradientes (ou derivadas) da função custo em relação à quantidade de material em cada elemento. A distribuição de material é representada, por exemplo, associando um valor de densidade a cada elemento (subdomínio), obtido da discretização do domínio inicial (BENDSOE, 2003).

Dessa forma, a MOT combina essencialmente métodos de otimização com um método numérico de análise, como por exemplo, o Método de Elementos Finitos (MEF). Outros métodos numéricos de análise podem ser usados, no entanto, devem ser genéricos o suficiente de forma a lidar com estruturas de formas complexas resultantes da otimização.

4.5.4. Estrutura de Software de Otimização

Como já foi descrito, o principal objetivo desse projeto é construir um software para o projeto otimizado de um micro-motor eletrostático, portanto, é importante analisarmos a estrutura geral de um software de otimização.

A estrutura lógica de um software de otimização análogo ao que está sendo desenvolvido nesse projeto está descrita na estrutura da figura abaixo.

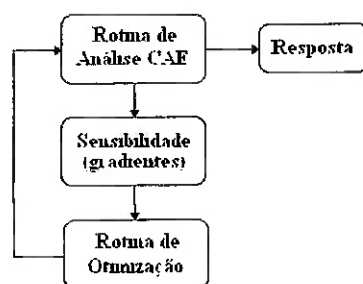


Figura 17 - Estrutura lógica de um software de otimização.

Basicamente, para um problema de engenharia, temos: uma rotina de CAE que soluciona o problema, dado alguns parâmetros de entrada; a análise de sensibilidade do problema de otimização (que representa os gradientes do problema); e a própria rotina de otimização que normalmente é obtida da literatura e levemente modificada para cada caso. Como pode ser visto, a solução obtida na parte de CAE é melhorada na rotina de otimização e retorna a rotina de CAE para mais iterações. Assim, a partir desses 3 módulos é formado um ciclo que só termina quando um

critério de convergência pré-definido é atingido. Essa é a organização de um problema de otimização paramétrica, que representa a otimização de estrutura mais simplificada.

Para esse projeto o módulo relativo à rotina de CAE é exatamente uma análise de Elementos Finitos. Por esse motivo foi desenvolvida uma rotina em C, que será mostrada mais adiante, para resolução do problema de MEF eletrostático do micro motor, que será formulado logo a seguir.

Para o caso do uso da Otimização Topológica, a estrutura acima é mais detalhada, como mostra a figura abaixo.

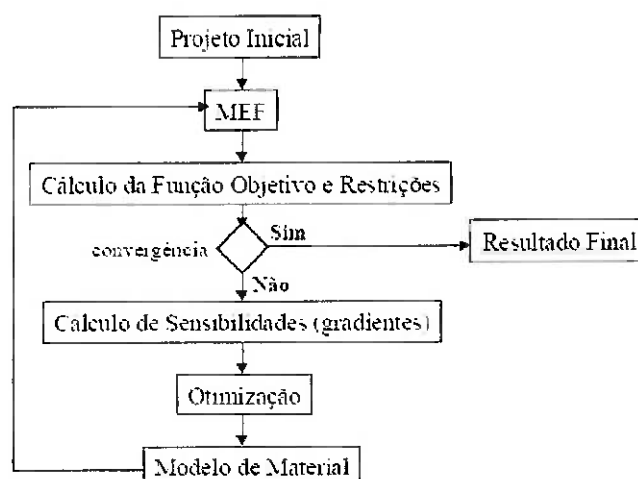


Figura 18 - Estrutura lógica de um software de otimização topológica.

Note que nessa estrutura a rotina de CAE já é considerada como uma rotina de elementos finitos (MEF). Nesse caso, temos também que o problema se torna um pouco mais complexo exigindo uma parte específica do software para cálculo da função objetivo e das restrições para se analisar a resposta e também temos o aparecimento de uma rotina para o modelo do material, que define as densidades dos elementos da malha de finitos antes que a resposta da otimização retorne para a rotina de MEF.

4.6. Otimização Topológica aplicada ao projeto de micro-motor eletrostático

Nesse projeto, a obtenção da topologia ideal do rotor usando o método de otimização topológica (MOT), essencialmente, pode ser interpretada como o problema de encontrar a distribuição de material no interior de um domínio fixo, como já foi amplamente abordado, que resulte em torque final máximo.

O modelo de micro-motor a ser otimizado é um motor 16:4 e, portanto, seu domínio fixo pode ser representado como mostra a próxima figura.

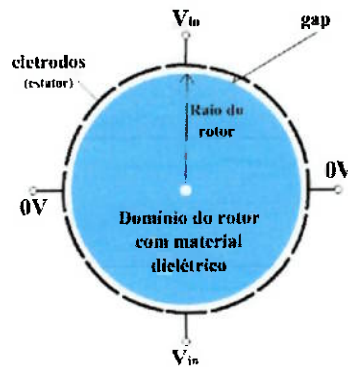


Figura 19 - Micro-motor a ser otimizado pela Otimização Topológica

Como descreve a literatura, a região de material dielétrico mostrado na figura acima deve ser discretizada em uma malha de elementos finitos para se encontrar a disposição ótima de material dentro dessa região para se obter torque máximo em um “switching” (mudança de posicionamento do rotor na ativação consecutiva de pólos adjacentes do estator). Desta forma o problema de otimização buscando torque máximo no micro-motor eletrostático, como proposto na literatura (BYUN, 2002), deve maximizar a diferença de energia de todo o sistema quando o rotor passa da posição A para a posição B, como mostra a figura abaixo para o caso de um micro-motor 16:4.

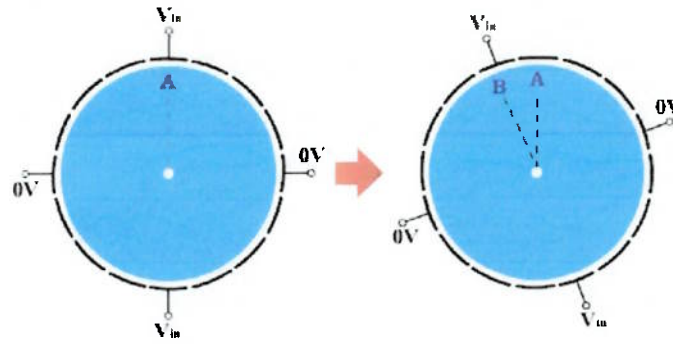


Figura 20 - Rotação do rotor do ponto de referência A para o ponto B.

Assim, a função objetivo que queremos maximizar pode ser definida como (BYUN, 2002):

$$F = \frac{1}{2} \left[W_A^2 + (W_B - W_{B0})^2 \right] \quad (35)$$

onde F é a função objetivo, W_A e W_B são as energias totais do sistema para as posições A e B, respectivamente, e W_{B0} é a energia máxima possível do sistema na posição B, ou seja, a energia computada quando toda a região do rotor está completada com material dielétrico).

Para se obter os valores das energias totais do sistema, usam-se as seguintes expressões:

$$W_A = [\phi_A]^T [K_{\phi\phi}] [\phi_A] \quad (36)$$

$$W_B = [\phi_B]^T [K_{\phi\phi}] [\phi_B] \quad (37)$$

onde $[K_{\phi\phi}]$ é a matriz final de rigidez elétrica do problema (como já foi descrito) e $[\phi_A]$ e $[\phi_B]$ são os vetores de potencial elétrico do problema para os casos A e B, respectivamente.

Nesse problema o modelo de material utilizado é o método das densidades, em que, considerando que o domínio tenha sido discretizado em N elementos finitos, as propriedades de permissividade elétrica ϵ_i de cada elemento podem ser relacionadas

com a pseudo-densidade normalizada ρ_i de cada elemento através da seguinte formulação (onde i é o índice que indica de qual elemento se trata, portanto, variando de 1 até N), como mostrado em BENDSOE, 2003 e BYUN, 2002:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_0 \left(1 + (\varepsilon_r - 1) \rho_i^n\right), \quad (0 \leq \rho \leq 1, 2 \leq n \leq 4) \quad (38)$$

onde ε_0 é a permissividade do ar, ε_r é a permissividade relativa do dielétrico e n é o expoente de penalização do método que penaliza valores intermediários de densidade, ou seja, valores diferentes de 0 ou 1. Note também que esse intervalo de 0 a 1 para a densidade normalizada é a restrição do problema de otimização topológica.

Esse valor de permissividade deve substituir a permissividade de cada elemento, na eq.(18), influenciando, portanto, na matriz de rigidez elétrica do problema.

Quando se tem valores de n maiores que 1, densidades intermediárias são penalizadas e o resultado da densidade normalizada é forçado para ser 0 ou 1. Como o valor de n é no mínimo 2, as densidade intermediárias são penalizadas com maior intensidade e elementos em “escala de cinza” (densidade normalizada entre 0 ou 1, como é descrito na literatura) são eliminados com maior eficiência. No entanto, valores muito altos de penalização podem limitar as variáveis de projeto, prejudicando o resultado da otimização (BENDSOE, 2003)

O processo de otimização topológica inicia-se com uma distribuição uniforme de ρ_i em todo o domínio, que é alterada ao longo das iterações até que ocorra a convergência do processo com a maximização da função objetivo F . Esse processo foi mostrado na Figura 18, em que foi estruturado o software de otimização desenvolvido nesse projeto. Os dados iniciais são fornecidos ao software com informação sobre a malha de MEF do domínio, como será descrito na seção de implementação numérica. Mediante a análise de MEF, as voltagens são calculadas permitindo obter a função objetivo e restrições. A etapa seguinte consiste na otimização que exige a informação da sensibilidade do meio, ou seja, a derivada da função objetivo e restrições em relação às variáveis de projeto. Mais adiante será apresentado o desenvolvimento matemático dessas derivadas. O algoritmo de

otimização fornece uma nova distribuição de material que é atualizada no modelo de MEF, fechando o ciclo.

No final desse processo, após a convergência, quando é obtida a topologia otimizada final, é necessária uma interpretação da topologia para desenho e fabricação do rotor otimizado do micro-motor. Esse processo todo é previsto na figura a seguir que demonstra através de ilustrações a sequência de projeto do micro-motor otimizado.

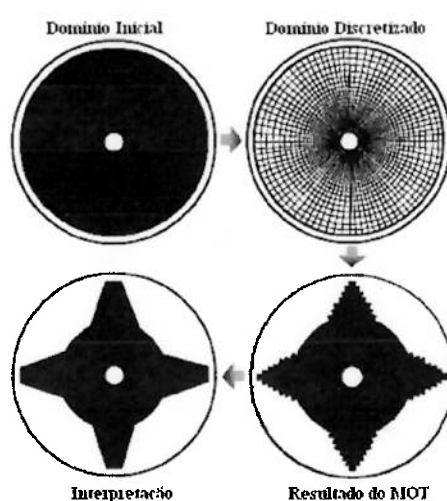


Figura 21 - Exemplo de projeto de micro-motor eletrostático usando o MOT.

4.6.1. Solução do problema de otimização topológica

Existem vários algoritmos de otimização disponíveis para solução de problemas de otimização não-lineares com restrições. A maior parte deles é baseado nas chamadas técnicas de programação matemática e métodos de aproximação sequencial (BENDSOE, 2003). Neste trabalho, o algoritmo de otimização inicialmente utilizado para resolver o problema da eq.(35), é conhecido como programação linear sequencial (PLS). Classificada entre os algoritmos baseados em métodos de aproximação sequencial, a PLS tem sido aplicada com sucesso na solução de problemas de otimização topológica. Entre as vantagens do PLS podemos citar o fato de permitir trabalhar com um grande número de variáveis de projeto e funções objetivo complexas, além disso é de fácil implementação (BENDSOE, 2003 e SILVA, 2004b)

A PLS resolve um problema de otimização não-linear dividindo-o em uma sequência de problemas de otimização lineares que podem ser resolvidos com a técnica de programação linear (PL). A solução numérica da PL pode ser desenvolvida usando-se o método Simplex ou o método Kamarkar que buscam, dentro de um conjunto de soluções possíveis para o problema, a solução que satisfaz a função objetivo e restrições (BENDSOE, 2003). Geralmente, as rotinas de PL podem ser encontradas na literatura como, por exemplo, a rotina SIMPLX que usa o método Simplex, ou disponibilizadas gratuitamente pela rede mundial de computadores (Internet), como é o caso da rotina conhecida por DSPLP que usa o método de Kamarkar. Nesse trabalho, utiliza-se somente a rotina SIMPLX, como será visto mais adiante.

A técnica de programação linear (PL) resolve um problema de otimização em que a função objetivo e as restrições são funções lineares em relação às variáveis do problema. O problema de otimização aplicado neste trabalho, que queremos minimizar, é não linear em relação às variáveis ρ_i que representam a quantidade de material em cada elemento do domínio estendido fixo de projeto. No entanto, o problema pode ser linearizado expandindo-se a sua função objetivo numa Série de Taylor e aproveitando os termos com derivada de primeira ordem. Os termos com derivada de segunda ordem ou superior são desprezados, pois o que nos interessa é a representação linear da função objetivo, para ser utilizada na PL. Assim, a função linear a ser minimizada na PL é dada por:

$$F^{linear} = F^0 + \left(\rho_1 - \rho_1^0 \right) \frac{\partial F}{\partial \rho_1} \bigg|_{\rho = \rho_0} + \left(\rho_2 - \rho_2^0 \right) \frac{\partial F}{\partial \rho_2} \bigg|_{\rho = \rho_0} + \dots + \left(\rho_n - \rho_n^0 \right) \frac{\partial F}{\partial \rho_n} \bigg|_{\rho = \rho_0} \quad (39)$$

Observe que o coeficiente das variáveis ρ_i é a derivada (ou sensibilidade) da função objetivo do problema de otimização em relação a variável do problema, no ponto $\rho = \rho_0$. Dessa forma, como pode ser visto no código fonte do software desenvolvido, que está no ANEXO B, esses coeficientes são entradas para a rotina do SIMPLX poder atualizar o valor das densidades normalizadas do problema. O cálculo desses coeficientes (derivadas) é mostrado mais adiante.

Como mencionado acima, a idéia primária da PLS para solucionar o problema de otimização não-linear é fazer uma aproximação por sucessivos subproblemas lineares que são resolvidos por PL. Para que essa aproximação seja válida é necessário limitar a variação do valor das variáveis de projeto em cada subproblema linear através dos limites móveis (BENDSOE, 2003 e SILVA, 2004a). Para entender melhor este conceito, considere a função não-linear $F(\rho)$ mostrada na próxima figura.

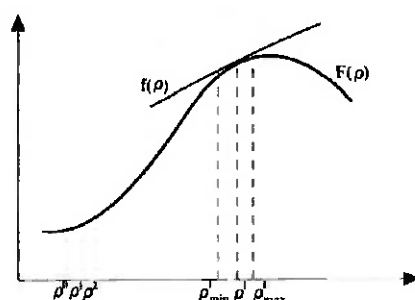


Figura 22 – Limites móveis.

Considere também a função linear $f(\rho)$ como uma aproximação da função não linear $F(\rho)$ em torno do ponto ρ^i . Observa-se que a aproximação linear $f(\rho)$ somente é válida em torno do ponto ρ^i , e se distancia muito do valor real da função não-linear a medida que se afasta desse ponto. Desta maneira defini-se os valores máximo e mínimo em torno de ρ^i , onde a aproximação linear é válida, de limites móveis da variável ρ^i (ρ_{\min}^i e ρ_{\max}^i). Portanto, a cada iteração a rotina de PLS minimiza a função linear $f(\rho)$ no intervalo dos limites móveis e encontra o valor ótimo para a variável ρ^i , que será utilizada na iteração seguinte. Assim as iterações seguem sucessivamente, substituindo-se como valor inicial da iteração posterior o valor ótimo de ρ^i encontrado na iteração anterior, até ocorrer a convergência da solução.

Os limites são considerados móveis pelo fato da variável ρ^i assumir um valor diferente a cada iteração da rotina de PLS. Esses limites são definidos como valores relativos em relação ao valor dessa variável. Porém é necessário observar que, se os valores utilizados para os limites móveis forem muito grande, o erro da aproximação linear será grande, podendo causar inclusive a perda do ponto ótimo. Em contra partida, se forem muito pequeno o custo computacional para obter a solução ótima será muito grande. Uma forma de tentar minimizar esse impasse e tomar mais rápida

a convergência da solução é assumir valores grandes para os limites móveis na região em que a função não-linear $F(\rho)$ apresenta grande raio de curvatura, ou seja, valor baixo da segunda derivada (região do ponto ρ^0 mostrada na figura anterior), pois nessa região a função $F(\rho)$ tem praticamente o mesmo comportamento da aproximação linear $f(\rho)$. Já na região em que a função apresenta um pequeno raio de curvatura (alto valor da segunda derivada) limites móveis devem ser pequenos. Além disso, à medida que nos aproximamos da convergência da solução (solução ótima) devemos reduzir bastante os valores dos limites móveis, caso contrário podemos "passar" pelo ponto ótimo gerando oscilação no valor da função não-linear. Na prática, em geral são utilizados valores em torno de 15% do valor de ρ^i para os limites móveis.

4.6.2. Análise de sensibilidade

As derivadas (ou gradientes) da função objetivo e restrições são chamados de sensibilidades do problema de otimização. Essas derivadas são utilizadas na PLS para a linearização da função objetivo em relação às variáveis do problema. Neste item, a formulação matemática para o cálculo da derivada da função objetivo do problema de otimização, eq.(35), é desenvolvida.

Dessa forma, a sensibilidade da eq.(35) pode ser escrita como:

$$\frac{dF}{d\rho_i} = W_A \frac{dW_A}{d\rho_i} + (W_B - W_{B0}) \frac{dW_B}{d\rho_i} \quad (40)$$

onde $i=1,2,\dots,N$ e ρ_i é a i ésima variável de projeto (ou seja, a densidade normalizada do elemento i).

Usando a regra da cadeia, os termos $dW/d\rho_i$ da equação anterior podem ser reescritos como:

$$\frac{dW_A}{d\rho_i} = \frac{\partial W_A}{\partial \rho_i} + \frac{\partial W_A}{\partial \phi_A} \frac{\partial \phi_A}{\partial \rho_i} \quad (41)$$

$$\frac{dW_B}{d\rho_i} = \frac{\partial W_B}{\partial \rho_i} + \frac{\partial W_B}{\partial \phi_B} \frac{\partial \phi_B}{\partial \rho_i} \quad (42)$$

Para satisfazer as equações de Maxwell, eq.(1), para qualquer distribuição de potenciais elétricos, os termos $\partial W / \partial \phi$ são iguais a zero, assim, as eq.(41) e eq.(42) podem ser reescritas como em BYUN, 2002:

$$\frac{dW_A}{d\rho_i} = \frac{\partial W_A}{\partial \rho_i}; \quad \frac{dW_B}{d\rho_i} = \frac{\partial W_B}{\partial \rho_i} \quad (43)$$

Essa é a sensibilidade da energia própria do sistema em relação às variáveis de projeto. Assim, usando as eq.(36) e eq.(37), temos para o caso A e analogamente para o caso B:

$$\frac{\partial W_A}{\partial \rho_i} = \left[\frac{\partial \phi_A}{\partial \rho_i} \right]^T \left[\mathbf{K}_{\phi\phi} \right] [\phi_A] + [\phi_A]^T \frac{\partial [\mathbf{K}_{\phi\phi}]}{\partial \rho_i} [\phi_A] + [\phi_A]^T \left[\mathbf{K}_{\phi\phi} \right] \left[\frac{\partial \phi_A}{\partial \rho_i} \right] \quad (44)$$

Derivando a equação de equilíbrio do problema, eq.(23) aplicada ao caso A, temos:

$$[\mathbf{K}_{\phi\phi}] [\phi_A] = [\mathbf{Q}_A] \Rightarrow [\mathbf{K}_{\phi\phi}] \left[\frac{\partial \phi_A}{\partial \rho_i} \right] + \frac{\partial [\mathbf{K}_{\phi\phi}]}{\partial \rho_i} [\phi_A] = \frac{\partial [\mathbf{Q}_A]}{\partial \rho_i} \quad (45)$$

Tendo em vista que $\frac{\partial [\mathbf{Q}_A]}{\partial \rho_i} = 0$, pois $[\mathbf{Q}_A]$ não depende da variável de projeto ρ_i (se for uma excitação externa), a equação acima pode ser expressa por:

$$[\mathbf{K}_{\phi\phi}] \left[\frac{\partial \phi_A}{\partial \rho_i} \right] = - \frac{\partial [\mathbf{K}_{\phi\phi}]}{\partial \rho_i} [\phi_A] \quad (46)$$

Substituindo a eq.(46) na eq.(44), temos que a sensibilidade pode ser finalmente expressa por:

$$\frac{\partial W_A}{\partial \rho_i} = -[\phi_A]^T \frac{\partial [\mathbf{K}_{\phi\phi}]}{\partial \rho_i} [\phi_A] \quad (47)$$

Obtendo analogamente, portanto, o mesmo para o caso B:

$$\frac{\partial W_B}{\partial \rho_i} = -[\phi_B]^T \frac{\partial [\mathbf{K}_{\phi\phi}]}{\partial \rho_i} [\phi_B] \quad (48)$$

Para obtenção da matriz $\frac{\partial [\mathbf{K}_{\phi\phi}]}{\partial \rho_i}$ é necessário derivar a equação do modelo do material, eq.(38), que depende do valor de ρ_i , para obtermos o valor de $\partial \varepsilon / \partial \rho_i$ que deve ser substituído no lugar de ε na equação da matriz de rigidez elétrica, eq.(18). Derivando a eq.(38), obtemos portanto:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho_i} = n \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) \rho_i^{n-1} \quad (49)$$

Para calcular a sensibilidade do mesmo problema no caso em que é usado o método das Condições de Contorno de Dirichlet (em que os valores de alguns potenciais elétricos são prescritos, como já foi descrito), devem-se obter os gradientes do problema seguindo as equações abaixo.

Primeiramente, deve-se derivar a equação de MEF, que pode ser dada pela eq.(23), supondo um caso em que temos algumas variáveis prescritas na matriz de potenciais elétricos. Assim, voltando a usar o exemplo de quatro graus de liberdade (usado na formulação das Condições de Contorno de Dirichlet) obtemos a seguinte equação.

$$\frac{\partial [K_{\phi\phi}]}{\partial \rho_i} [\phi] + [K_{\phi\phi}] \begin{bmatrix} 0 \\ \partial \phi_2 / \partial \rho_i \\ \partial \phi_3 / \partial \rho_i \\ \partial \phi_4 / \partial \rho_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dq_1 / d\rho_i \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (50)$$

Note que a derivada da variável que tem o valor prescrito (do exemplo usado na introdução ao MEF eletrostático) é zero, uma vez que seu valor é constante.

Assim, reorganizando a equação anterior, temos

$$[K_{\phi\phi}] \begin{bmatrix} 0 \\ \partial \phi_2 / \partial \rho_i \\ \partial \phi_3 / \partial \rho_i \\ \partial \phi_4 / \partial \rho_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dq_1 / d\rho_i \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{\partial [K_{\phi\phi}]}{\partial \rho_i} [\phi] \quad (51)$$

Supondo conhecidos os termos da direita da igualdade acima (que já foi desenvolvido na sensibilidade anterior, no caso da imposição de carga elétrica), temos uma equação matricial em que podemos aplicar o método de Dirichlet (já que temos um valor prescrito, zero).

Aplicando esse método, de acordo com o que já foi desenvolvido, obtemos a seguinte expressão.

$$[K_{\phi\phi}^*] \left[\frac{\partial \phi}{\partial \rho_i} \right] = [Q^*] \quad (52)$$

onde $[K_{\phi\phi}^*]$ é a matriz de rigidez modificada do método de Dirichlet da equação (26), $[\partial \phi / \partial \rho_i]$ é a derivada da matriz de potenciais elétricos do problema e $[Q^*]$ é a matriz composta dos elementos de $-(\partial [K_{\phi\phi}] / \partial \rho_i) [\phi]$ da eq.(51) em que o elemento referente ao grau de liberdade prescrito é nulo, como mostra a equação abaixo.

$$[Q^*] = \begin{bmatrix} 0 \\ -(\partial[K_{\phi\phi}]/\partial\rho_2)[\phi] \\ -(\partial[K_{\phi\phi}]/\partial\rho_3)[\phi] \\ -(\partial[K_{\phi\phi}]/\partial\rho_4)[\phi] \end{bmatrix} \quad (53)$$

Isso acontece, pois, na eq.(51), o valor prescrito é zero e esse valor, segundo o método de Dirichlet, é imposto na matriz $[Q^*]$.

Rearranjando a eq.(52), obtemos a expressão abaixo que será necessário posteriormente para o cálculo dos gradientes.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial\phi}{\partial\rho_i} \end{bmatrix}^T = [Q^*]^T [K_{\phi\phi}^*]^{-1} \quad (54)$$

Prosseguindo com o cálculo da sensibilidade para o caso do método de Dirichlet aplicado e retomando a eq.(36), de energia para o caso A de aplicação de voltagem elétrica juntamente com a eq.(23), do MEF eletrostático, temos:

$$W_A = [\phi_A]^T [K_{\phi\phi}] [\phi_A] = [\phi_A]^T [Q_A] \quad (55)$$

Derivando essa expressão, obtém-se:

$$\frac{\partial W_A}{\partial\rho_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial\phi_A}{\partial\rho_i} \end{bmatrix}^T [Q_A] + [\phi_A]^T \frac{\partial[Q_A]}{\partial\rho_i} \quad (56)$$

Essa equação também pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\frac{\partial W_A}{\partial\rho_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial\phi_A}{\partial\rho_i} \end{bmatrix}^T [Q_A] + [\phi_A]^T \frac{\partial[K_{\phi\phi}]}{\partial\rho_i} [\phi_A] + [\phi_A]^T [K_{\phi\phi}] \begin{bmatrix} \frac{\partial\phi_A}{\partial\rho_i} \end{bmatrix} \quad (57)$$

Para simplificar essa expressão, temos:

$$[\phi_A]^T [\mathbf{K}_{\phi\phi}] = [Q_A] \quad (58)$$

Dessa forma, a eq.(57) pode ser expressa novamente como:

$$\frac{\partial W_A}{\partial \rho_i} = 2 \left[\frac{\partial \phi_A}{\partial \rho_i} \right]^T [Q_A] + [\phi_A]^T \frac{\partial [\mathbf{K}_{\phi\phi}]}{\partial \rho_i} [\phi_A] \quad (59)$$

substituindo o termo $[\partial \phi_A / \partial \rho_i]^T$ pela eq.(54), temos:

$$\frac{\partial W_A}{\partial \rho_i} = 2 [Q^*]^T [K_{\phi\phi}^*]^{-1} [Q_A] + [\phi_A]^T \frac{\partial [\mathbf{K}_{\phi\phi}]}{\partial \rho_i} [\phi_A] \quad (60)$$

Nessa equação, podemos substituir alguns termos usando a equação abaixo.

$$[K_{\phi\phi}^*]^{-1} [Q_A] = [\phi^*] \quad (61)$$

A eq.(61), por sua vez, pode ser obtida resolvendo o sistema abaixo, da mesma forma que se resolve o problema de MEF.

$$[K_{\phi\phi}^*] [\phi^*] = [Q_A] \quad (62)$$

Por fim, essa substituição modifica a eq.(60) de forma a obtermos a seguinte expressão que representa a sensibilidade da energia mútua no caso A.

$$\frac{\partial W_A}{\partial \rho_i} = 2 [Q^*]^T [\phi^*] + [\phi_A]^T \frac{\partial [\mathbf{K}_{\phi\phi}]}{\partial \rho_i} [\phi_A] \quad (63)$$

Substituindo essa expressão, juntamente com o seu análogo para o caso B, na eq.(43), obtemos a sensibilidade do problema no caso de imposição de voltagem elétrica.

4.7. Micro-fabricação aplicada à micro-motores

Essa seção é dedicada ao estudo de técnicas de micro-fabricação do tipo LIGA, que foram genericamente abordadas na Introdução, direcionadas à fabricação de micro-motores, de acordo com as possibilidades do Laboratório de Micro-fabricação do LNLS (que ajudou e acompanhou esse projeto) e como é tratado na literatura (MADOU, 1997, CHIEN-HUNG, 2002 e FRANGOULT, 1995).

4.7.1. Introdução à micro-fabricação de micro-motores

Atualmente, para a fabricação de MEMS são usados métodos estabelecidos pela indústria de semicondutores para a fabricação de componentes microeletrônicos. O processo de micro-fabricação disponível no LNLS e que é usado nesse trabalho é similar ao processo LIGA, descrito anteriormente, e apresenta basicamente 2 etapas: a primeira baseada na técnica de foto-litografia por UV (raio ultra-violeta) e a segunda baseada na eletrodeposição de metais (ou também visto na literatura como “electroplating”), que serão melhor detalhadas a seguir.

Princípios da Foto-litografia por UV:

A técnica de foto-litografia, basicamente, consiste em sensibilizar através de luz ultravioleta uma região numa camada de polímero foto-resiste, que cobre o material no qual se deseja construir o micro-mecanismo (por exemplo, níquel e cobre eletrodepositados, lâmina de aço inox), como em MADOU, 1997 e em RIBAS, 2000. O polímero define a área que não deve ter eletrodeposição posteriormente (ou em alguns casos, o oposto), ou seja, a topologia correspondente a geometria do molde da peça que se deseja fabricar (mais adiante o processo de micro-fabricação será explicado como um todo, para facilitar sua compreensão). Uma das etapas mais

importante é a sensibilização da região na camada de polímero, pois a precisão de fabricação da peça depende da precisão com que se consegue iluminar a forma desejada do motor na camada de polímero e gerar o molde da micro-estrutura. Para isso é necessário fabricar máscaras (fotolitos no caso deste projeto) com precisão suficiente para definir as regiões em que a luz ultravioleta pode passar e atingir o polímero (MADOU, 1997). Existem basicamente 2 tipos de foto-resistes: negativo e positivo. No foto resiste positivo, a região onde a luz (UV no caso) é bloqueada pela máscara, ele permanece intacto na revelação, já onde a luz incidiu diretamente, o resiste é removido na revelação. No caso do resiste negativo, acontece analogamente o oposto, ou seja, onde incide a luz é onde o resiste permanece intacto e onde a luz é bloqueada é onde o resiste é removido (MADOU, 1997). Durante o projeto de estruturas de MEMS deve-se levar em consideração o tipo de foto-resiste para poder se planejar a fabricação da estrutura.

Em muitos processos de micro-fabricação encontrados na literatura, existem vários fotolitos para várias camadas na construção do micro-motor, gerando estruturas mais complexas. Para ilustrar esse processo, observe a figura abaixo que apresenta duas máscaras usadas em um projeto de micro-motor encontrado na literatura (FRANGOULT, 1994). Embora a figura mostre somente as máscaras da trilha e do rotor e do estator, nesse caso, foram feitas quatro máscaras: uma foi usada uma máscara para a fabricação da trilha, outra para a fabricação do rotor e do estator, outra para deposição de uma camada de sacrifício (que será melhor discutido mais adiante) e outra para a fabricação do eixo.

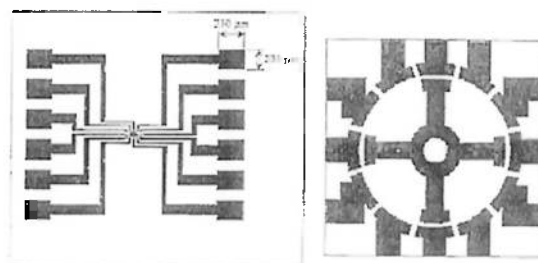


Figura 23 - Exemplo de máscaras para projeto de micro-motor (FRANGOULT, 1994): trilha (à esquerda) e estrutura do motor (à direita).

Nesse caso, só é possível usar uma mesma máscara para o rotor e o estator, por causa da presença de uma camada de sacrifício. Entretanto, isso dificulta e encarece o processo de fabricação do micro-motor. Por isso, nesse projeto, no entanto, são gerados apenas 3 tipos diferentes de máscaras: para a trilha de circuitos elétrico de acionamento do micro-motor, para a fabricação do rotor e para a fabricação do conjunto eixo/estator

Princípios da Eletrodeposição:

A eletrodeposição de metais acontece como mostra a Figura 24, em que o anodo representa um eletrodo de níquel e o catodo é onde se localiza a estrutura do molde de MEMS (do micro-motor) em que se pretende eletrodepositar níquel. Ambos os eletrodos são colocados em um banho de solução de níquel-sulfato com reagentes químicos (para melhorar e agilizar o processo), onde acontece a eletrodeposição (LARSEN, 2001).

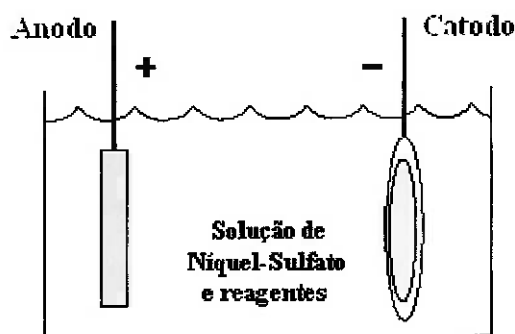


Figura 24 - Montagem da eletrodeposição do níquel.

Os eletrodos são ligados a potenciais elétricos, como mostra a figura, e uma corrente elétrica atravessa a solução de níquel-sulfato de forma a gerar um campo elétrico homogêneo sobre a superfície plana do catodo (como é mostrado na figura), promovendo uma deposição plana e uniforme dentro do molde posicionado no catodo. Essa corrente elétrica gera reações químicas nos eletrodos, promovendo o processo de eletrodeposição, da seguinte forma:





Dessa forma, como pode ser visto na expressão (65), o níquel é depositado no catodo e a taxa de deposição do níquel depende diretamente da intensidade da corrente elétrica, portanto, podendo ser controlada durante o processo de eletrodeposição. Esse assunto encontra-se melhor detalhado na referência MUNFORD, 1998.

4.7.2. Processo de Micro-fabricação

O processo de micro-fabricação usado nesse projeto está esquematizado na Figura 25. Como já foi descrito anteriormente, esse processo utiliza técnicas de fotolitografia por exposição à UV e eletrodeposição de metais, que é o processo disponível no Laboratório de Micro-fabricação do LNLS e também usado em alguns trabalhos da literatura (CHIEN-HUNG, 2002).

Como pode ser visto na Figura 25, são basicamente 9 etapas que compõem o processo de micro-fabricação da trilha juntamente com o conjunto eixo/estator e 7 etapas que compõem a fabricação do rotor do micro-motor. Na realidade, a fabricação de cada uma dessas peças que fazem parte do micro-motor podem ser interpretadas juntas, por apresentarem várias etapas similares que são ordenadas de acordo com a construção física do micro-motor, como será visto a seguir. Dessa forma, inicialmente vamos tratar do processo de micro-fabricação da trilha juntamente com o conjunto eixo/estator, mostrado na Figura 25.

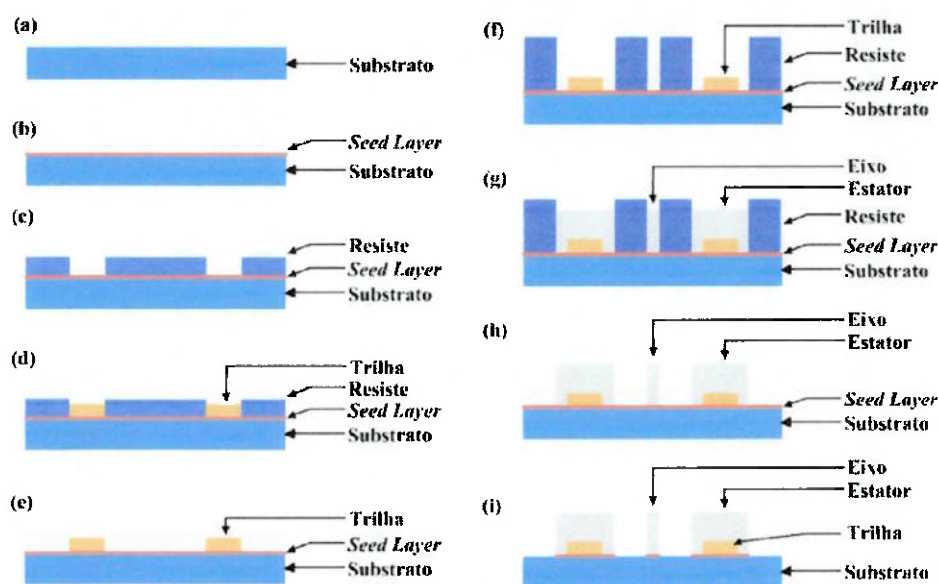


Figura 25 - Secção transversal da estrutura da trilha, do eixo e do estator do micro-motor durante o processo de fabricação.

A primeira etapa (mostrada na Figura 25(a)) é basicamente a preparação do substrato. Como pode ser visto na literatura (o que será mostrado no próximo item), em vários projetos de micro-motores é usado um substrato de silício (muito comum na indústria de micro-componentes), no entanto, nesse projeto é usado um substrato de alumina que é um material mais rugoso e sem problemas de aderência das estruturas, uma vez que o silício apresenta uma aderência a estruturas muito ruim. Em alguns trabalhos da literatura, faz-se micro-canaís no substrato ou em uma camada superior a este, para começar o crescimento da estrutura de MEMS (por eletrodeposição), melhorando sua aderência, criando, portanto, um estrutura de raiz ("root construction") para a peça de MEMS (CHIEN-HUNG, 2002), por causa da baixa aderência do substrato. Nesse trabalho, isso não é necessário graças ao uso da alumina.

Na segunda etapa (mostrada na Figura 25(b)) é depositada uma camada chamada na literatura de "seed layer". Essa camada, depositada por um processo chamado "sputtering" (CHIEN-HUNG, 2002), é comum nos processos de micro-fabricação e é a camada que permite a eletrodeposição e melhora a aderência de alguns metais ao substrato. Nesse projeto, essa camada é composta por 200 angstroms de titânio e 600 angstroms de ouro.

A terceira etapa (mostrada na Figura 25(c)) corresponde à deposição do molde de resiste através da técnica de foto-litografia por exposição à UV, já discutida. Na fabricação dos protótipos desse projeto, essa sequência mostrada na Figura 25 se repete três vezes em todo processo de fabricação do motor (uma para cada máscara), como será discutido mais a seguir. Nesse caso, a aplicação do resiste visa criar um molde para a eletrodeposição da trilha elétrica, onde é usado o resiste AZ-4620 (que é um resiste positivo) com espessura de 10 micra.

Na quarta etapa (mostrada na Figura 25(d)), ocorre a eletrodeposição, também já discutida. Na figura mostra o crescimento (eletrodeposição) da estrutura da trilha, mas isso ocorre similarmente para o conjunto eixo/estator e para o rotor. Essa estrutura cresce dentro do molde de resiste e é usado ouro para a eletrodeposição da trilha, inferior a 10 micra.

Na quinta etapa (mostrada na Figura 25(e)), o molde de resiste é removido, para a obtenção da estrutura final da trilha. Para remover o molde oriundo do resiste positivo, é usado acetona.

Na sexta etapa (mostrada na Figura 25(f)), se inicia a deposição da estrutura do eixo e do estator do micro-motor. A mesma estrutura em que foi fabricada a trilha é usada na fabricação do conjunto eixo/estator, para que este sobreponha a trilha na mesma placa de substrato. Assim, seguindo o processo já discutido de foto-litografia, é aplicado o resiste do conjunto eixo/estator, o resiste SU-8 100 (que é um resiste negativo) com espessura de 60-100 micra. Para ilustrar essa etapa, a Figura 26 mostra fotos dos moldes de resiste de um rotor (à esquerda) e de um estator com eixo (à direita), que foram obtidos no trabalho reportado na referência (CHIEN-HUNG, 2002).

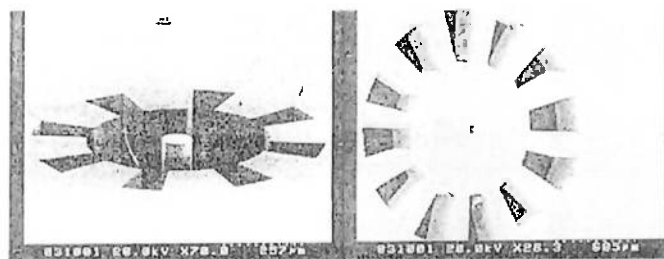


Figura 26 - Exemplo de moldes de resiste SU8 do projeto de micro-motor da referência CHIEN-HUNG (2002).

Na etapa seguinte, a sétima etapa (mostrada na Figura 25(g)), é eletrodepositado níquel dentro do molde de resiste para formação do conjunto eixo/estator, sendo aconselhável na literatura que atinjam uma altura de 2/3 da altura do molde, para minimizar as tensões internas que podem prejudicar a fixação da estrutura na remoção do molde (próxima etapa) (CHIEN-HUNG, 2002). Note que a estrutura do estator fica sobreposta a estrutura da trilha, garantindo contato elétrico.

Na oitava etapa (mostrada na Figura 25(h)), a camada de resiste é removida quimicamente usando um removedor próprio, disponível no LNLS. Como já mencionado, essa etapa de remoção de molde é uma etapa delicada, pois existe pouca informação na literatura sobre técnicas de remoção de moldes de resiste que removam o molde sem danificar o resto da estrutura, tornando essa etapa muito delicada (CHIEN-HUNG, 2002). Também é reportado na literatura problemas na remoção do molde, como é mostrado na figura a seguir. Como pode ser observado, na primeira foto, não houve remoção por completo do resiste na estrutura do rotor e na segunda foto, a remoção do resiste causou o descolamento de parte da estrutura do estator.

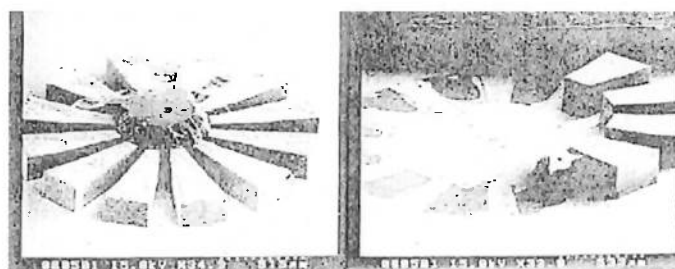


Figura 27 - Exemplos de problemas na remoção do molde de resiste (CHIEN-HUNG, 2002).

Na nona e última etapa da fabricação das estruturas de trilha, eixo e estator do micro-motor (mostrada na Figura 25(i)), a camada “seed layer” é removida quimicamente para evitar que haja contato elétrico entre o estator, o eixo e a superfície de apoio do rotor. Vale ressaltar que essa camada é, em parte, composta por ouro, portanto, em sua remoção, uma pequena camada da trilha (também de

ouro) é removida junto. No entanto, essa camada é insignificante para a estrutura final da trilha elétrica do micro-motor.

Como já foi mencionado, o processo de fabricação do rotor é similar ao mostrado anteriormente, no entanto, cabe uma explicação de suas diferenças. A figura a seguir mostra a micro-fabricação da estrutura do rotor.

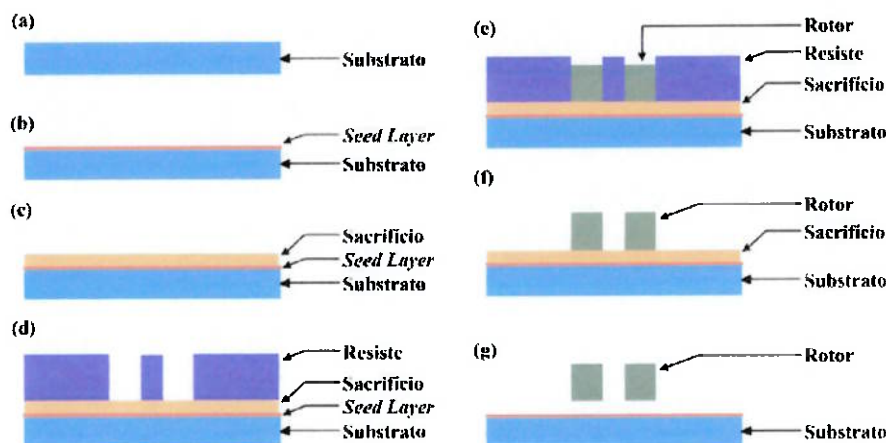


Figura 28 - Seção transversal da estrutura do rotor do micro-motor durante o processo de fabricação.

A primeira e a segunda etapas do processo de fabricação do rotor (mostradas nas Figura 28(a) e Figura 28(b)) são iguais às duas primeiras etapas do processo mostrado anteriormente.

Na terceira etapa (mostrada na Figura 28(c)) é depositada (usando a técnica de eletrodeposição) a camada sacrificial de cobre. Essa camada serve para a micro-fabricação da estrutura, mas é removida no final do processo, como será visto mais adiante, para que o rotor seja solto do substrato e possa ser posicionado livremente na estrutura final do micro-motor.

Na quarta etapa (mostrada na Figura 28(d)), é aplicado o resiste para criar o molde do rotor da mesma forma que já foi discutido.

Na quinta etapa (mostrada na Figura 28(e)), a estrutura do rotor é eletrodepositada sobre a camada de sacrificio de cobre. Nesse processo de eletrodeposição também é usado níquel para a estrutura do rotor. Na etapa seguinte, a sexta etapa (mostrada na Figura 28(f)), o resiste é retirado com um removedor próprio, disponível no LNLS.

Por fim, na sétima e última etapa (mostrada na Figura 28(g)), a camada de sacrifício é removida quimicamente e a estrutura do rotor fica livre. Para concluir a construção do micro-motor, basta colocar manualmente a estrutura do rotor sobre a placa que contém as estruturas da trilha, do eixo e do estator.

4.7.3. Estudo de projetos de micro-motores

Antes de se prosseguir com o projeto do protótipo de micro-motor eletrostático desse projeto, foi realizada um estudo na literatura dos modelos de micro-motores similares reportados, para poder estimar as dimensões do protótipo do micro-motor baseando-se em projeto já discutidos na literatura. Embora existam muitas referências quanto ao uso, aplicação e fabricação desses motores, poucas delas fornecem sua geometria detalhada com os valores de seus parâmetros geométricos. Essas são descritas logo abaixo.

Abaixo são apresentados alguns modelos de motores encontrados na literatura e contidos nas referências bibliográficas desse trabalho. Para cada caso, mostram-se os principais parâmetros construtivos e figuras do motor e de seu projeto, encontrados nos artigos pesquisados. A partir desse levantamento de informações, foram estabelecidas um protótipo de um projeto de um micro-motor eletrostático para posterior análise e comparação com o motor otimizado desse projeto.

Em YASSEEN (1999a) temos a aplicação de um micro-motor para scanners de alta-precisão. A Figura 6(b) mostra uma foto desse motor e a tabela abaixo mostra suas dimensões.

Parâmetros do micro-motor	Valores (μm)
espessura do rotor e estator	5,5
diâmetro do rotor	500
gap entre rotor e estator	1 e 2
diâmetro do eixo ("bearing")	50
folga do eixo ("clearance")	0.5

Tabela 1 – Dimensões do micro-motor de YASSEEN (1999a).

Na fabricação desse motor é mencionada uma camada de isolamento elétrica de 4500 angstroms de nitrato de silício em um substrato de silício, em seguida a deposição de uma camada de sacrifício de 3,5 μm de PSG e por fim a deposição do estator e do rotor de polisilício.

Em MOURLAS (1996) é discutido o armazenamento de dados em bits impressos no rotor de micro-motores eletrostáticos. A foto desse motor é mostrada na Figura 9.

Esse motor apresenta 500 μm de diâmetro do rotor e um espaçamento (*gap*) entre estator e rotor de 1 μm . Na próxima figura é mostrado um esquema de um corte de seção transversal desse motor. De acordo com a referência, as espessuras mostradas na figura são: camada de isolamento elétrica de 4500 angstroms de nitrato de silício; camada de sacrifício de 3,5 μm de PSG; camada do estator e do rotor de 5 μm de polisilício com alta porosidade; e camada de 1 μm de polisilício para o eixo (“bearing”), como mostra a figura abaixo.

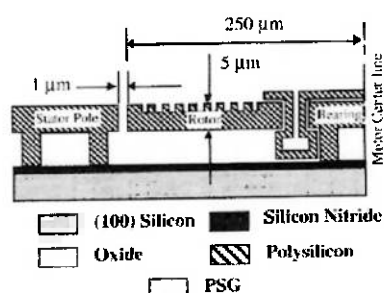


Figura 29 - Esquema de corte transversal desse motor de MOURLAS (1996).

Em TAVROW (1991), também é projetado e fabricado um micro-motor eletrostático. Trata-se de um motor 6:4 de 3 fases, como mostra a figura abaixo.

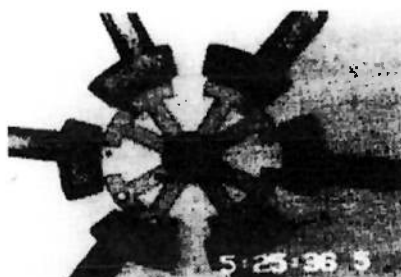


Figura 30 – Foto do micro-motor de TAVROW (1991).

As dimensões desse motor estão na tabela abaixo. Para esse mesmo modelo de motor, foram fabricados 3 dimensões diferentes de eixo, como mostra a figura abaixo.

Parâmetros do micro-motor	Valores (μm)
espessura do rotor e estator	2,55
raio do rotor	50
gap entre rotor e estator	1,65
raio do eixo ("bearing")	5,9; 7,3; 8,8
folga do eixo ("clearance")	0,35

Tabela 2 – Dimensões do micro-motor de TAVROW (1991),

Em BART (1992) temos um projeto mais detalhado de motor eletrostático. Nesse artigo a dinâmica desses motores é estudada, principalmente quanto à influência do atrito. É mencionada a fabricação de um motor 12:8 de 3 fases com 50 μm de diâmetro do rotor e 1.5 μm de gap (mostrado na figura abaixo).

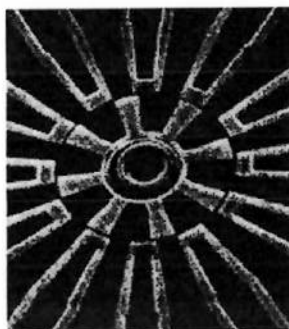


Figura 31 - Foto do motor fabricado em BART (1992).

Para fabricação desse motor foi usada uma camada de isolamento elétrica de nitrato de silício, uma camada de sacrifício de dióxido de silício e para a estrutura do estator e do rotor foi usado polisilício com alta porosidade. As dimensões desse motor são dadas por:

Parâmetros do micro-motor	Valores (μm)
espessura do rotor e estator	2,3
raio do rotor	50,0
gap entre rotor e estator	1,5
raio do eixo ("bearing")	5,0
folga do eixo ("clearance")	0,3

Tabela 3 – Dimensões do micro-motor de BART (1992).

Nos motores mostrados nessa seção, as dimensões são menores que as dimensões usadas nos protótipos desse projeto, como será visto mais a frente. Isso se deve ao fato de esses motores serem fabricados usando tecnologia de polisilício, diferente da eletrodeposição de metais, como nesse projeto. Essa diferença entre técnicas de micro-fabricação é melhor discutida a seguir.

4.7.4. Tecnologia de polisilício x eletrodeposição

Como pôde ser observado em todos os motores mostrados, o material que compõe suas estruturas de rotor, eixo e estator é o polisilício, diferente do que é proposto nesse projeto, com o uso de níquel eletrodepositado. Isso se deve ao fato de que as dimensões dos motores fabricados nos trabalhos descritos anteriormente serem bem menores que as dimensões dos protótipos fabricados nesse projeto. Para se compreender melhor essa diferença de técnicas, observe a tabela abaixo (LARSEN, 2001).

Propriedades	Tecnologia de Polisilício	Tecnologia de Eletrodeposição
material estrutural	polisilício	metais e ligas metálicas
propriedades magnéticas	nenhuma	baixa
técnica de deposição	Physical Vapor Deposition (PVD)	eletrodeposição
taxa de deposição	$\sim 80 \text{ \AA}/\text{min}$	$\sim 1 \mu\text{m}/\text{min}$
altura máxima da estrutura	$\sim 2\text{-}4 \mu\text{m}$	$\sim 30\text{-}100 \mu\text{m}$
Tmax durante o processo	600-900°C	100°C
compatibilidade com CI	não	sim
preço	caro	barato

Tabela 4 – Comparação entre a tecnologia de polisilício e eletrodeposição de metais.

Como pode ser observado na tabela acima, existem grandes diferenças entre as duas tecnologias. Uma das principais diferenças está na taxa de deposição e na altura máxima. Como se pode observar, a tecnologia de polisilício é mais lenta e fabrica estruturas mais finas e detalhadas. No entanto, apresenta temperaturas de processo muito elevadas o que restringe seu uso, principalmente no caso da compatibilidade com tecnologias de CI (circuitos integrados). Já a eletrodeposição apresenta uma compatibilidade maior, o que ajuda na sistematização da fabricação de MEMS e, conseqüentemente, de micro-motores eletrostáticos. Tendo em vista essas diferenças, a tecnologia de polisilício é muito mais cara e menos disponível que a tecnologia de eletrodeposição.

O níquel é o metal mais usado em técnicas de eletrodeposição. Dessa forma, cabe uma comparação entre o polisilício e o níquel usado na eletrodeposição, como mostra a tabela abaixo.

Propriedades	Polisilício	Níquel
condutividade	regular	boa
ductibilidade	muito baixa	alta
tensão residual	~200MPa	~10MPa
técnica de deposição	PVD	eletrodeposição

Tabela 5 – Comparação entre polisilício e níquel.

Como se pode notar na tabela acima, o níquel apresenta todas as propriedades de um metal e o polisilício apresenta propriedades de cerâmica. Para componentes de MEMS, alta condutividade e ductibilidade são boas características. Como também pode ser visto, o níquel também apresenta menor valor de tensão residual, o que é uma boa característica para aplicação da técnica de micro-fabricação desse trabalho, como já foi discutido.

Por fim, vale ressaltar que a tecnologia disponível para micro-fabricação no LNLS é a eletrodeposição de níquel e alguns estudos mostram que essa técnica quando usada na fabricação de micro-motores oferecem rotores com alta razão de aspecto e estatores com maior área capacitiva, características que ajudam a aumentar o torque final dos micro-motores eletrostáticos fabricados.

4.8. Introdução à dinâmica do micro-motor

Esta seção é dedicada ao estudo e análise de aspectos da dinâmica do micro-motor eletrostático e de alguns de seus aspectos práticos a partir da revisão bibliográfica do assunto. Essa análise é de grande importância para experimentação prática dos protótipos de micro-motores desenvolvidos nesse trabalho.

A baixo são relatados experimentos da literatura com micro-motores eletrostáticos construídos de maneira similar à usada nesse projeto. Os aspectos práticos relatados estudam a variação de torque em relação a algumas variáveis de projeto, indicam a configuração ideal para obtenção do torque máximo e estudam como a geometria do micro-motor pode influenciar diretamente no seu funcionamento estático e dinâmico.

Antes de tudo, deve-se ter em vista que esse projeto procura otimizar o projeto de um micro-motor eletrostático, o que abrange também a seleção de parâmetros que ajudem a se projetar um micro-motor visando máximo torque, considerando também aspectos de seu processo de micro-fabricação, alguns dos quais, já foram descritos na seção anterior.

Primeiramente, é aconselhável que se fabrique micro-motores que tenham a proporção de pólos do estator para dentes do rotor de 3:2, pois essa configuração é que apresenta maior torque desenvolvido (TAVROW, 1991). Podemos ilustrar esse argumento com o fato de que a maioria de motores de passo (que, embora sejam governados por forças magnéticas, apresentam funcionamento similar) fabricados seguem essa mesma proporção, visando maximizar seu torque (TAI, 1995).

Outro aspecto abordado na literatura é que o *gap* entre estator e rotor e a folga do rotor no eixo ("*clearance*") devem ser minimizado no projeto, para assegurar menor distância entre o dente do rotor e o pólo do estator, o que proporciona maior força de atração, de maneira segura, que evite possível interferência mecânica entre o eixo e o rotor ou mesmo entre rotor e estator (TAVROW, 1991). Vale lembrar que existe um limite para se diminuir o *gap* e a folga no eixo que é definido pela resolução de micro-fabricação.

A proporcionalidade do torque com relação aos parâmetros de projeto representa um estudo de grande importância na análise dinâmica e previsão do funcionamento do micro-motor. Segundo estudos de micro-motores da literatura, o torque desenvolvido do micro-motor é proporcional a $G^{-1,7}$ (onde G é o valor do *gap*), diretamente proporcional ao raio do rotor e proporcional ao quadrado da voltagem aplicada nos pólos do estator (TAVROW, 1991).

Por fim, o principal fator que influencia diretamente no funcionamento do motor e que representa um problema a ser vencido para obtenção de um torque máximo é a questão do atrito no micro-motor.

Uma das primeiras atitudes que podem ser tomadas a fim de se reduzir as forças de atrito no micro-motor é a construção de uma estrutura abaixo do rotor que diminui a área de atrito do rotor com a superfície da placa de alumina. Essa estrutura é chamada da literatura de “*bushing*”. A figura abaixo mostra os formatos de *bushing* mais comumente encontrados na literatura.

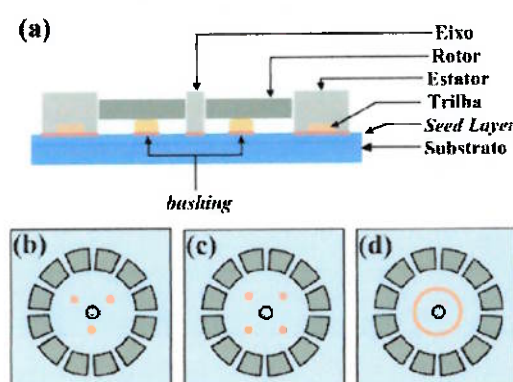


Figura 32 - Formatos de *bushing* encontrados na literatura.

Na figura anterior, a parte (a) representa um corte transversal na estrutura do micro-motor e mostra que o rotor fica em contato somente com o *bushing*, que apresenta uma pequena área de contato com o rotor. Nas partes (b), (c) e (d) são mostrados três modelos de *bushing* na estrutura do motor sem o rotor, apresentados na literatura (BART, 1992): três pontos, quatro pontos e anel circular, respectivamente.

Com o uso do *bushing*, estudos comprovam que a influência da gravidade no atrito do rotor é desprezível, para modelos de micro motores que apresentam

tamanho similar aos apresentados na seção anterior, e a influência da área de contato do *bushing* no atrito estático e no atrito dinâmico é de ordem de grandeza pequena com relação ao torque desenvolvido (TAVROW, 1991).

Dessa forma, podemos concluir que o atrito no micro-motor sofre grande influência: do atrito viscoso com o ar (dada à micro-escala de toda estrutura); das forças de atração que possíveis cargas elétricas (ou mesmo voltagem) desenvolvidas no rotor entre este e a base de substrato de alumina; e, principalmente, atrito entre o eixo e o furo do rotor.

Para partida do rotor, a influência do atrito com o eixo representa um grande problema, que pode prejudicar ou mesmo impedir seu funcionamento. Na dinâmica do motor, a influência desse atrito é relatada na literatura somente para casos específicos e o valor de sua influência apresenta uma faixa relativamente grande de variação, como, por exemplo, de 25% a 10% (BART, 1992 e TAVROW, 1991).

Para análise da influência do atrito viscoso, a partir de conceitos da teoria de escoamento de fluidos, foi desenvolvida uma expressão que pode prever o valor do contra-torque gerado por esse atrito viscoso (TAVROW, 1991):

$$T_{visc} = \frac{\pi \eta R_0^4}{H_b} \dot{\theta} \quad (66)$$

onde T_{visc} é o contra-torque gerado, η é a viscosidade absoluta do ar ($1,83 \cdot 10^{-5}$ kg/ms), R_0 é o raio do rotor, $\dot{\theta}$ é a velocidade angular do rotor e H_b é a altura da estrutura do *bushing*.

Essa expressão é para casos de escoamento laminar do ar, que representa o escoamento do ar no movimento do rotor, dadas sua micro-escala e as velocidades máximas alcançadas em experimentos encontrados na literatura. A influência desse atrito no torque desenvolvido do micro-motor é considerada pequena, variando de 15% a 8% (BART, 1992 e TAVROW, 1991).

4.9. Introdução aos conceitos de CAD da interface do software desenvolvido

Para o desenvolvimento da interface do software de otimização topológica desse projeto, é necessário introduzir a formulação de mudança de sistemas de coordenadas, uma vez que se faz necessário transferir o modelo de micro-motor (malha de elementos finitos) do sistema de coordenadas do ANSYS para o sistema de coordenadas de visualização da interface.

Dessa forma, observando a figura a seguir, o objetivo da transformação de coordenadas seria encontrar as coordenadas do sistema $[x_1, y_1, z_1]$ em relação a um objeto com coordenadas o sistema $[x_2, y_2, z_2]$, ambos no plano $z=0$.

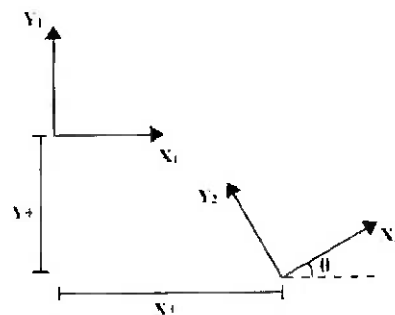


Figura 33 - Mudança de coordenadas no plano $z=0$.

Para essa transformação de coordenadas genéricas, temos a seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & X+ \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & Y+ \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (67)$$

Também deve-se levar em conta o caso em que há um fator de escala entre 2 sistemas de coordenadas, assim, temos a seguinte equação para mudança entre 2 sistemas que apresentam um fator de escala, F:

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \\ 1 \end{bmatrix} = F \cdot \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (68)$$

5. IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA

Como já foi comentado, o objetivo do estudo da formulação do MEF eletrostático e do Método de Otimização Topológica é a implementação do software de otimização para o projeto de micro-motores eletrostáticos. A seguir serão apresentadas considerações e características do funcionamento do programa.

5.1. Estrutura do software desenvolvido

O primeiro aspecto do programa de otimização de micro-motor eletrostático que deve ser analisado é a entrada do programa. Para simplificar o funcionamento do programa e sua operação por parte do usuário suas entradas são intermediadas por uma rotina escrita em MATLAB, ou seja, o programa em C lê um arquivo *.txt que é escrito por uma rotina de MATLAB. Dessa forma basta o usuário entrar com os dados direto na rotina de MATLAB que todos os dados são reorganizados para serem facilmente interpretados pelo programa desenvolvido. Essa rotina do MATLAB (que está no ANEXO C) escreve dois arquivos *.txt que são entradas para o programa de MEF. Um desses arquivos é somente de características da otimização (que nessa etapa do projeto ainda não apresenta muitos dados) e o outro arquivo tem todas as informações sobre a malha de elementos finitos, casos de carga e condições de contorno. Para construção desse arquivo da malha de finitos, é necessário que haja uma interação com o ANSYS para formação da malha de elementos finitos através do próprio MESH do ANSYS. Dessa forma, além de dados inseridos pelo usuário, a rotina de MATLAB tem como entrada um arquivo de saída do ANSYS que cede todas as informações necessárias para se reconstruir a malha de elementos finitos. Toda essa interação entre as rotinas está representada na Figura 34.

Como pode ser observado no organograma, o software possui várias saídas. A maioria dessas saídas é opcional e tem somente a função de controle e verificação do funcionamento do programa. A saída indicada na figura como “Arquivo de Controle” apresenta a data da última vez que o programa foi rodado e o tempo e duração de cada iteração e as características e opções que foram usadas. Na saída de arquivos de

verificação, são criados vários arquivos *.txt que informam o valor de algumas variáveis e matrizes do sistema para um controle mais detalhado por parte do programador. As informações mais importantes e fundamentais para o software, como o número de elementos e nós e valores da função objetivo do MOT também aparecem na janela do programa. A janela também informa por quais partes a rotina o programa está passando, para que se possa saber quando há um possível bug ou travamento.

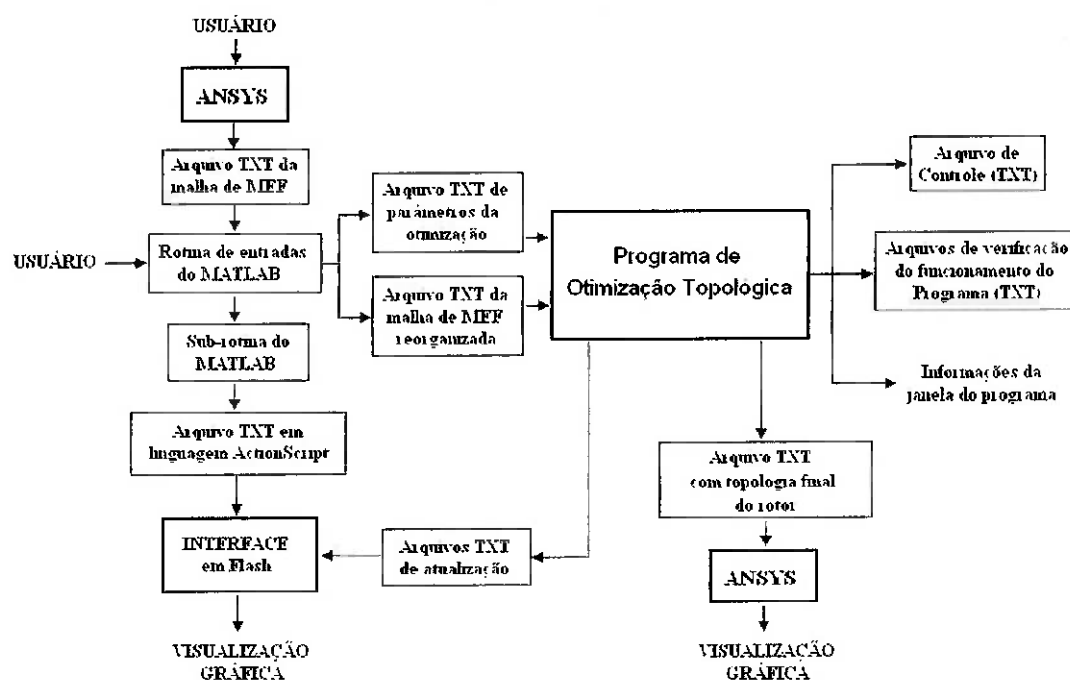


Figura 34 - Organograma das atividades e do funcionamento do programa desenvolvido.

O principal arquivo de saída do programa apresentado na figura anterior mostra a solução do problema de MOT. Esse arquivo mostra a malha de finitos e a densidade de cada elemento que forma a nova topologia do rotor do micro-motor. Essa saída é um arquivo *.txt e não pode ser interpretadas sem antes passar pelo ANSYS. Portanto essa saída está escrita em linguagem ADPL (a linguagem do ANSYS) para servir de arquivos de entrada para o ANSYS para poder ser visualizada pelo usuário. Entretanto, a visualização dos resultados pelo ANSYS é lenta, custosa do ponto de vista computacional e não permite a identificação imediata e simultânea dos progressos da otimização pelo usuário.

Na figura anterior também se podem notar outros arquivos de saída do programa de otimização, intitulados de “Arquivos TXT de atualização”, e um fluxo de arquivos que saem da rotina de MATLAB e entram no bloco que representa a Interface do programa em Flash. Esses arquivos, juntamente com a Interface em Flash, serão melhor explicado mais adiante, em uma seção dedicada à compreensão da interface gráfica desenvolvida, que substitui a necessidade da visualização gráfica do resultado ter de ser feita no ANSYS.

Quanto ao código fonte do programa de otimização, ele pode ser dividido em 14 partes e chama outras 7 funções externas. As 7 funções são:

- `elemel.c` – Essa função monta a matriz de rigidez de cada elemento através dos cálculos das funções de forma, do jacobiano, das derivadas do jacobiano, entre outros.
- `dsprsin.c` – Essa função trabalha com matriz esparsa e reorganiza a matriz de rigidez de forma a agilizar a resolução do problema, para resolução do problema usando o método dos Gradientes Conjugados.
- `linbcg.c` – Essa função resolve o problema matricial $A.X=B$, onde, nesse caso, A seria a matriz de rigidez do problema, X é a matriz de respostas do problema (potenciais elétricos) e B é a matriz de carga elétrica – para resolução do problema usando o método dos Gradientes Conjugados.
- `skyline.c` – Essa função faz o mesmo que a função `dsprsin.c`, mas para o caso do uso do método de Gauss.
- `gauss.c` – Essa função faz o mesmo que a função `linbcg.c`, mas para o caso do uso do método de Gauss.
- `útil.c` – Essa matriz ajuda na alocação e liberação da memória. Essa função apresenta grande utilidade uma vez que o programa é rodado várias vezes, assim, não corre-se o risco de falta de memória.
- `simplx.c` – Como já foi mencionado, essa função realiza a solução numérica da programação linear através do método Simplex.

Como pode ser visto destacado no próprio código fonte no ANEXO B, as 14 partes em que se divide o programa de otimização e define a sequência lógica do programa são:

- Inicialização do “main” e das variáveis:

Nessa parte inicial se faz a declaração de todas as variáveis usadas no programa.

- Leitura de dados:

Nessa parte o arquivo de entrada com as informações da otimização é interpretado.

- Leitura da malha de finitos:

Como já foi mencionado, a malha de finitos é gerada pela ANSYS e passada para um arquivo TXT simplificado através de uma rotina de MATLAB, para, por fim, ser lido e interpretado nessa parte do programa, onde são montadas várias matrizes que serão usadas na parte do MEF como a matriz e conectividade, a matriz de coordenadas dos nós, a matriz de carga, a matriz de condições de contorno, etc.

- Alocação de memória:

Nessa parte são declarados as matrizes e vetores que serão usados na parte de MEF e na parte de MOT.

- Início do loop de otimização:

Zera ou atualiza variáveis que são usadas na otimização além de definir a condição de parada do loop, que é quando se atinge a convergência pré-definida depois do número mínimo de iterações ou caso seja atingido o número máximo de iterações permitidas (esses números também são pré-definidos nos arquivos de entrada e interpretados na parte de leitura de dados).

- Resolução do MEF:

Nessa etapa é que é realizado o MEF propriamente dito. De acordo com a conectividade a matriz de rigidez global é construída (chamando a função `elemel.c`), em seguida é reorganizada com a função a matriz esparsa e por fim o problema de MEF é resolvido com a função `linbcg.c`.

- Cálculo da função objetivo:

Nessa parte são calculados os valores de energia do sistema, como já descrito, necessários para o cálculo da função objetivo.

- Cálculo da sensibilidade:

Nessa parte do programa é calculado o vetor gradiente da função objetivo (a sensibilidade do problema de otimização), como foi descrito nos fundamentos teóricos.

- Definição dos limites móveis:

De acordo com o valor da função objetivo os limites móveis são definidos para cada iteração.

- Ativação do filtro:

Essa parte da rotina ativa o filtro que modifica os limites móveis para evitar problemas de “instabilidade xadrez” (ou “checkerboard”, como é conhecido na literatura internacional), em que elementos com densidades muito diferentes são formados lado a lado na estrutura otimizada, lembrando a imagem de um tabuleiro de xadrez (BENDSOE, 2003).

- Uso da rotina Simplex:

Nessa parte do programa, é chamada a função `simplx.c` que roda a programação linear usando o vetor gradiente da função objetivo, como já foi descrito.

- Verificação do loop:

Por fim, atualiza-se o vetor que guarda o desvio do novo valor da função objetivo em relação ao anterior, para se avaliar a convergência no início do próximo loop.

- Construção dos arquivos de saída:

A partir da matriz de respostas, escrevem-se os dois arquivos de saída que devem ser interpretados pelo ANSYS fazendo uso da linguagem ADPL para definir nós, elementos e cores.

- Liberação de memória:

Usando novamente a rotina `util.c`, as variáveis usadas no programa são desalocadas na memória, para poder liberar memória.

5.1.1. Características do software desenvolvido

Essa seção explica algumas características do software de otimização desenvolvido como sua flexibilidade para variação dos parâmetros de entrada do usuário e padronização de alguns parâmetros para funcionamento correto do software (considerando somente o arquivo executável feito em linguagem C que representa o núcleo do software de otimização).

Como mencionado anteriormente, as entradas do software vêm de uma rotina de MATLAB (visto que o MATLAB apresenta uma linguagem simples e de rápida manipulação, possibilitando que este seja intermediário em várias etapas desse projeto). Essa rotina reorganiza algumas informações do ANSYS e do usuário, padronizando tudo para 2 arquivos TXT de fácil leitura para o programa em linguagem C. Dessa forma, como também já foi mencionado, um dos arquivos TXT tem a estrutura da malha de elementos finitos criada no ANSYS (e reescrita pelo MATLAB) e o outro apresenta os parâmetros que podem ser variados pelo usuário como entrada do programa desenvolvido. Assim, esses parâmetros representam a flexibilidade do programa e serão descritos abaixo para melhor compreensão de como o usuário pode interagir com o programa de otimização do rotor de micro-motor eletrostático.

Os primeiros parâmetros que podem ser variados dizem respeito às características físicas do micro-motor, que são: sua espessura, a voltagem elétrica de excitação (ou a carga elétrica de excitação, como será visto mais adiante), valor da permissividade elétrica do vácuo e o valor da permissividade elétrica relativa do material que compões o rotor.

Outro parâmetro de entrada é a definição de qual modelo matemático (que é chamado na literatura como “solver”) deve ser usado para resolução da equação final de MEF, mostrada pela eq.(22). Nesse item, o programa apresenta duas possibilidades, o uso do método de Gradientes Conjugados ou do método de Gauss.

Outra possibilidade de interação da resolução do problema de MEF com o usuário é a definição da forma de imposição das condições de contorno. Há duas formas de impor as condições de contorno no MEF Eletrostático: imposição de carga

elétrica ou imposição de potencial elétrico através do método das condições de contorno de Dirichlet, como já foi abordado nos fundamentos de MEF.

Também é dada ao usuário a opção de definir a restrição de volume da otimização como uma restrição de desigualdade de limite superior (menor igual) ou de limite superior (maior igual). Isso facilita testes no software para se obter a melhor configuração de parâmetros para a otimização do rotor do micro-motor.

Os últimos parâmetros que podem ser alterados pelo usuário são os parâmetros da otimização topológica do problema. Entre esses valores, tem-se a definição de três níveis de limites móveis para atender à necessidade do programa de otimização de mudança de limite móvel de acordo com o raio de curvatura da curva da função objetivo, como foi mostrado na introdução à otimização topológica. Outra opção do usuário é a mudança do valor relativo da restrição de volume do problema que é imposto a função SIMPLEX. O usuário também pode escolher o valor do chute inicial do problema, que é a densidade normalizada inicial do modelo do elemento no ciclo de otimização, e o valor da densidade normalizada máxima permitida para atender à restrição do problema. O usuário também pode definir a aplicação de um filtro matemático, como já foi mencionado, para impedir o problema conhecido como “checkerboard”. Por fim, o usuário pode definir o número de iterações que o programa deve rodar ou se este deve rodar até atender a um critério de convergência, como já foi mencionado.

O outro arquivo TXT define a malha de elementos finitos dada pelo ANSYS. Para que a rotina de MATLAB (apresentada no ANEXO C) possa interpretar corretamente a malha de finitos cedida pelo ANSYS, o modelo de finitos do ANSYS deve ser padronizado de uma forma específica. Essa padronização é necessária por causa de três fatores principais: definição dos eletrodos (pólos ativos do estator) para o caso A e para o caso B, como foi mostrado na definição do problema de otimização topológica nos fundamentos teóricos; definição da camada de elemento que representam o gap entre o estator e o rotor (isso é necessário, pois os elementos o gap participam do problema de MEF, mas não tem suas densidades normalizadas modificadas pela rotina `simplx.c` e, portanto, esses elementos precisam ser diferenciados para que o programa de otimização possa identificá-los); e, por fim, por causa do problema de elementos distorcidos gerados pelo ANSYS, o que será

melhor discutido mais adiante. A definição dessa padronização é apresentada no Apêndice C, onde também é mostrada a discussão quanto ao problema de elementos distorcidos do ANSYS.

5.1.2. Interface do software desenvolvido

Nessa seção, é mostrado como foi implementada a interface do software de otimização desenvolvido. Essa interface foi implementada de forma totalmente independente do programa de otimização, para que não houvesse propagação de erros entre os dois, visto que não é necessário correr esse risco, uma vez que a parte da interface e o programa de otimização tem funções totalmente diferentes. A interface para o programa de otimização foi desenvolvida em Flash.

O Flash é um programa desenvolvido pela Macromedia para criação de páginas e ou componentes gráficos e interativos para Internet, como, por exemplo, imagens, botões, menus e *banners*. O Flash gera gráficos vetoriais que são menores e mais ágeis que os arquivos *bitmap* e não perdem resolução quando ampliados, o que sempre foi problema nas figuras *bitmap*. Os gráficos e animações em Flash são construídos através de equações matemáticas, ou seja, são vetoriais, quando um computador abre uma animação em Flash ele processa uma série de cálculos para construir a imagem. Um arquivo contendo uma série de informações matemáticas é muito menor do que um arquivo de *Bitmap* que contem todas as informações de uma figura, pixel a pixel. O *plugin* de Flash já está mais popular em *sites* e navegadores da Internet que o próprio Java. Pesquisas informam que o *plugin* já atingiu mais de 100 milhões de navegadores, abocanhando 77% do mercado. O primeiro lugar fica com as GIFs animadas, com 99%, e o Java na terceira posição, com 62%.

Uma das principais vantagens de criar a interface desse programa em Flash é que o *plugin* de Flash que permite a visualização dos gráficos da interface em ambiente Windows e em ambiente Linux (muito usado no departamento). Outra grande vantagem é a possibilidade de integração dos gráficos da interface em um ambiente de Internet, facilitando, dessa forma, a divulgação e expansão do conhecimento científico de forma mais direta. Não são conhecidas muitas aplicações do Flash como interface direta para programas de desenvolvimento científico, o que

fortalece o fator de inovação desse trabalho, além do fato de que essa experiência contribui muito para agilizar a visualização de trabalhos de outras pesquisas de otimização do departamento.

Para implementação da interface foi usada a linguagem ActionScript que é a linguagem própria de programação orientada ao objeto para criação de interatividade e modelagem do Flash. Juntamente com o código em ActionScript, também foram usados alguns componentes gráficos como botões e campos de texto dinâmicos (campos de texto que têm seu conteúdo extraído de uma variável de programação), cuja explicação mais detalhada foge do escopo desse trabalho.

Na Figura 34 mostra a lógica de entrada para o programa de interface, o que ajuda na compreensão de seu funcionamento básico. Primeiramente, a partir da rotina de MATLAB que gera as entradas para o programa de otimização, é usada uma sub-rotina de MATLAB que é especializada em usar os valores das coordenadas dos nós e da conectividade de MEF para criar um arquivo TXT em linguagem ActionScript que servirá de entrada para compilação da interface em Flash. (essa sub-rotina está apresentada no ANEXO F). Esse arquivo de entrada é todo o código em ActionScript necessário para que o programa de interface possa recriar a malha de elementos finitos e toda interatividade que a interface oferece, que será discutido mais adiante. A outra entrada do programa de interface são arquivos de atualização no formato TXT que vêm do programa de otimização. Esses arquivos têm a informação básica da evolução da otimização que é a iteração que o programa está realizando e o valor das densidades normalizadas atualizada para cada iteração.

A figura a seguir mostra os principais componentes da interface (que é composta de outras telas também, com maior interatividade, principalmente com o software de otimização). A figura mostra a situação inicial do programa de interface, quando não há nenhum resultado da otimização e todas as densidades são iguais.



Figura 35 - Janela do programa de interface com explicação de seus elementos gráficos.

O botão “refresh” ativa um comando que atualiza o texto dinâmico da iteração e a tela de visualização geral da otimização, além de habilitar o funcionamento do texto dinâmico das densidades. O botão “Auto-refresh” ativa um comando que continuamente atualiza os dados de iteração e a tela de visualização até o final do programa de otimização, tornando, portanto, a visualização da otimização simultânea ao programa principal de otimização. Ao se clicar nos elementos da malha de finitos da tela de visualização, suas densidades aparecem no texto dinâmico de densidades, o que demonstra que os elementos da tela de visualização também possuem função de botão simples.

Para transportar as coordenadas dos elementos finitos e de seus nós do sistema de coordenadas do ANSYS (onde é criada a malha de finitos) para o sistema de coordenadas do Flash, para poder criar a visualização mostrada na figura anterior, foi usada a formulação de CAD mostrada nos fundamentos teóricos.

Dessa forma, devemos encontrar, de acordo com a figura abaixo, as coordenadas do sistema $[x_M, y_M, z_M]$ (que é o sistema da malha do ANSYS) para o sistema $[x_1, y_1, z_1]$ que é o sistema do Flash, passando pelo sistema $[x_2, y_2, z_2]$ que é o sistema da tela de visualização, paralelo ao sistema do ANSYS e sujeito a um fator de escala para preencher toda tela de visualização.

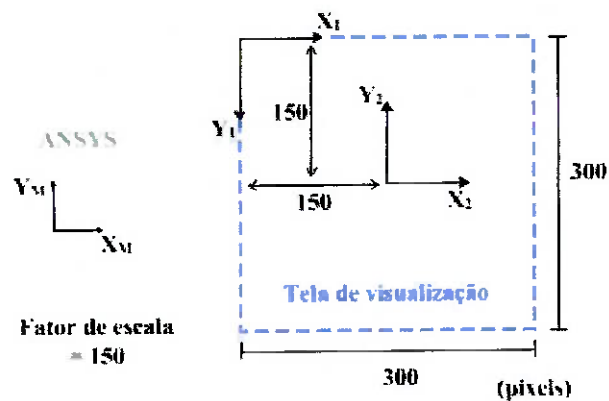


Figura 36 - Transformação de coordenadas para a tela de visualização da interface.

Assim, usando as equações dos fundamentos teóricos, obtemos a seguinte conversão de coordenadas que foi implementada para criar o código fonte em ActionScript para construção do programa de interface:

$$x_1 = 150 + 150x_M \quad (69)$$

$$y_1 = 150 - 150y_M \quad (70)$$

6. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Nessa seção são mostrados e discutidos os resultados obtidos na simulação do projeto de um micro-motor eletrostático, com o objetivo de se analisar a influência das variáveis de projeto do motor no torque final. Vale destacar que também foram feitas simulações da rotina de MEF do programa desenvolvido, para comprovar a eficácia dos resultados da parte de MEF do programa através de comparações com simulações feitas no software ANSYS. Essas simulações estão apresentadas no Apêndice B.

Como já foi mencionado, para realizar essa simulação, que é uma simulação no ANSYS, foi usada uma rotina de MATLAB para gerar um arquivo de entrada para o ANSYS em linguagem ADPL, que está no ANEXO A. A figura abaixo apresenta a função dessa rotina na simulação do motor.

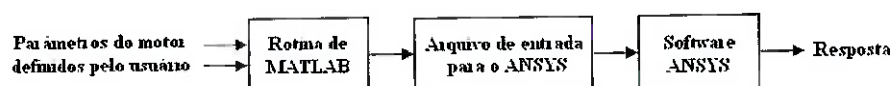


Figura 37 - Esquema de entrada de dados na simulação.

Vale destacar que essa rotina é importante, pois são feitas 7 simulações diferentes no ANSYS para cada modelo de micro-motor. Cada uma dessas 7 simulações é para uma posição diferente do rotor em relação ao estator, pois a simulação do motor é uma simulação estática. Essa defasagem entre o rotor e o estator, como já foi discutido, é de no máximo 15° (desalinhamento máximo) e no mínimo 0° (alinhamento), como é mostrado na figura abaixo.

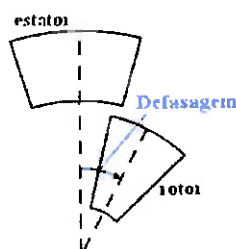


Figura 38 - Defasagem entre o dente do rotor e o pólo do estator.

Essa rotina foi feita de forma a possibilitar diversas dimensões para o micro-motor, como diferentes raios, altura do dente, ângulo de largura do dente e do pólo, ângulo de defasagem entre o dente do rotor e o pólo do estator, diferentes valores de gap entre estator e rotor, qualquer valor de potencial elétrico no estator, qualquer nível de discretização na malha de finitos, etc. Essa rotina está no ANEXO A. A partir dessa rotina foram simulados todos os casos para o protótipo do micro-motor que estão apresentados. Basicamente, essa rotina de MATLAB modela o espaço ao redor do dente do rotor e do pólo do estator (ar e suas propriedades de permissividade elétrica, como já discutido nos fundamentos teóricos), permitindo melhor discretização na região do gap do motor, mesmo que isso não seja tão necessário, uma vez que estamos usando o método P, já discutido anteriormente.

Além de impedir o aparecimento de erros do usuário no refinamento da malha de finitos, essa discretização ajuda a formar a malha de finitos, uma vez que o próprio elemento SOLID128 apresenta restrições no seu “mesh”, obrigando o usuário a discretizar melhor a malha de finitos. Em seguida, a rotina aplica os potenciais elétricos nas regiões que representam a borda do estator e aplica também zero nas regiões da borda do rotor, como mostra a figura abaixo.

Deve-se destacar também que é necessário aplicar zero (aterrar) os nós extremos do modelo de MEF (ANSYS, 2004). Também é importante que o domínio do modelo de MEF (pré-definido como circular) seja bem maior que a estrutura do motor, para que não haja influência significativa desse potencial nulo das extremidades no campo elétrico que irá se formar. Por fim, a rotina também define o tipo de análise e soluciona o problema, deixando para o usuário somente a função de extrair os resultados no pós-processamento do ANSYS.

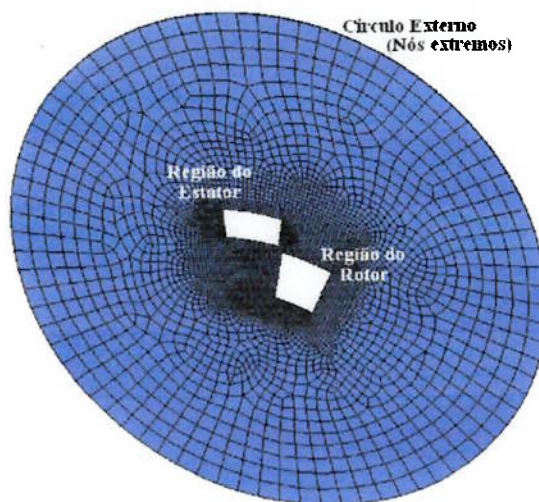


Figura 39 - Um modelo de MEF tridimensional com desalinhamento máximo em vista cavaleira.

A partir desse modelo de MEF foram feitas várias simulações para se poderem avaliar as forças eletrostáticas em diferentes modelos de micro-motores eletrostáticos e, conseqüentemente, o torque do motor, como será apresentado adiante.

Nesse ponto vale destacar novamente que, como mostrado na figura acima, somente é simulado um par de dente do rotor e pólo do estator. Obviamente, os perfis de distribuição de campo elétrico e potencial elétrico seriam diferentes caso fossem analisados pólos e dentes inativos adjacentes na simulação. Entretanto, as modificações pouco alterariam o valor das forças eletrostáticas no rotor, uma vez que os dentes adjacentes ao dente ativo estão a uma distância bem maior, o que diminui muito o valor das forças eletrostáticas. Quanto a influência de pólos inativos adjacentes, estes poderiam modificar um pouco o perfil de distribuição de voltagem e campo elétrico, no entanto, pouco influenciariam na força eletrostática no rotor.

Todas essas considerações são válidas para o caso em que se segue a configuração do motor 12:8 da literatura (como já foi discutido). Caso façamos algumas modificações na configuração básica do micro-motor, devemos simplesmente tomar mais cuidados com a interação eletrostática entre o par ativo de dente/rotor e os dentes e rotores inativos do projeto, como será melhor discutido mais adiante.

Em todas as simulações foi aplicada voltagem de 50V no estator e foram simuladas 7 defasagens diferentes (15.0° , 12.5° , 10.0° , 7.5° , 5.0° , 2.5° e 0.0°) para cada mudança nos parâmetros do motor. Dessa forma, pretende-se analisar a influência de algumas variáveis de projeto no torque final do motor (usando a formulação que já foi apresentada). Para isso, primeiro foram definidas as medidas de um modelo padrão de motor para essas análises. Vale destacar que esses parâmetros não necessariamente representam as medidas de um micro-motor real, somente foram usados para simulação. A partir dessas medidas, obteve-se o modelo de elementos finitos mostrado na figura anterior.

Parâmetros	Valor
Raio do rotor	2,5mm
Altura do dente do rotor	0,7mm
Largura do dente do rotor	14°
Largura do pólo do estator	14°
Gap entre rotor e estator	0,08mm
Espessura do rotor	0,01mm

Tabela 6 – Valores dos parâmetros do modelo padrão nas análises.

Seguindo com a simulação desse modelo, obtiveram-se vários resultados que serão mostrados logo abaixo. Com exceção do valor do torque final do modelo, os outros resultados não serão mostrados para os demais modelos, por não participarem das análises propostas nessa seção.

Na figura abaixo é mostrada a distribuição do potencial elétrico nodal no modelo no caso de desalinhamento máximo (ou seja, defasagem de 15° entre rotor e estator). Nessa figura e na próxima (que mostra a distribuição de campo elétrico nodal no modelo) observa-se a necessidade de se criar uma malha de finitos muito maior que a região de proximidade do rotor e do estator, pois dessa forma as extremidades da malha de finitos não interferem no resultado do campo elétrico e, conseqüentemente, no valor das forças resultantes.

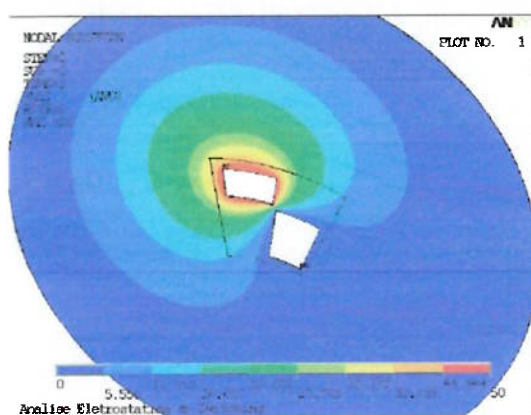


Figura 40 - Distribuição de potencial elétrico nodal no modelo de MEF.

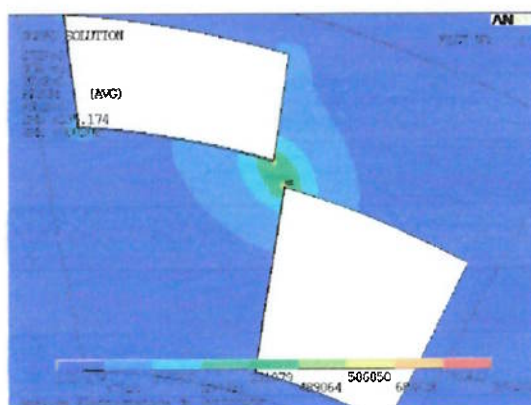


Figura 41 - Distribuição de campo elétrico nodal no modelo de MEF.

A seguir são apresentados os resultados de campo elétrico nodal e de força eletrostática na superfície do rotor na forma de vetores.

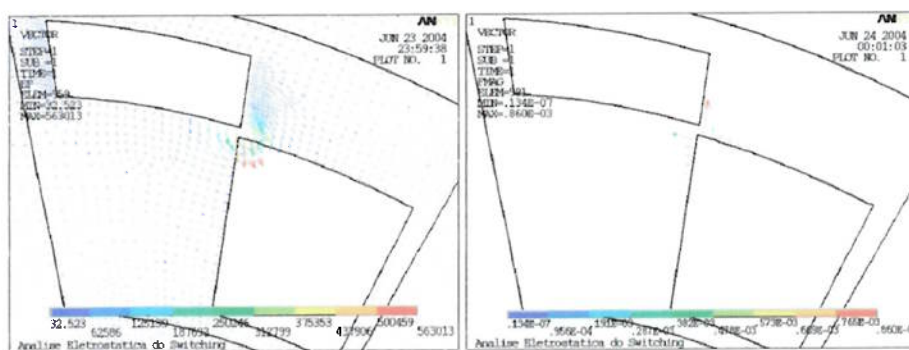


Figura 42 - Resposta vetorial do campo elétrico (à esquerda) e resposta vetorial da força eletrostática (à direita)

A partir daí, foram realizadas sucessivas simulações para cada valor de defasagem do rotor e do estator (como já descrito) para poder se analisar melhor o motor.

As figuras a seguir mostram o campo elétrico na resposta vetorial do ANSYS para cada um dos casos de desalinhamento. Essa análise é importante para compreendermos melhor o surgimento das forças eletrostáticas no conjunto dente do rotor e pólo do estator.

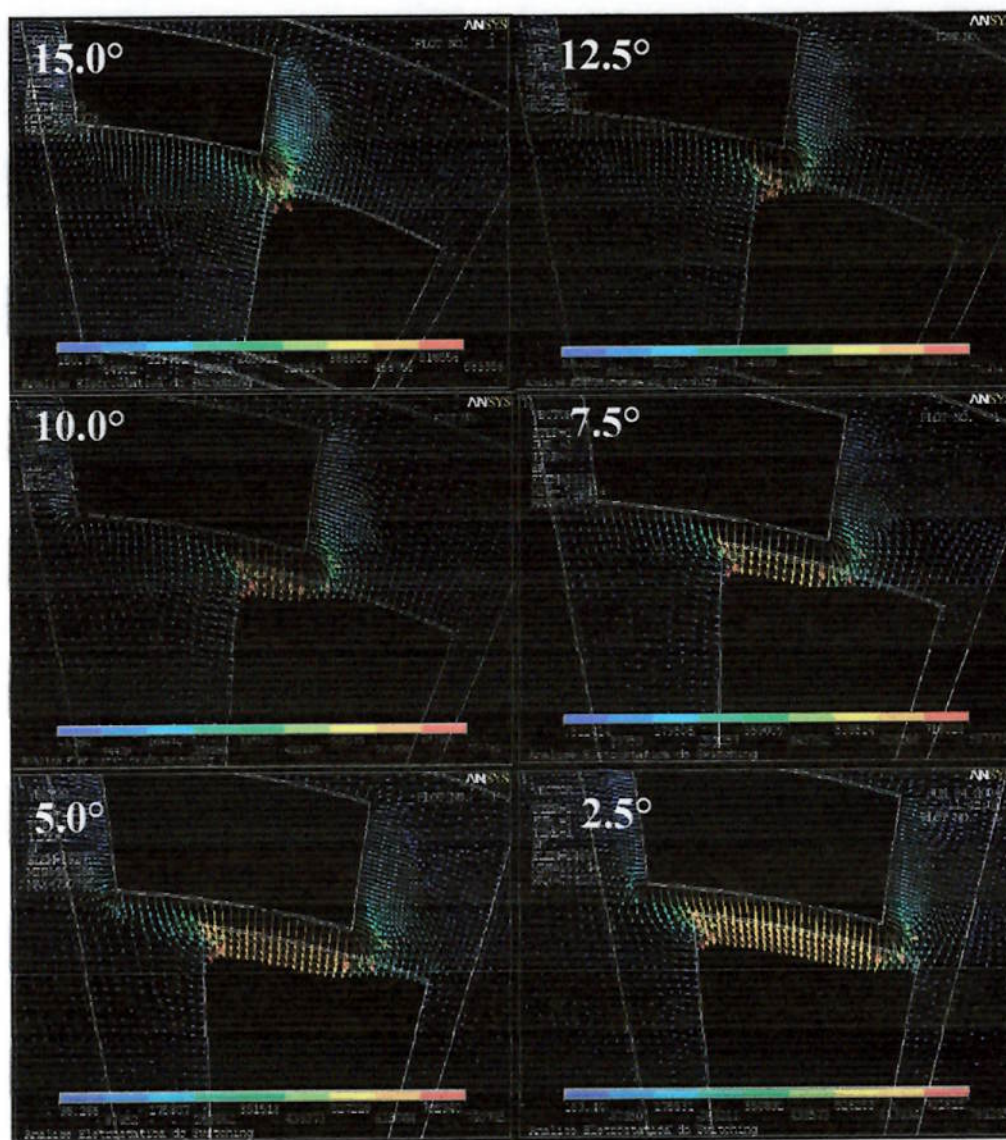


Figura 43 - Distribuição do campo elétrico vetorial em todos os casos de desalinhamento no modelo padrão antes de se completar o “switching”.

A próxima figura mostra a distribuição do campo elétrico vetorial para o caso de alinhamento (defasagem nula), completando o “switching”, e a distribuição de forças eletrostáticas para o alinhamento final (onde, como pode-se observar na figura) não há desequilíbrio de forças radiais no rotor).

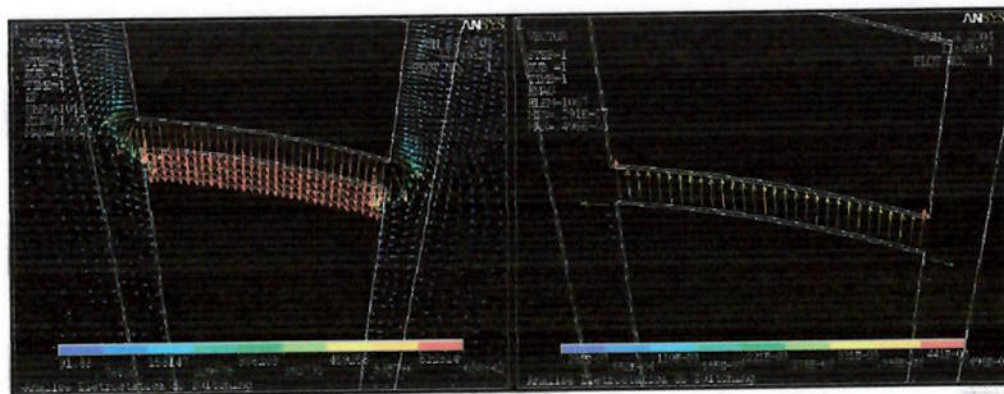


Figura 44 - Distribuição do campo elétrico no alinhamento (à esquerda) e distribuição das forças eletrostáticas (à direita).

A partir dos valores computados das resultantes de força eletrostática nessas simulações, pôde-se levantar um gráfico para o valor do torque do micro-motor de acordo com o valor da defasagem.

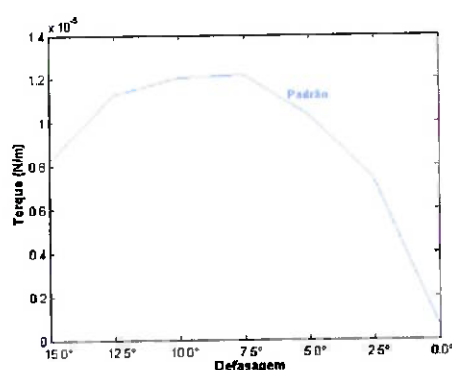


Figura 45 - Gráfico do torque do motor do modelo padrão.

Note que esse gráfico se repete a cada switching que representa 15° de giro para esse tipo de motor 12:8. Portanto, podemos concluir que esse perfil de torque se repete 24 vezes em cada rotação do micro-motor. Assim, esse gráfico representa

também um parâmetro de muita importância para análise e controle do micro-motor eletrostático.

Observe também que o torque máximo ocorre quando a defasagem está entre 10° e 7.5° . Essa mesma região de máximo se repetirá em todos os modelos de micro-motores que apresentam largura dos dentes do rotor igual à largura dos pólos do estator, como será visto mais adiante.

Prosseguindo com o proposto, vamos primeiro analisar variações no tamanho do raio do rotor. Para tanto, foram analisados, além do modelo padrão, mais dois modelos: um com o raio de 2mm (raio menor) e outro com o raio de 3mm (raio maior).

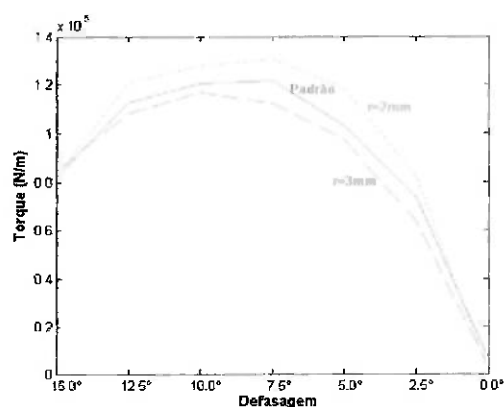


Figura 46 - Gráfico do torque para variação do raio do rotor.

Como foi mencionado na introdução nos motores eletrostáticos a dimensão característica do motor não influencia na força eletrostática. No entanto essa afirmação se refere a modelos de motores proporcionais e esses modelos analisados não são proporcionais, pois são projetados dentro de restrições angulares. Tendo isso em vista, observe que aumentamos o raio, mas os ângulos analisados durante o *switching* se mantém iguais para os dois modelos. Dessa forma, temos que para um raio menor, o comprimento de arco de circunferência na extremidade do dente do rotor é menor. Assim, tendo uma distância menor separando as cargas elétricas do rotor e do estator resulta em uma maior força eletrostática e maior torque, o que justifica o gráfico acima.

Portanto, para projetos de micro-motores, menores dimensões de raio do rotor ajudam a aumentar o torque. Entretanto, deve-se destacar que essa observação é limitada pelo valor da capacitância equivalente do motor, que diminui o valor das cargas no rotor com a diminuição do tamanho do motor.

Outra análise importante é a análise do tamanho do *gap* entre rotor e estator. Foram simulados mais dois modelos que diferem do modelo padrão no valor do *gap*: 0,06mm (menor) e 0,1mm (maior). Assim, foi obtido o gráfico abaixo.

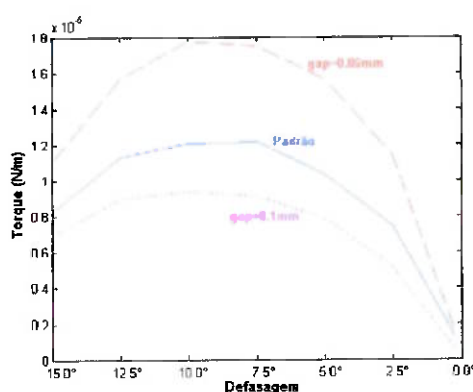


Figura 47 - Gráfico do torque para variação do *gap* do motor.

Analisando o gráfico acima, concluímos que quanto menor o *gap* maior o torque no micro-motor. Como pode ser visto nesse gráfico e como poderá ser observado, após as demais análises, a variação do *gap* é a mudança mais significativa no micro-motor quanto a variação do torque, o que significa que esse é o parâmetro mais importante para aumentar o torque do motor e, assim, deve-se buscar sempre minimizar o *gap* para aumentar o torque final. No entanto, a variação do *gap* esbarra nas limitações da micro-fabricação em se garantir que não haja folga entre o rotor e seu eixo suficiente que permita que o rotor chegue a encostar nos pólos do estator durante o funcionamento.

Outra análise que deve ser feita é a variação da largura do dente do rotor e do pólo do estator. O principal problema que restringe essa variação é a possibilidade e interação eletrostática entre pólos do estator ou entre um dente ativo do rotor e um pólo inativo do estator, como mostra a figura abaixo. Na figura abaixo, os pólos e dentes com cor são ativos e os demais inativos. As setas azuis mostram as possíveis interações eletrostáticas indesejadas. Devido às distâncias relativas entre os pólos,

pode-se concluir que a interação entre o dente ativo e o pólo inativo mais próximo é a interação mais perigosa para se diminuir o valor da força eletrostática.

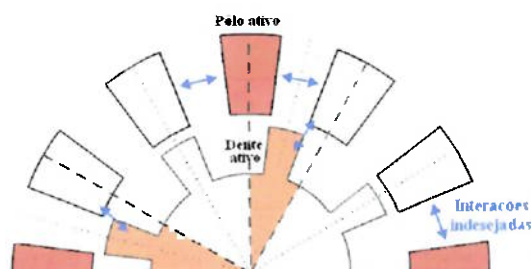


Figura 48 - Interações eletrostáticas entre pólos e dentes ativos e inativos.

Para impedir essa interação simplesmente restringe-se o valor da largura a 15° (para o caso do motor 12:8, em que, como já foi comentado, 15° é a rotação do rotor a cada *switching*), assim, quando temos desalinhamento máximo, não existe sobreposição angular (como pode ser visto na figura abaixo) entre pólos e dentes.

Para compreender melhor isso, observe que em um motor de 12 pólos (12:8), temos 30° que os separam e, no desalinhamento máximo, o dente do rotor se posiciona no meio de dois pólos do estator, a 15° de cada pólo. Se tivermos mesma largura de dentes e pólos, para impedir a sobreposição no desalinhamento máximo (15°), deve-se impor uma largura menor que 15° para cada (como foi mostrado na figura anterior), caso contrário, teremos sobreposição (como é mostrado na figura abaixo), diminuindo as distâncias relativas entre pólos e dentes e aumentando, portanto, as interações eletrostáticas indesejadas.

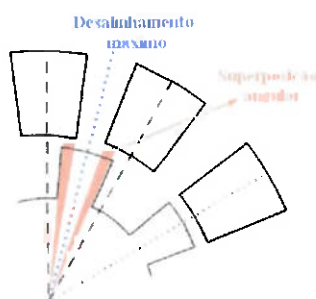


Figura 49 - Superposição angular no desalinhamento máximo

Entretanto, essa interação eletrostática é muito pequena, principalmente para valores de largura de pólos e dentes não muito superiores a 15° . Por isso, é muito

comum ver na literatura (como foi mostrado na introdução) valores de largura de dente/pólo maiores de 15° para motores 12:8, como, por exemplo, 18° , como é definido em LEFÈVRE (1995).

Dessa forma, nessa análise, foram simulados mais dois modelos que diferem do modelo padrão somente no valor da largura do conjunto dente/pólo (mantendo a mesma largura para o dente e para o pólo): 12° (menor) e 16° (maior), que é pouco superior a 15° , como já discutido, portanto, viável.

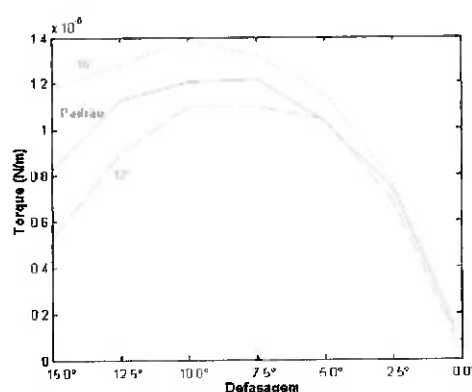


Figura 50 - Gráfico do torque para variação da largura do conjunto dente/pólo.

Como pode ser observado no gráfico anterior, valores maiores de largura do conjunto dente/pólo apresentam maior valor de torque. Isso se deve ao fato de que a intersecção angular (mostrado na figura anterior – disposição de defasagem máxima) entre o dente ativo do rotor e o pólo ativo do estator representa maior proximidade das cargas elétricas de cada componente em cada valor de defasagem. Embora essa superposição aumente as interações eletrostáticas indesejadas, aumentam também a força eletrostática e o torque do rotor. Uma vez que podemos considerar (dentro de pequenas variações, como foi discutido) essas interações de pouca influência no problema, podemos concluir que o aumento da largura desses componentes do motor ajuda a aumentar o torque final.

Essa análise levanta a questão de se ter larguras diferentes nos dentes do rotor e nos pólos do estator. Isso é importante, pois a interação eletrostática entre os pólos do estator (principalmente em uma situação **dinâmica** durante a operação do motor) é muito prejudicial ao seu funcionamento, quando se está trabalhando com larguras de pólos bem maiores que 15° .

Outro fator que viabiliza essa situação é o fato de termos mais pólos do que dentes, o que significa que uma largura maior nos dentes do rotor é preferível.

Dessa forma, foi analisado esse fator também, simulando mais um modelo que se diferencia do modelo padrão somente na largura do dente (18°), como mostra a figura abaixo.

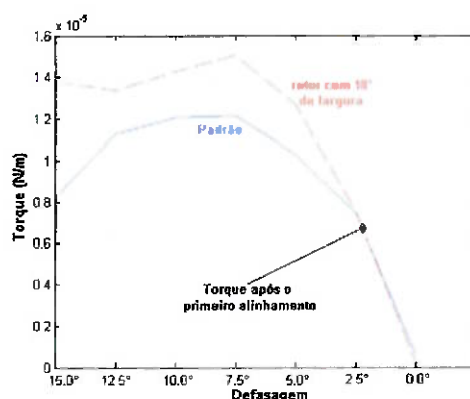


Figura 51 - Gráfico do torque para variação da largura somente do dente do rotor.

Como já foi mencionado, a superposição angular do estator com o rotor ajuda a aumentar o torque, como demonstra o gráfico acima. Portanto aumentar a largura do dente ajuda a aumentar o torque do motor.

No entanto, deve-se observar que na curva de torque existe uma queda brusca para valores de defasagem menores que $2,5^\circ$. Assim, deve-se levantar a questão de que após o primeiro alinhamento de faces no motor (como mostra a Figura 52), a defasagem é muito pequena e as forças eletrostáticas caem muito. Isso se torna um problema para o funcionamento do motor, pois caso as forças de atrito no rotor (que são muito importantes na prática) sejam maiores que as forças eletrostáticas após esse primeiro alinhamento, corre-se o risco do dente não se mover para o alinhamento total, o que significa que no próximo *switching* o motor não estará alinhado e todos os dentes começarão com um ângulo de “defasagem máxima” maior (como mostra a Figura 53), o que é um sério problema para o funcionamento e para o controle do micro-motor, porque, nesse caso, a maior defasagem significa maior distância entre cargas elétricas e, conseqüentemente, menor torque inicial no *switching*. Em uma situação prática, esse novo torque inicial pode ser menor que o atrito do rotor, o que impossibilitaria o funcionamento do motor, ou seja, seria

observado um movimento inicial do motor no primeiro *switching* e depois seu travamento, obrigando correções na geometria do projeto ou aumento da voltagem elétrica aplicada.

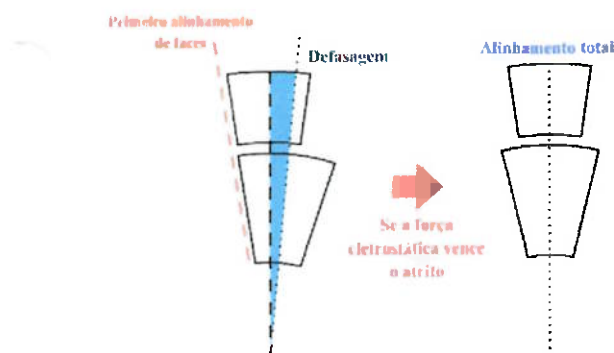


Figura 52 - Primeiro alinhamento de faces do micro-motor com largura de dentes e de pólos diferentes.

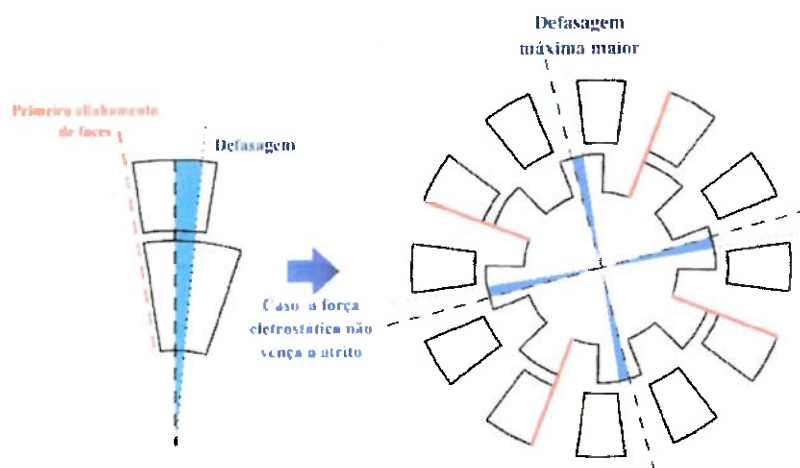


Figura 53 - Caso de defasagem máxima maior devido a problemas após o primeiro alinhamento.

Nesse modelo analisado, temos que o desalinhamento adicional pode ser de 2° . Dessa forma, para garantirmos que ainda durante esse *switching* o dente se alinhe completamente com o pólo, o torque (cujo valor é representado pelo ponto destacado no gráfico do torque anterior) deve ser o suficiente para vencer as forças que impedem o funcionamento do motor, como as forças de atrito. Para se obter esse ponto extra, foi realizada outra simulação com o modelo na defasagem de 2° .

Vale destacar que o caso analisado da largura do dente maior que a largura do pólo, teremos forças de atrito maiores, o que significa que há uma maior necessidade de termos torque significativamente maior que no caso padrão, para haver maior certeza do alinhamento total dos dentes do rotor.

Outra análise que pode ser feita é a variação da voltagem aplicada nos pólos do estator. A figura a seguir mostra a curva de torque para o modelo padrão quando aplicado 10V, 50V e 100V.

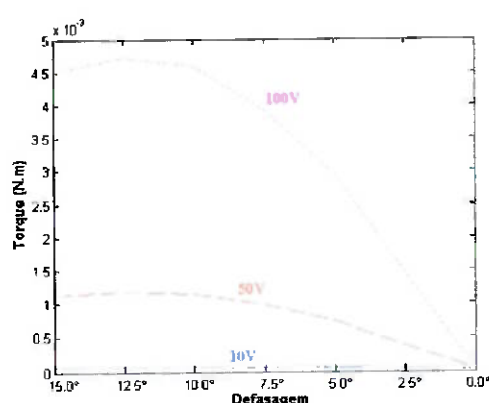


Figura 54 - Curva de torque do modelo padrão para 10V, 50V e 100V aplicados.

As curvas da figura anterior demonstram que a influência da voltagem é muito grande e necessita ser analisada melhor. Dessa forma, foi simulada a situação de torque máximo do micro-motor para diferentes voltagens aplicadas, de 10V até 120V, que é mostrado na figura abaixo.

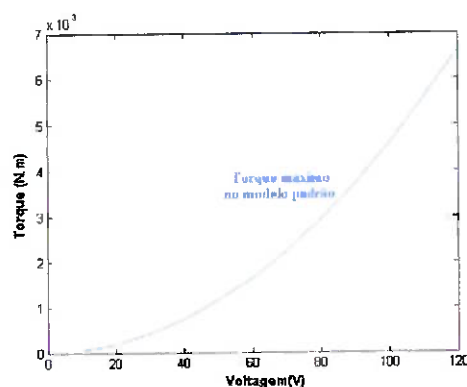


Figura 55 - Torque máximo do micro-motor em função da voltagem aplicada.

Essa curva de torque máximo em relação à voltagem mostra que o torque do micro-motor é proporcional a, aproximadamente, o quadrado da voltagem aplicada, como já foi mencionado nos Fundamentos Teóricos.

Portanto, podemos concluir que a variação da voltagem é um fator de grande importância que deve ser levado em consideração na experimentação prática do micro-motor, buscando, acima de tudo, seu funcionamento, ou seja, aparecimento de torque inicial que movimento o rotor e o tire da inércia.

Para finalizar a análise do modelo de MEF do micro-motor, deve-se analisar agora o atrito no modelo padrão já discutido.

Antes de analisar o atrito, vamos observar o comportamento das forças tangencial e normal em um par dente/pólo ativo nas condições padrões definidas anteriormente, como mostra a figura a seguir.

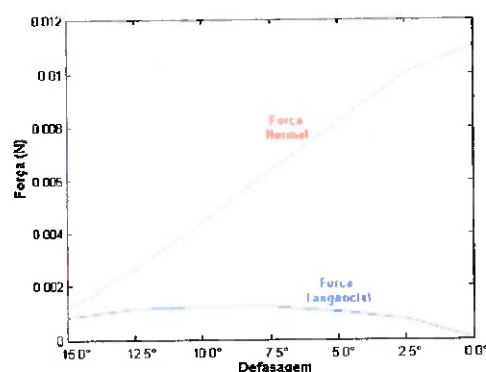


Figura 56 - Forças tangencial e normal em um dente ativo usando o modelo padrão.

A partir da figura acima, pode-se concluir que a força normal é muito maior que a força tangencial no dente, principalmente no alinhamento total (em 0° de defasagem). Assim, podemos concluir que acontece o caso de atrito máximo a cada vez que há alinhamento, ou seja, na direção radial de cada estator. Com isso, também se pode prever que são nessas direções que acontecerá maior desgaste no eixo do rotor.

No entanto, esse gráfico não é o suficiente para analisar o atrito no eixo do rotor. Para isso devemos recorrer à formulação proposta nos fundamentos teóricos, com a eq.(33), para encontrarmos o comportamento do coeficiente de atrito torsional máximo permitido para o micro-motor. Assim, devemos considerar o torque final

calculado anteriormente seja igual ao contra-torque causado pelo atrito. Dessa forma, obtemos o seguinte gráfico:

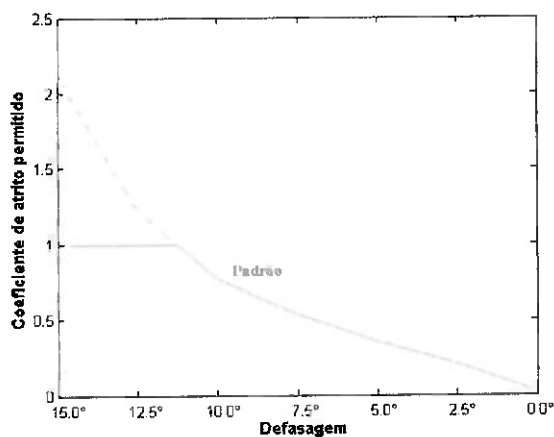


Figura 57 - Comportamento do coeficiente de atrito máximo permitido.

Através da Figura 57 podemos observar que é permitido um coeficiente de atrito maior (um coeficiente de atrito que gera um contra-torque que não impede o funcionamento do micro-motor) na região de desalinhamento máximo. Vale ressaltar que o coeficiente de atrito é limitado pelo valor unitário no gráfico (sendo que a curva tracejada é o valor obtido matematicamente e a curva contínua é a curva real do coeficiente de atrito permitido), o que significa que nessa região a força de atrito é menor que a força que induz ao torque do motor, pois o valor do coeficiente de atrito permitido teve que ser limitado, atendendo ao seu significado físico, supondo o atrito entre dois materiais metálicos. No gráfico também pode ser observado que próximo da região de defasagem 0° , o valor desse coeficiente permitido fica muito baixo. Na prática ele não chega a se aproximar tanto de zero, pois se inicia um novo *switching* (de outro dente que é atraído por um novo pólo ativo) que diminui a queda da curva da figura anterior.

Portanto, a partir desse gráfico podemos intensificar a conclusão que o maior desgaste do eixo é na região de alinhamento total (defasagem de 0°) e o menor desgaste se dá nas regiões de desalinhamento máximo que são exatamente as regiões entre os pólos do estator, uma vez que é permitido um coeficiente de atrito máximo (igual a 1) na região de desalinhamento, para o caso do atrito entre o rotor e o eixo,

considerando ambos materiais metálicos. Essa mesma conclusão também é apresentada na literatura (TAVROW, 1991).

Assim, tendo em vista que na fabricação de protótipos de micro-estruturas existem muitas micro-irregularidades quando se analisam dimensões próximas à resolução de fabricação, caso seja possível manipular essas irregularidades ou a rugosidade em certas regiões do eixo do micro-motor, deve-se tentar alinhar as regiões de maiores irregularidades do eixo com as regiões entre os pólos do estator. Essa tentativa buscaria impedir que essas regiões de maior irregularidade ficassem nas regiões de alinhamento máximo, como é mostrado no gráfico anterior, e, dessa forma, evitar que o atrito com o eixo prejudique, ou mesmo impeça, o funcionamento do micro-motor.

Outra conclusão importante que pode ser feita através da análise do gráfico, é o fato de a força de atrito máxima (supondo que esta força é limitada pelo maior coeficiente de atrito permitido, 1) não ser maior que a força de torque, como já foi comentado, na região de desalinhamento entre 15° e 10° , aproximadamente. Assim, pode-se concluir que nessa região, no funcionamento do motor previsto anteriormente, o torque gerado será o suficiente para vencer o atrito no eixo do micro-motor. Tendo em vista que o atrito estático é maior que o atrito dinâmico em qualquer material, podemos supor que a partida inicial do micro-motor deva ser o momento de funcionamento mais crítico. Portanto, através da análise do atrito com o eixo da Figura 57, pode-se concluir que a região aproximada entre 15° e 10° de desalinhamento é a região ideal para se iniciar o funcionamento do micro-motor, pois é uma região que apresenta torque mais elevado em relação ao contra-torque gerado pelo atrito com o eixo.

A partir de todas essas análises é possível projetar melhor um micro-motor eletrostático tendo em vista todas as conclusões obtidas e suas restrições.

7. RESULTADOS DA MICRO-FABRICAÇÃO

Essa seção é dedicada aos resultados da micro-fabricação dos protótipos de micro-motores eletrostáticos desse projeto, desde os desenhos das máscaras para fabricação até os resultados experimentais dos protótipos fabricados.

7.1. Projeto dos protótipos e desenho de máscaras da foto-litografia

Para o projeto dos protótipos de micro-motores e desenhos das máscaras desse trabalho, foram levados em consideração as técnicas de fabricação apresentadas nos fundamentos teóricos e disponíveis no LNLS, as dimensões de micro-motores estudados na literatura (como também foi mostrado nos fundamentos teóricos) e as conclusões obtidas na seção anterior de simulação computacional de um modelo de MEF de um micro-motor.

Dessa forma, foi criado o seguinte esquema para se desenhar as máscaras dos micro-motores de forma rápida e sistematizada:

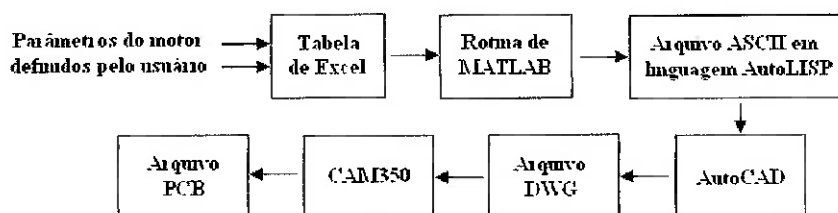


Figura 58 - Esquema de construção dos desenhos das máscaras.

Na tabela de Excel mostrada no esquema acima, encontram-se os parâmetros que definem a geometria dos protótipos de micro-motores desse projeto. Essa tabela é apresentada no ANEXO D.

Nessa tabela definem-se as principais dimensões dos protótipos de micro-motores que são: raio externo do estator, altura e largura dos pólos do estator, raio do rotor, altura e largura dos dentes do rotor, gap, diâmetro do eixo do motor e folga do eixo ("clearance").

Como pode ser visto no ANEXO D, os seguintes valores dos parâmetros do micro-motor são arranjados de forma a se obter 64 modelos diferentes de protótipos de micro motores:

Parâmetro	Valores
Raio externo	750, 700, 500 e 450 μm
Altura do pólo do estator	250, 200, 150 e 100 μm
Largura do pólo do estator	25, 20 e 15°
Raio do rotor	600, 550, 500, 450, 400, 350 e 300 μm
Altura do dente do rotor	250, 200, 150 e 100 μm
Largura do dente do rotor	30, 25, 20 e 15°
Gap	4 e 8 μm

Tabela 7 - Variação dos valores dos parâmetros dos protótipos.

Esses modelos, juntamente com mais 15 modelos especiais (ver ANEXO D) totalizam 79 modelos diferentes de montagem dos protótipos dos micro-motores desse trabalho.

A tabela, que está no ANEXO D, também apresenta uma nomenclatura para cada tipo de estator e para cada tipo de rotor projetado e desenhado, totalizando 50 tipos diferentes de rotores e 12 tipos diferentes de estatores.

Como mostra a Figura 58, essa tabela é interpretada por uma rotina de MATLAB que gera um arquivo escrito em linguagem AutoLISP (linguagem usada para se desenhar no AutoCAD a partir de comandos em ASCII). Dessa forma, podem-se obter todos os 50 desenhos de rotores e 12 de estatores de forma rápida e sistematizada, atendendo a qualquer modificação dos parâmetros de projeto. Esse método foi empregado, pois houve várias tentativas e mudanças na determinação desses parâmetros através de uma interação com o engenheiro do LNLS para se certificar que os protótipos desenhados estivessem dentro das possibilidades de fabricação do Laboratório de Micro-fabricação do LNLS. Essa rotina de MATLAB encontra-se no ANEXO E.

Como descreve a Figura 58, em seguida esse arquivo de saída da rotina de MATLAB é interpretado pelo próprio AutoCAD gerando o desenho final dos protótipos. Esse desenho é rearranjado e salvo em um arquivo DWG (extensão do

AutoCAD), que por sua vez é interpretado pelo software CAM350 (disponível no departamento). Esse é o software de CAD usado pela empresa que faz as máscaras (Fotolitos Milani Ltda.) a partir de um arquivo PCB (extensão própria do CAM350).

Dessa forma, as máscaras dos rotores e dos conjuntos eixo/estator são desenhadas. Já as máscaras das trilhas são desenhadas diretamente no AutoCAD. Uma vez que há grande variação nos parâmetros do micro-motor, principalmente do raio externo, é necessário que haja 2 tipos diferentes de trilhas.

Os protótipos desse projeto têm por objetivo principal simplesmente seu funcionamento. Para isso seus parâmetros foram escolhidos de forma a termos a maior resposta de torque, da forma que foi mostrado na seção de simulação computacional. Outro aspecto importante de se considerar é o atrito do rotor na sua base, ou seja, em contato com a superfície do substrato. Como não foram encontradas informações e técnicas na literatura que levassem a predição dessas forças de atrito, a melhor solução encontrada foi a opção de se construir nos protótipos um componente muito comum na literatura para reduzir o contato do rotor com sua base, chamado “bushing”.

Em muitos casos na literatura (FRANGOULT, 1994), a adição desse novo componente gera a necessidade de uma nova máscara, entretanto, isso aumenta a complexidade da fabricação e montagem dos protótipos. Dessa forma, foi decidido nesse projeto fabricar o bushing juntamente com a trilha, visto que esses não apresentam contato que possa prejudicar a parte elétrica do micro-motor e visto que a altura da trilha (10 μm) é suficientemente pequena de forma a possibilitar a adição desse componente sem prejudicar a rotação do rotor, ajudando este a ter menos contato na sua base e, portanto, menos atrito que possa prejudicar seu funcionamento. Assim, são desenhados 4 tipos diferentes de máscaras para as trilhas: os dois que já mencionados anteriormente e mais dois que contam com a adição do bushing. Mas como pode ser visto no ANEXO D, o bushing só pode ser usado para alguns casos, pois seu posicionamento depende do tamanho e das dimensões do rotor.

As figuras abaixo mostram o desenho final dos modelos de trilhas, rotores e estatores dos protótipos de micro-motores fabricados nesse projeto. A figura abaixo mostra os 50 tipos de rotores propostos nesse projeto, descritos no ANEXO D.

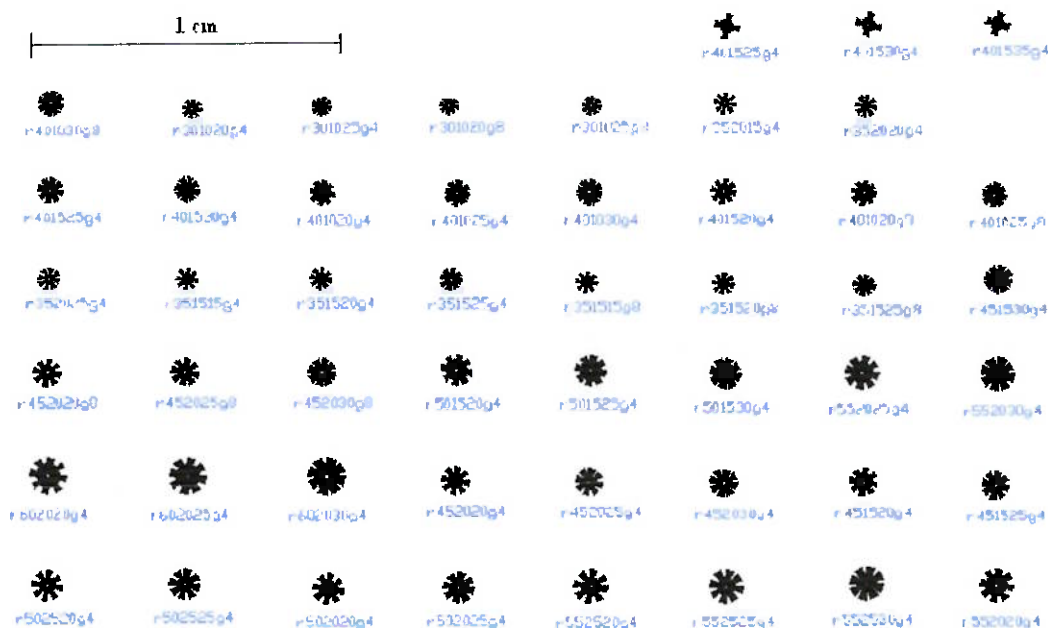


Figura 59 - Desenho dos 50 tipos diferentes de rotores propostos nesse projeto.

A figura abaixo mostra os 12 conjuntos eixo/estator descritos no ANEXO D.

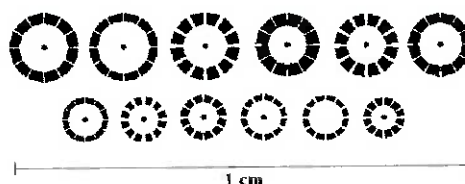


Figura 60 - Desenho dos 12 tipos diferentes de conjuntos eixo/estator propostos nesse projeto.

A figura abaixo mostra a máscara das trilhas com os 4 tipos de trilhas mencionadas anteriormente. Note que as duas trilhas da direita apresentam no seu centro as micro-estruturas de *bushing*.

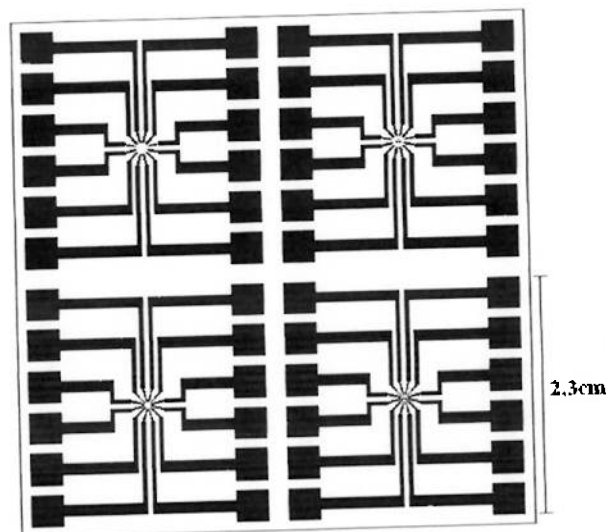


Figura 61 - Desenho da máscara das trilhas de circuito elétrico dos protótipos desse projeto.

7.2. Fabricação dos protótipos de micro-motor

O processo de micro-fabricação dos protótipos de micro-motores propostos por esse projeto foram realizados no Laboratório de Micro-fabricação do LNLS, como já foi abordado. Esse processo seguiu as etapas mostradas na introdução.

Nessa seção, são apresentados detalhes e características da prática da fabricação e alguns problemas (e suas respectivas soluções) que ocorreram durante o processo de fabricação dos protótipos.

Como já mencionado na introdução, uma das primeiras etapas da fabricação propriamente dita é a deposição do resiste pela técnica de foto-litografia. Esse processo se dá nos equipamentos do LNLS mostrados na figura abaixo. A foto da esquerda mostra o recipiente de deposição do resiste com o equipamento em que é feita a cura do resiste sobre a placa de substrato. Já a figura da direita é o equipamento que realiza a foto-litografia e retira parte do resiste para que este forma um molde para o crescimento da estrutura.

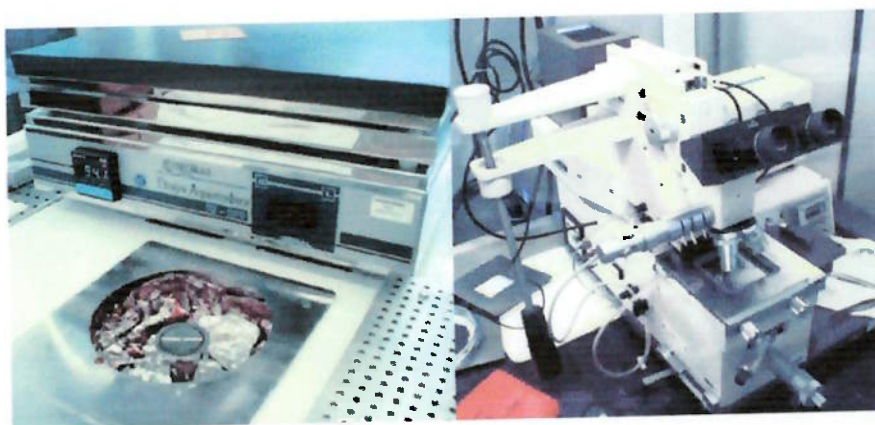


Figura 62 - Equipamentos usados no LMLS para deposição do molde de resiste.

Como mencionado na introdução, em seguida, a placa do substrato com o molde de resiste é usada na eletrodeposição para crescimento das estruturas metálicas do micro-motor: ouro para a trilha elétrica e níquel para o conjunto do eixo/estator e para o rotor. Esse processo de eletrodeposição é feito nos equipamentos mostrados na figura abaixo. A foto da esquerda é onde se realiza a eletrodeposição do níquel, a foto central é onde é feita a eletrodeposição da camada de sacrifício de cobre dos rotores e à direita é onde se realiza a eletrodeposição do ouro para a trilha.

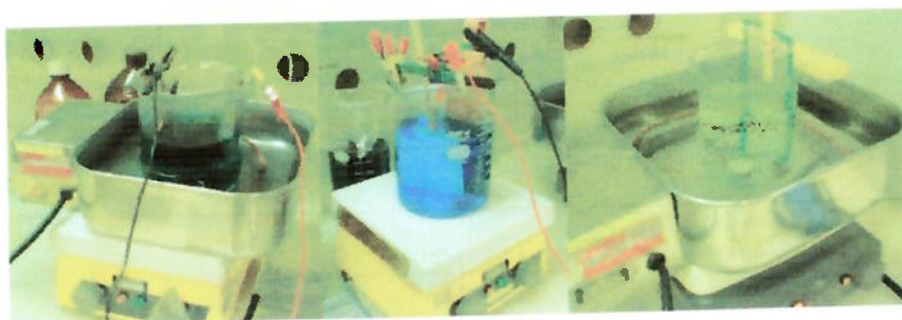


Figura 63 - Equipamentos usados no LMLS para eletrodeposição das estruturas metálicas do micro-motor.

No processo de eletrodeposição, no crescimento das estruturas dos 50 modelos de rotores do micro-motor foi usada uma corrente de 200mA para eletrodeposição, obtendo-se uma taxa de velocidade média de $0,5\mu\text{m}/\text{min}$.

Durante e ao final do processo de eletrodeposição, a integridade e o crescimento da estrutura devem ser monitorados, pois a estrutura não deve crescer acima da altura do molde e a sua velocidade média de crescimento (obtida através

desse monitoramento) nunca é conhecida com exatidão. Para esse monitoramento, são usados os equipamentos do LNLS mostrados na Figura 64. A foto da esquerda mostra o microscópio óptico usado para verificação visual da integridade da estrutura. Já a foto da direita mostra o perfilador (“surface profiler”) que mede a geometria e a altura das peças micro-fabricadas. Esse equipamento é usado inúmeras vezes durante o processo de micro-fabricação para monitoramento da altura de crescimento da eletrodeposição.

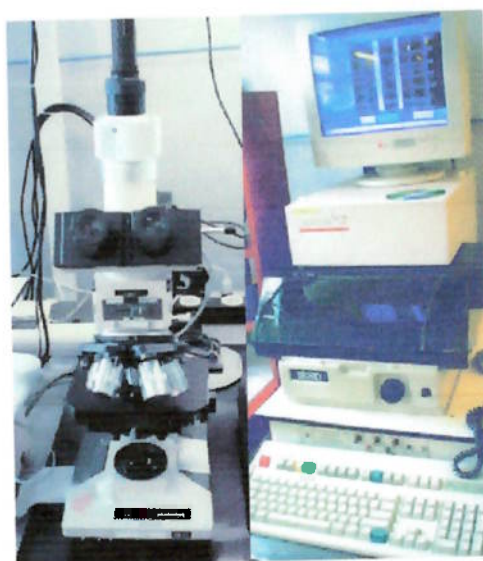


Figura 64 - Equipamentos usados no LNLS para monitoramento das estruturas.

Durante o monitoramento das estruturas dos rotores, observou-se que houve o descolamento de algumas partes do molde de resiste, o que mostra baixa aderência entre o resiste do molde do rotor e o cobre da camada de sacrifício. Quando ocorre esse descolamento, o níquel da eletrodeposição começa a crescer em regiões que deveriam estar cobertas pelo molde de resiste, formando estruturas erradas, como é o caso mostrado na Figura 65. Como pode ser observado na região superior esquerda indicada, o níquel cresceu por baixo do resiste.

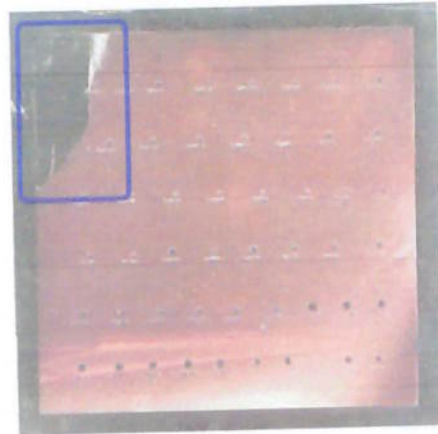


Figura 65 - Resultado de problema de descolamento do molde de resiste na placa da fabricação do rotor.

A solução para esse problema é depositar a camada de sacrifício de cobre após a deposição da camada do molde de resiste, pois a aderência do resiste é melhor na “seed layer”. Dessa forma, retomando a Figura 28 dos fundamentos teóricos de micro-fabricação, os itens (c), (d), (e), (f) e (g) devem ser substituídos pela sequência apresentada pela Figura 66 abaixo, seguindo a mesma lógica apresentada anteriormente.

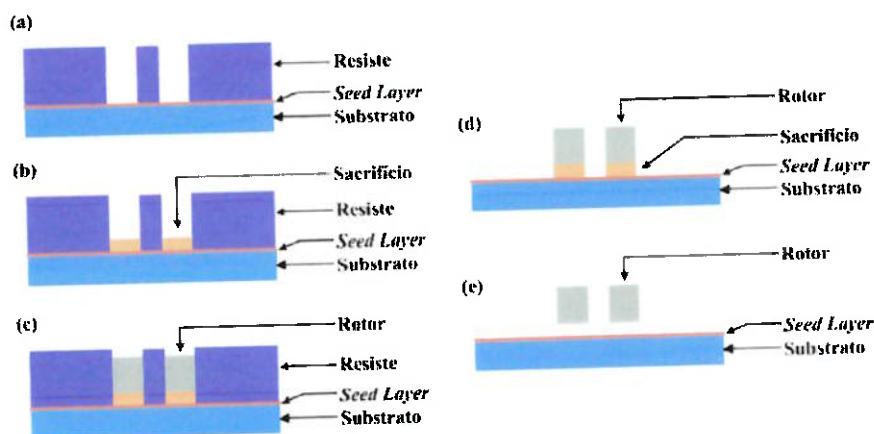


Figura 66 - Nova sequência para micro-fabricação dos rotores.

A Figura 67 mostra a placa do processo de fabricação dos rotores no estágio representado pela Figura 66(d) em uma solução de HF para eliminação da camada de sacrifício e obtenção dos protótipos finalizados dos rotores. A remoção desses rotores é um processo lento de 2 a 3 dias com a ajuda periódica de um aparelho de

ultra-som para facilitar a espalhar a solução nas paredes da micro estrutura da camada se sacrificio.



Figura 67 - Foto da etapa de remoção da camada de sacrificio na nova sequência de fabricação dos rotores

Outro problema encontrado foi a dissolução do resiste SU-8 usado para fazer o molde no conjunto eixo/estator. Segundo site especializado nesse resiste (LORENZ, H. – MIMOTEC), esse é um problema comum ao próprio resiste e de grande ocorrência na literatura, tanto que, peculiarmente, é oferecido um prêmio de 6 mil dólares para quem conseguir resolver o problema de dissolução do SU-8. Esse problema acontece geralmente nas regiões estreitas das estruturas em que a substância de SU-8 fica presa à estrutura e de difícil remoção. Na fabricação dos protótipos dos estatores desse projeto, esse problema ocorreu também nas regiões entre os pólos dos estatores de grande largura, como é mostrado na próxima figura.

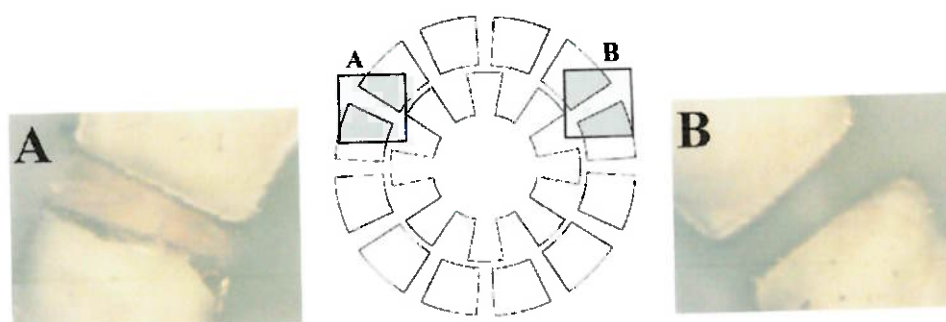


Figura 68 - Problema de dissolução do SU-8 na estrutura do estator s702025.

Como pode ser visto na figura anterior, em um mesmo protótipo de estator, temos a ocorrência desse problema do SU-8 em algumas regiões e a dissolução completa em outras, mostrando a aleatoriedade da ocorrência desse problema: no

caso da região da foto A, temos o aparecimento desse problema e na região da foto B, isso já não ocorre. Embora não seja muito visível na foto A, na região em que o resiste não se dissolveu, a camada de ouro e titânio do “*seed layer*” também não foi removida (por estar encoberta pelo SU-8). Isso representa um grande problema para o protótipo, pois o trecho de “*seed layer*” que restou entre os pólos do estator faz o contato elétrico entre os mesmo, impedindo a aplicação de voltagem elétrica ideal.

Outro problema ocorrido foi a interferência entre o furo do eixo do rotor e o eixo da estrutura do estator. Embora tivesse sido previsto no desenho de CAD da máscara uma folga de 3 microns, foi constatado uma interferência de 4 microns. Esse problema pode ter ocorrido por causa da baixa resolução do fotolito usado ou por causa de possível crescimento irregular do resiste na placa de alumina, gerando um perfil transversal do molde de SU-8 imprevisível que diminuísse o raio do furo do eixo do rotor. Esse problema será melhor estudado em trabalhos futuros.

Por fim, com exceção dos problemas mencionados, as estruturas construídas se apresentaram dentro das especificações de projeto.

A figura abaixo mostra duas etapas da fabricação de um dos tipos de rotores. A primeira foto, mostra a etapa representada pela Figura 28(d), que mostra o molde de resiste do rotor. Já a segunda foto, mostra a etapa representada pela Figura 28(f), que mostra o rotor finalizado ainda preso na camada superficial e no substrato.



Figura 69 - Fabricação do protótipo de rotor r352020g4: à esquerda, o molde e resiste e, à direita, a estrutura de níquel.

A figura a seguir mostra duas etapas da fabricação de um dos tipos de estatores. A primeira foto, mostra a etapa representada pela Figura 25(f), que mostra o molde de resiste do estator (sobre a estrutura da trilha finalizada). Já a segunda foto, mostra a etapa representada pela Figura 25(i), que mostra o estator finalizado.

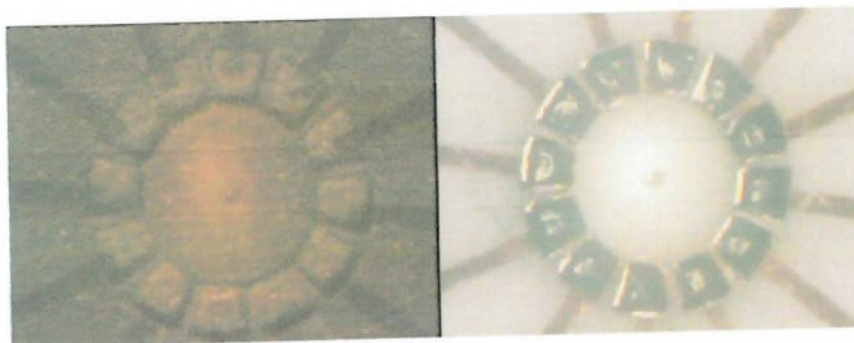


Figura 70 - Fabricação do protótipo de estator s702525: à esquerda, o molde e resiste e, à direita, a estrutura de níquel finalizada sobre a trilha elétrica.

Por fim, a figura abaixo mostra a placa da trilha com o conjunto eixo/estator finalizada, faltando apenas a colocação manual do rotor.

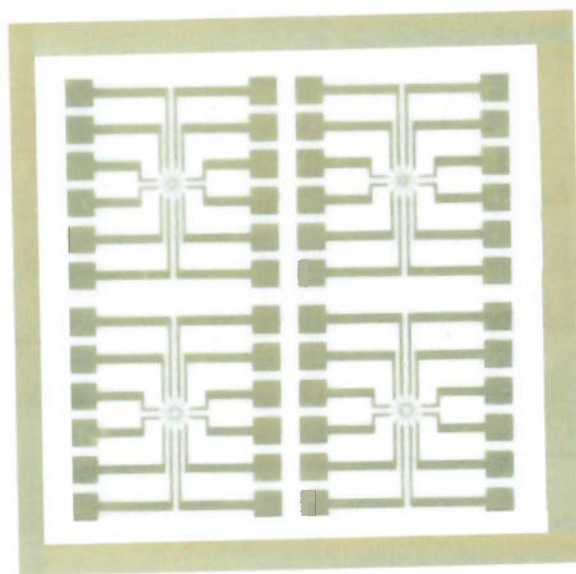


Figura 71 - Foto da placa final da estrutura do motor.

Na figura acima, devido à micro-escala dos motores, não é possível se visualizar as estruturas dos estatores e diferenciá-las. Entretanto, como já havia sido proposto, duas das quatro trilhas mostradas na figura apresentam as estruturas de bushing de ouro. A figura a seguir mostra essa estrutura em uma trilha do modelo t5045b e estator s501015.



Figura 72 - Foto da estrutura do eixo e de bushing da trilha t5045 e do estator s501015.

Após a colocação manual do rotor na placa que contém a trilha e o conjunto eixo/estator, obtemos o micro-motor finalizado, como é mostrado na figura abaixo, que apresenta um estator s501020se e um rotor r401520.

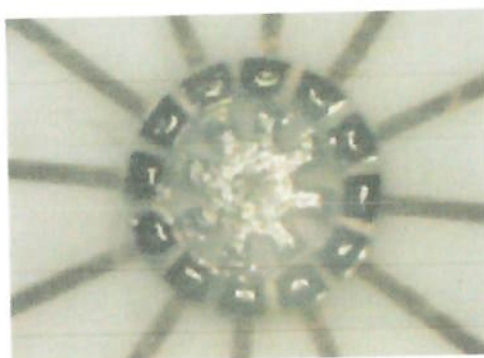


Figura 73 - Foto da estrutura final do micro-motor no caso de estator s501020se e rotor r401520.

Testes genéricos nos protótipos construídos não puderam ser realizados nesse projeto devido ao agendamento rígido dos projetos de fabricação no Laboratório de Micro-Fabricação do LNLS. No entanto, em trabalhos futuros será estudado o funcionamento e a estabilidade desses modelos de micro-motores eletrostáticos.

8. RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Nessa seção são descritos os resultados obtidos e os testes feitos com o software de otimização topológica do rotor do micro-motor desenvolvido por esse projeto. Vale destacar que, como na seção de Implementação Numérica são descritas as características do software desenvolvido, essa seção dedica-se a exclusivamente a resultados.

Inicialmente, para testar a validade dos resultados obtidos, os gradientes usados no método SIMPLEX, desenvolvidos pelo método analítico nos fundamentos teóricos, foram comparados com os gradientes da função objetivo desenvolvidos através do método de diferenças finitas. Em todos os testes a diferença entre os dois gradientes não ultrapassou 2%. Isso confere confiabilidade ao cálculo dos gradientes que representam a principal entrada para a rotina SIMPLEX que é a responsável pela atualização do modelo do material, como foi visto nos Fundamentos Teóricos.

Dessa forma, após alguns testes, modificações e correções no código fonte do software desenvolvido, obtiveram-se os formatos de rotor que são mostrados a seguir. Por apresentarem variação muito baixa na função objetivo após 50 iterações, esses perfis de rotores são considerados otimizados. Entretanto, os métodos de otimização não asseguram que o resultado final obtido seja realmente o melhor resultado, ou seja, o valor máximo da função objetivo fornecido pelo software pode ser um máximo local da função objetivo (como é chamado na literatura) em vez de um máximo global. Essa é uma característica inerente aos métodos de otimização existentes. No entanto, há algumas maneiras de tentar forçar o método de otimização a tentar sair desse máximo local e tentar encontrar um máximo global, embora nenhum desses métodos assegure que o máximo encontrado é local ou global. Um desses métodos, que foi usado nesse projeto, é conhecido como “Método da Continuidade”. Trata-se de usar um valor de penalização menor, como 1, nas primeiras iterações e depois usar o valor de penalização aconselhado (no caso desse projeto, como mencionado nos Fundamentos Teóricos, é igual a 2). Após o uso desse método, obtiveram-se os mesmos formatos de rotores, intensificando os resultados obtidos.

Outro fator que auxilia o processo de otimização que foi implementado nesse software foi um filtro para impedir problemas de “instabilidade xadrez” (ou “checkerboard”, como é conhecido na literatura internacional), como já foi mencionado. Para todos os resultados apresentados a seguir foi usado o filtro nas primeiras 10 iterações do programa. A figura a seguir mostra a diferença que o uso do filtro representa. Isso elimina elementos que possam se isolar dos demais no processo de otimização, resultando muitas vezes em peças de baixa qualidade.

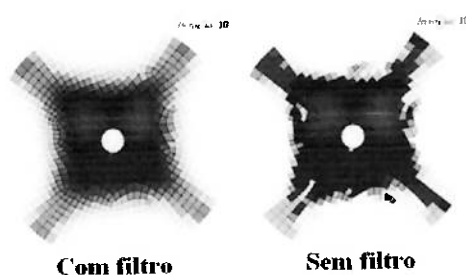


Figura 74 - Diferença do uso do filtro no processo de otimização.

Tendo em vista todas essas considerações, foi testada a otimização topológica do rotor para vários casos de restrição de volume, considerando chute inicial de densidades normalizadas iguais a 1 em toda estrutura (com exceção das densidades que representam o gap entre rotor e estator, como já foi discutido).

Primeiramente, vamos analisar mais detalhadamente o processo de otimização do caso de 50% de volume como restrição. A figura a seguir mostra a situação da otimização durante 50 iterações.

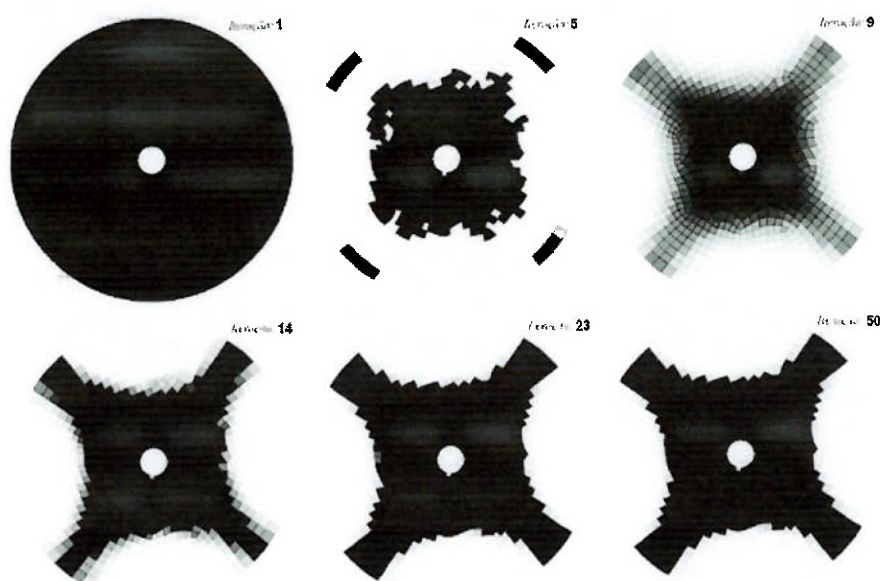


Figura 75 – Formato do rotor do micro-motor durante 50 iterações de otimização.

Da iteração 1 a iteração 4, as densidades dos elementos diminuíram, mas o design do rotor permaneceu o mesmo. Como pode ser observado na figura, a partir da iteração 5, o perfil do rotor começa a se modificar tendendo ao resultado final na iteração 23, que não se modifica até a iteração 50.

A partir do mesmo teste, obtiveram-se os gráficos apresentados na figura a seguir. Note que no gráfico do volume, na iteração 5, o valor do volume se estabiliza, o que significa que a restrição de 50% foi atingida. Isso é mostrado na Figura 75, uma vez que a estrutura do rotor começa a se diferenciar somente na iteração 5. Já os gráficos da função objetivo e da convergência mostram que a partir da iteração 23 não há aumento significativo na função objetivo e a convergência tende a zero, o que significa que ocorreu a convergência matemática do método.

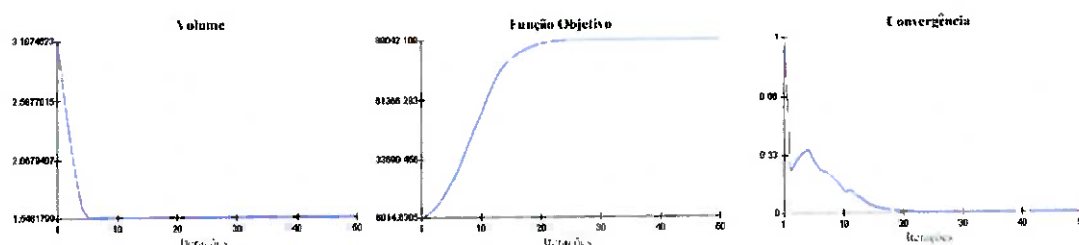


Figura 76 – Gráficos que mostram os resultados da otimização topológica do rotor com restrição de 50% de volume: à esquerda, o volume; ao centro, a função objetivo; e à direita, a convergência.

Dessa forma, foram testados os vários casos de restrição de volume: 90%, 80%, 70%, 60%, 50%, 40%, 30%, 20% e 10%. O resultado final desses testes está apresentado nas figuras abaixo.

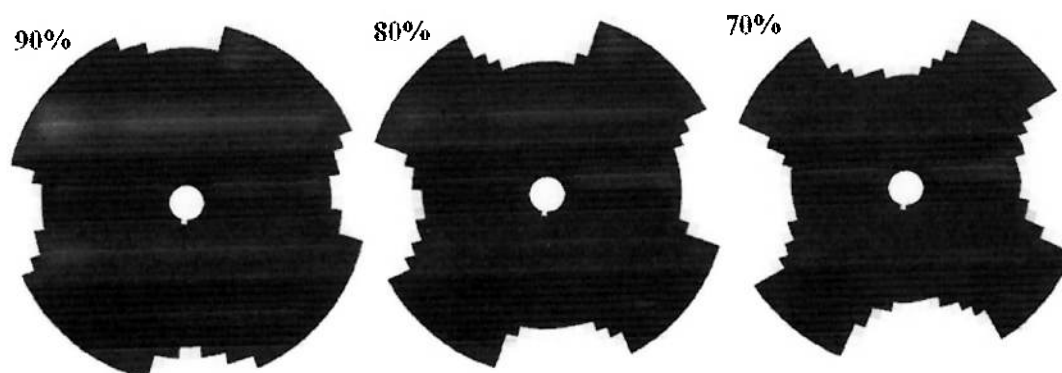


Figura 77 - Rotores otimizados com restrição de volume: 90%, 80% e 70%.

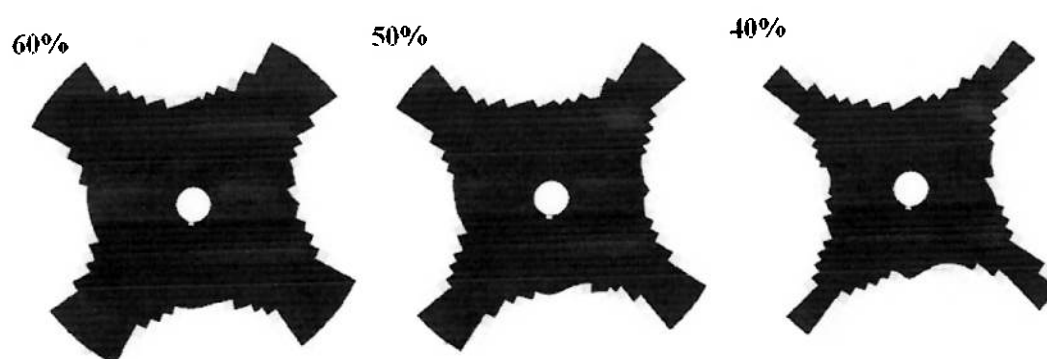


Figura 78 - Rotores otimizados com restrição de volume: 60%, 50% e 40%.

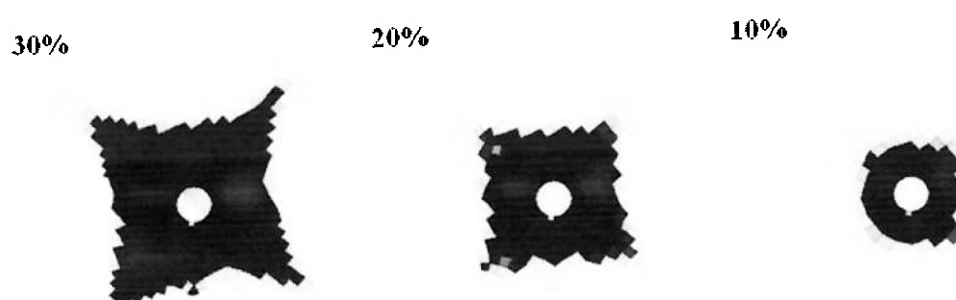


Figura 79 - Rotores otimizados com restrição de volume: 30%, 20% e 10%.

A partir desses resultados é possível se levantar uma curva com os valores finais da função objetivo de cada caso. Essa curva está apresentada na figura a

seguir. Como pode ser observado, a tendência da função objetivo é diminuir o material do motor. Por isso é necessário que haja uma restrição.

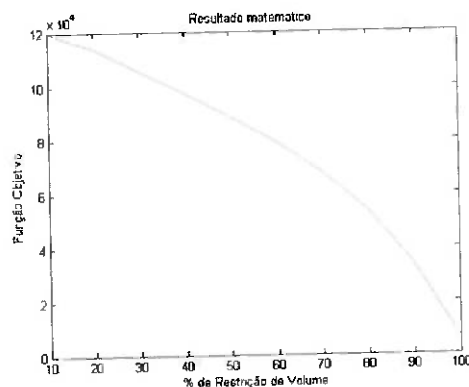


Figura 80 - Valor máximo da função objetivo para cada porcentagem de restrição de volume.

À medida que o valor da função objetivo vai aumentando, o formato do rotor vai diminuindo e perdendo uniformidade e significado físico. A baixo de 30% de restrição, o rotor chega a diminuir seu raio, o que o faria perder muito torque, perdendo sua funcionalidade e inviabilizando o formato otimizado para esses casos.

Dessa forma, o resultado matemático obtido deve ser ponderado fisicamente para que apresente bom rendimento e boa funcionalidade. Portanto, pode-se concluir que o melhor resultado é obtido em torno de 50% de restrição de volume, em que é obtida uma função objetivo alta e o formato do rotor não é comprometido.

9. CONCLUSÃO

O objetivo desse trabalho é o estudo de um projeto otimizado de um micro-motor eletrostático. A partir disso, esse trabalho apresenta três vertentes: implementação de um programa de Otimização Topológica em linguagem C para micro-motores eletrostático; simulação computacional de MEF de um modelo computacional de um micro-motor para estudar a influência dos seus parâmetros de projeto no seu torque final; e desenvolvimento de um projeto de protótipo de micro-motor eletrostático e micro-fabricação de um protótipo do mesmo.

Dessa forma, nesse trabalho foram estudados os fundamentos teóricos do MEF e do MEF eletrostático, conceitos básicos dos micro-motores eletrostáticos e de micro-estruturas MEMS, técnicas de micro-fabricação de micro-motores e técnicas de otimização, com ênfase no Método de Otimização topológica, que foi o principal foco desse trabalho no desenvolvimento de um software para otimização do projeto de um micro-motor. Também foram estudados alguns conceitos de linguagem C que possibilitaram a construção do programa de MOT.

Na parte de simulação computacional através do MEF, foi usado o software comercial ANSYS para criar um modelo com elementos tridimensionais de um conjunto pólo do estator e dente do rotor. A partir desse modelo, realizaram-se várias simulações para diferentes ângulos de alinhamento entre rotor e estator a fim de se compreender melhor a influência de cada parâmetro de projeto do micro-motor no torque desenvolvido do motor. Chegou-se a conclusão que o torque do motor é maior para raio de rotor menor, para *gap* menor e para maior largura dos dentes e dos pólos. Também foram discutidos possíveis problemas de funcionamento para largura de pólos e dentes maior que 15° . Variando a voltagem elétrica aplicada, confirmou-se a dependência quadrática do torque para com a voltagem aplicada no estator, como é mencionado na literatura. Por fim, foi analisado o atrito no micro-motor a partir das simulações de MEF e foram definidas quais regiões do eixo do rotor estão mais sujeitas a desgaste e quais regiões permitem maior coeficiente de atrito sem prejudicar o funcionamento do rotor.

Quanto à parte do projeto de protótipos e sua micro-fabricação, esse projeto contou com o auxílio do Laboratório de Micro-fabricação do LNLS (Laboratório

Nacional Luz Síncrotron). Primeiramente foi criado um método sistemático para desenho dos protótipos do micro-motor em AutoCAD e foram feitas as máscaras para micro-fabricação, levando em consideração toda a teoria de micro-fabricação aplicada a micro-motores e as limitações de fabricação do LNLS. A partir desses desenhos, foram fabricados 50 tipos de protótipos de rotores, 12 protótipos diferentes de estatores e 4 de trilhas elétricas, resultando em 64 combinações para montagem dos protótipos. A fabricação foi, em geral, concluída com sucesso, embora tenham ocorrido alguns problemas. Um desses problemas foi o descolamento do molde de resiste na camada de sacrifício de cobre. Para solucionar esse problema, foi remontada a sequência de fabricação para que o molde de resiste ficasse em contato com a *seed layer* que apresenta maior aderência.

Por fim, também foi desenvolvido nesse projeto um software de otimização para o rotor do micro-motor eletrostático através do Método de Otimização Topológica em linguagem C, que representa o principal foco deste trabalho. Para construir esse software, também foi estudada e desenvolvida toda formulação teórica de MOT para o problema de maximizar o torque do micro-motor. O software foi implementado com sucesso, o que possibilitou que a formulação dos gradientes da sensibilidade fosse comparada com os gradientes calculados por diferenças finitas, resultando em uma diferença inferior a 2%, que comprova seu bom funcionamento. O software desenvolvido possibilita alteração de alguns parâmetros da otimização por parte do usuário, como chutes iniciais, restrição de volume, valor dos limites móveis, método matemático para resolução do problema de MEF (eliminação de Gauss e Gradientes Conjugados) e para imposição de condições de contorno, etc. Foi também desenvolvida uma interface em Flash, usando linguagem ActionScript, para aumentar a interatividade do usuário no programa e facilitar a visualização dos resultados.

Vários testes foram feitos no software desenvolvido buscando encontrar o design ótimo do rotor para torque máximo. Todos os resultados obtidos apresentaram convergência e valor máximo da função objetivo para cada caso. Após analisar as 50 iteração da otimização para vários casos de restrição de volume (de 90% a 10%), observou-se que a tendência desse problema de otimização é retirar material do rotor e, portanto, quanto às restrições de volume baixas apresentaram maiores valores de

função objetivo. No entanto, a porcentagem baixa de volume chegou a descaracterizar o formato do rotor e a diminuir seu raio. Dessa forma, combinando esses dois fatores, chegou-se a conclusão que o perfil ótimo do rotor para esse problema de otimização se encontra na estrutura otimizada em torno de 50% de restrição de volume.

Concluindo, esse projeto tratou do projeto otimizado de um micro-motor eletrostático por várias perspectivas, buscando caracterizá-lo para se descobrir os fatores de maior influência no torque, buscando solucionar possíveis problemas de sua micro-fabricação e, principalmente, desenvolvendo um software baseado em um método matemático e sistemático (que é o MOT) para projeto otimizado de micro-motor, diferenciando-se dos demais projetos encontrados na literatura. Portanto, esse projeto conclui-se com sucesso, caracterizando-se por seu perfil abrangente e de abordagem inovadora no cenário nacional.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS - Sistema HELP do software comercial ANSYS 8.0; Capítulos 5, 14 e 15, 2004.

ANSYS, "Getting Started for Revision 5.1", Swanson Analysis Systems, Inc, Upd0 DN-p511:51, september 30, 1994.

BART, S. F. et al. "Electric Micromotor Dynamics"; Transactions on Electron Devices, IEEE, Vol. 39, No. 3, pp.566-575, janeiro 1992.

BATHE, K. J., "Finite element procedures in Engineering Analysis", Prentice-Hall, Inc., Englewood Clifs, New Jersey, 07632, USA, 1982.

BENDSOE, M. P.; SIGMUND, O.; "Topology Optimization – Theory, Methods and Applications", Springer Ed., 2003.

BERKELEY – UNIVERSITY OF CALIFORNIA: Physicists build world's smallest motor using nanotubes and etched silicon, by Robert Sanders - http://www.berkeley.edu/news/media/releases/2003/07/23_motor.shtml - 22/04/2004.

BYUN, J.; PARK, I.; HAHN, S.; "Topology Optimization of Electrostatic Actuator Using Design Sensitivity" Transactions on Magnetics IEEE, Vol. 38, No. 2, pp. 1053-1056, março de 2002.

CHIEN-HUNG, H.; et al.; "Ultrathick SU-8 mold formations and removal, and its applications to the fabrication of LIGA-like micromotors with embedded roots"; Sensors and Actuators A 102, pp. 130-138, 2002.

DELFINO, F.; ROSSI, M.; "A New FEM Approach for Field and Torque Simulation of Electrostatic Microactuators"; Journal Of Microelectromechanical Systems, IEEE, Vol. 11, No. 4; pp.362-371, 2002

DUFOUR I., et al.; "Simulation of self-control of an electrostatic micromotor for an intravascular echographic system"; Sensors and Actuators A: Physical, Volume 62,

Issues 1-3, Pages 748-751, July 1997

FRANGOULT, A. G.; SUNDARAM, K. B.; "Design and fabrication process for electrostatic side-drive motors"; *Journal of Micromech. Microeng.* 5 – 1995; University of Florida, Orlando, pp. 11-17, EUA, 1994.

INSTITUTE OF ELECTROSTATICS - JAPAN: "Handbook of Electrostatics" Ohm co. (1981)

ISHIHARA, H.; ARAI, F.; FUKUDA, T.; "Micro Mechatronics and Micro Actuators"; *Transactions on Mechatronics, IEEE/ASME*, Vol. 1, No. 1, pp.68-79, março 1996.

JOHANSSON, T.B., et al.; "Technique for finding the optimum geometry of electrostatic micromotors", *Transactions on Industry Applications, IEEE*, Vol. 30, No.4, pp. 912-919, julho de 1994.

KONTARINIS, D. A.; et al.; "A tactile shape sensing and display system for teleoperation," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Nagoya, Japan, pp. 641-646, May 1995.

KUCUKKOMURLER, A.; GARVERICK, S. L.; "Optimized step controller for a salien-pole micromotor"; *Case Western Reserve University, Electrical Engineering and Computer Science, Jounal Of Microelectromechanical Systems, IEEE*, pp.362-366, 2000

LARSEN, K. P.; "Metallic Microstructures on Silicon - Investigation of Reliability Properties of Electroplated Nickel used for Microstructures."; *Tese de Mestrado, Mikroelektronik Centret, Technical University of Denmark, Lyngby, Dinamarca*, October 31, 2001

LEFÈVRE, Y., et al.; "First steps towards design, simulation, modeling and fabrication of electrostatic micromotors"; *Sensors and Actuators*, pp-645-648, 1995.

LORENZ H. - MIMOTEC; "SU-8: A Thick Photo-resist for MEMS" - <http://aveclafaux.freesevers.com/SU-8.html> - Acesso em: 01/12/2004.

MADOU, M. J., "Fundamentals of Microfabrication", CRC Press, EUA, 1997.

MOAVENI, S.; "Finite Element Analysis – Theory and Application with ANSYS", Prentice Hall, New Jersey, 1999.

MOURLAS, N. J., et al.; "Exploring Polysilicon Micromotors for Data Storage Micro Disks"; Case Western Reserve University, Department of Electrical Engineering and Applied Physics, Cleveland, OH, EUA, Journal Of Microelectromechanical Systems, IEEE, pp.198-203, 1996.

MUNFORD, M. L.; PASA, A. A.; "Eletro deposição de filmes finos de cobalto em silício tipo-n monocristalino"; Teste de Mestrado; Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, maio de 1998.

NEUMANN, J. J.; 'MEMS (Microelectromechanical Systems) Audio Devices- Dreams and Realities', Audio Engineering Society Convention paper, 2003.

RAÍ-CHOUDHURY, P.; "MEMS and MOEMS Technology and Applications"; Spie Press; EUA; 2000.

RIBAS, R. P.; 'Microssistemas aplicados(MEMS)' ; Instituto de Informática – UFRGS, 2000.

SERWAY, R. A.; "Física 3 para Cientistas e Engenheiros – Eletricidade, Magnetismo e Ótica", 3ª Edição, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1992.

SILVA, E.C.N., "Apotila de PMR5215 – Otimização aplicada ao projeto de sistemas mecânicos", Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica – USP, São Paulo, 2004.

SILVA, E.C.N., "Capítulo 6 - Introdução ao Método dos Elementos Finitos (MEF)", Mecânica Computacional - PMR-2420, Escola Politécnica – USP, São Paulo, 2003.

SILVA, E.C.N., "Técnicas de Otimização Aplicadas no Projeto de Peças Mecânicas", Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica – USP, São Paulo, 2004.

TAI, Y. C.; "Micromotors"; The Caltech Micromachinig Group, Electrical Engineering, California Institute of Technology; Jounal Of Microelectromechanical Systems, IEEE, pp.8-11, 1995.

TAVROW L.S., BART, S. F., LANG, J. H.; "Operational Characteristics of Microfabricated Electric Motors"; MIT; Transactions on Electron Devices, IEEE, pp.877-881, 1991.

TENDICK,F. ; et al. ; "Applications of micromechatronics in minimally invasive surgery", IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol.3,pp.34-42, March 1998.

UNIVERSITY OF TOKYO: High-power Electrostatic Motor –
http://www.intellect.pe.utokyo.ac.jp/research/es_motor/es_motor_e.html - Acesso em: 22/04/2004.

XINLI W.; SHUMEI C.; SHUKANG C.; "Advantages of Electrostatic Micromotor and Its Application to Medical Instruments"; Dept. of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, China; Jounal Of Microelectromechanical Systems, IEEE, pp. 2466-2468, 2002.

YASSEEN, A. A.; el at.; "Diffraction Grating Scanners Using Polysilicon Micromotors" Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE, Vol. 5, No. 1, pp.75-82, janeiro 1999.

YASSEN, A. A.; el at.; "A Rotary Electrostatic Micromotor 1x 8 Optical Switch", 1999.

APÊNDICE A

Exemplo do Capacitor Simples

Antes de realizar essa simulação no ANSYS, devemos definir seus parâmetros e calcular analiticamente a resposta para que tenhamos uma base de comparação. O capacitor simples que é simulado é um capacitor de duas placas planas paralelas. A formulação teórica desse capacitor já foi mencionada nas eq.(28) e eq.(29).

Assim, podemos definir os parâmetros de nosso modelo de capacitor como sendo $0,5 \text{ C}^2/\text{Nm}^2$ a permissividade do meio ϵ , comprimento L de $0,4\text{m}$, profundidade h como sendo unitária (da mesma forma que é feito no software ANSYS), distância de placas de $0,1\text{m}$ e carga elétrica Q de 170C .

Dessa forma, usando as eq.(28) e eq.(29) temos que o valor de diferença de potencial elétrico deve ser 85V .

Para simular esse capacitor no ANSYS, vamos usar o elemento PLANE121 que é o mesmo elemento eletrostático que será usado para verificar a veracidade da resposta da rotina de MEF desse projeto. Usando esse elemento, foi modelado o capacitor como mostra a figura abaixo tendo os mesmo parâmetros do capacitor calculado anteriormente.

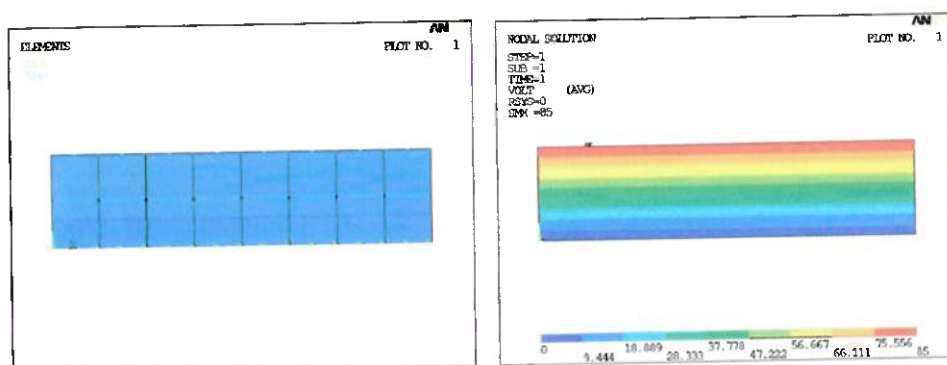


Figura 81 - Exemplo de capacitor simples (à esquerda) e resposta nodal das voltagens (à direita).

Quanto a esse elemento deve-se destacar que a permissividade do material, ε , é que propriedade do elemento deve ser dada de forma relativa a permissividade ε_0 , ou seja, a permissividade do elemento, $PERX$, deve ser dada de acordo com a expressão:

$$PERX = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (71)$$

Resolvendo esse problema de MEF, obteve-se a resposta gráfica mostrada na Figura 81. Como podemos observar, o resultado obtido foi exatamente igual ao resultado analítico (85V), assim, podemos confirmar a veracidade dessa simulação para prosseguir o projeto.

APÊNDICE B

Comparação de Resultados da rotina de MEF com o ANSYS

Para certificar que a rotina de MEF do programa desenvolvido está correta, deve-se primeiro realizar alguns testes somente da parte de MEF do programa desenvolvido e alguns testes no ANSYS (usando o elemento PLANE121, como já foi discutido) para comparar os resultados e confirmar o funcionamento correto da rotina de MEF.

Dessa forma, devemos criar diferentes malhas de elementos finitos com domínios de geometrias diversas e aplicar cargas elétricas em alguns nós e aterrar outros para se fazer a comparação de resultados.

Domínio Quadrado

Nessa segunda comparação, vamos usar um domínio quadrado de MEF com cargas de 40C em 2 pontas do quadrado e restrição de 0V em outra duas pontas, como mostra a figura abaixo.

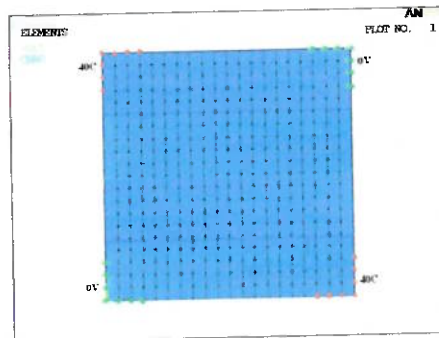


Figura 82 - Malha de MEF quadrada usada nessa comparação.

Resolvendo esse problema em ANSYS e em seguida na rotina de MEF desenvolvida, obtiveram-se as seguintes distribuições de potencial elétrico nodal na malha de finitos.

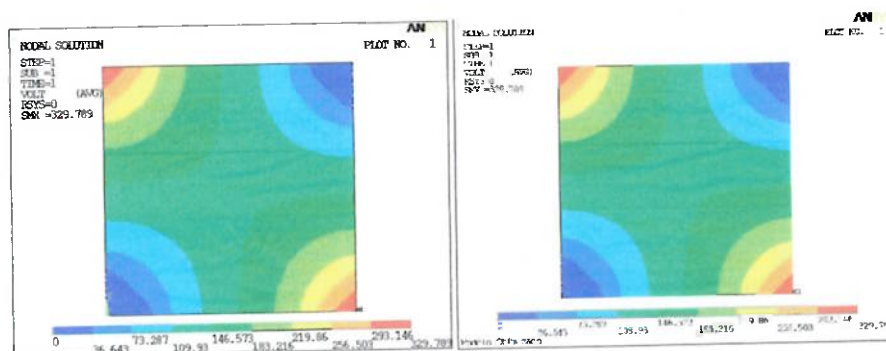


Figura 83 - Resposta de distribuição de potencial elétrico nodal do ANSYS (à esquerda) e resposta do programa de MEF (à direita).

Comparando os valores de potencial elétrico máximo nas duas respostas, obtemos que ambas cedem o valor de 329.789V. Dessa forma, temos que o programa de MEF desenvolvido também está correto na análise do domínio viável.

Domínio do Micro-motor Eletrostático

Nessa comparação, temos o mesmo domínio que será analisado na otimização do micro-motor eletrostático, que é um domínio parecido com o domínio circular com um furo no meio para ser o eixo do rotor. As cargas elétricas e as restrições são iguais às aplicadas no exemplo do domínio circular, como pode ser visto na figura abaixo.

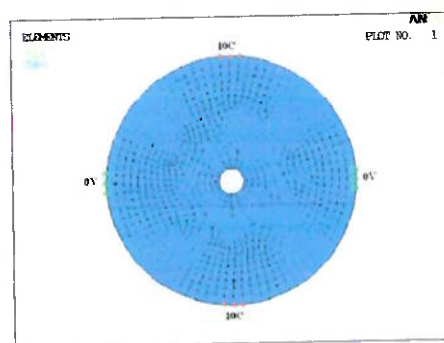


Figura 84 - Malha de MEF triangular usada nessa comparação.

Esse problema foi resolvido no ANSYS e no programa de MEF. A seguir são mostrados os resultados obtidos.

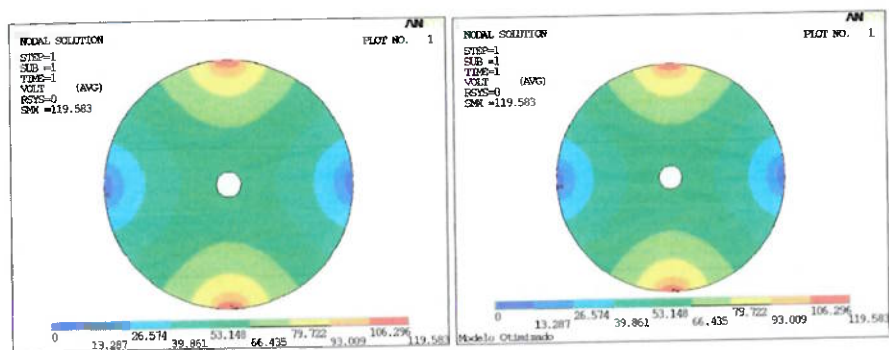


Figura 85 - Resposta de distribuição de potencial elétrico nodal do ANSYS (à esquerda) e resposta do programa de MEF (à direita).

Como pode ser observado, não somente a distribuição de potenciais é igual, como também o valor máximo de 119.583V.

Uma vez tendo os resultados obtidos como corretos, pode-se, portanto, prosseguir com essa rotina para se construir o programa de otimização, que será tema da segunda parte desse trabalho.

representar os eletrodos do caso A, define-se 0V e 10C para seus eletrodos e, para representar o caso B, define-se 5V e 15C, como é mostrado na figura a seguir. Esses valores não têm significado além de marcarem os nós que receberam os valores corretos de voltagem, ou carga elétrica, pelo próprio software de otimização.

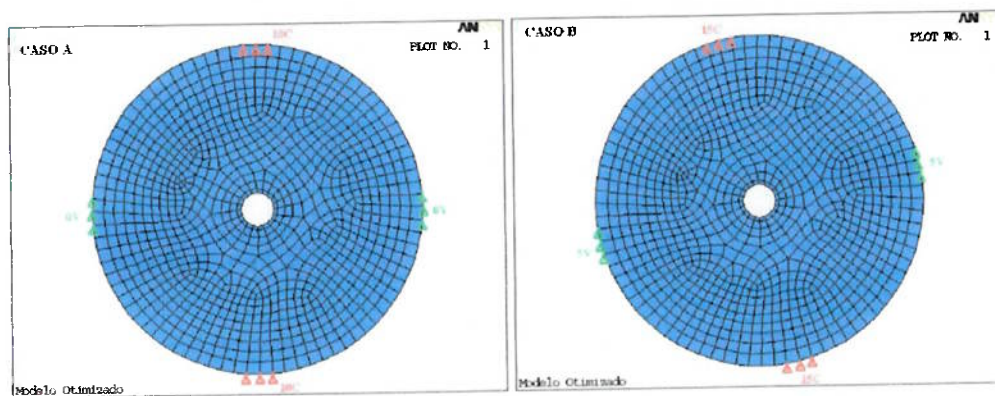


Figura 87 - Imposição de voltagem e carga elétrica padronizada para o caso A (à esquerda) e para o caso B (à direita).

O segundo fator a ser padronizado é a marcação dos elementos que representam o *gap*. Isso se faz necessário, pois esses elementos terão sua densidade normalizada fixa durante o processo de otimização (pois tem a mesma permissividade do ar), o que significa que esses elementos fazem parte da malha de finitos para a rotina de MEF, mas não entram no cálculo da otimização na parte de MOT do software desenvolvido.

Primeiramente, deve-se ressaltar que essa padronização deve ser feita antes da imposição das condições de contorno no ANSYS, mostrado anteriormente. Para que o software de otimização reconheça os elementos que fazem parte do *gap*, estes elementos devem ser numerados sequencialmente depois dos elementos que constituem o material do rotor e devem ter numeração 2 de tipo de elemento. Isso significa que após a criação dos elementos do rotor no ANSYS, deve-se criar os elementos do *gap* (garantindo a sequência mencionada) e usando outro tipo de elemento (garantindo a numeração dele). Somente dessa forma a malha criada pelo ANSYS será interpretada corretamente pelo software de otimização desenvolvido.

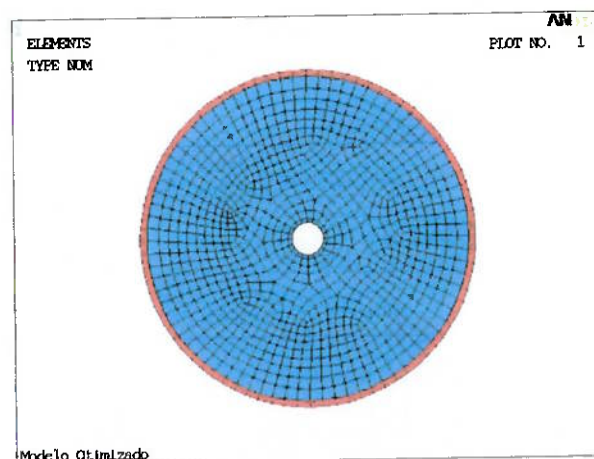


Figura 88 - Malha do ANSYS com distinção por cor dos tipos de elementos diferentes.

Por fim, deve-se fazer uma consideração final quanto à malha de elementos finitos do ANSYS. Foram feitos 5 testes na rotina de MEF do programa, comparando seus resultados com os do ANSYS, para saber certificar a validade dos resultados quanto à variação do número de elementos. Dessas 5 simulações, 4 foram em malhas circulares similares à malha usada pelo programa de otimização desenvolvido e uma simulação com uma malha quadrada. Essas malhas são se diferenciam pela qualidade de refinamento de sua discretização:

- Malha D - 908 elementos
- Malha C - 2373 elementos
- Malha B - 4636 elementos
- Malha A - 7571 elementos
- Malha quadrada - 5929 elementos

Nas malhas circulares A e D, obteve-se resultado correto enquanto que nas malhas B e C obteve-se resposta errada. Dessa forma, podemos concluir que o erro não é causado diretamente pelo aumento da discretização. Entretanto, vale ressaltar que o ANSYS, em seu MESH, pode criar malhas de finitos com elementos distorcidos. Para resolução desses elementos, o ANSYS usa métodos específicos, no entanto, a rotina desenvolvida não tem capacidade de solucionar esse problema. Essa conclusão é fortificada pela simulação da malha quadrada, que apresenta um número próximo da malha B, mas tem todos os elementos de formato quadrado.

Então, nesse caso, analisando novamente as malhas de finitos, no caso da malha D, todos os elementos têm formato similar, embora sejam grandes. Nas malhas C e B, existem elementos com formato triangular (onde dois nós do elemento quadrangular coincidem em um único nó do elemento de formato triangular). Na malha A, como os elementos são menores, essa distorção também não acontece.

Portanto, conclui-se que os erros da rotina de MEF implementada são causados pela existência de elementos de formato triangular. Portanto, para o funcionamento correto do programa desenvolvido, deve-se impor restrições no MESH do ANSYS para que não sejam criados esses elementos.

ANEXO A

Rotina de MATLAB para construção do modelo do projeto do motor em ANSYS

Essa rotina de MATLAB foi usada para construção do modelo de Elementos Finitos de um par de dente do rotor e pólo do estator no software comercial ANSYS. Essa rotina gera um arquivo em ADPL (linguagem de modelagem do ANSYS) para simulação computacional do micro-motor.

(código completo entregue em CD durante a apresentação)

ANEXO B

Software de otimização do micro-motor eletrostático desenvolvido em linguagem C

Nesse anexo está contido todo código fonte do software desenvolvido nesse projeto para otimização do design do rotor de um micro-motor eletrostático 16:4. O fluxograma de arquivos de entrada e saída desse software está apresentado na seção de Implementação Numérica.

(código completo entregue em CD durante a apresentação)

ANEXO C

Rotina de MATLAB para entradas do software de otimização

Nesse anexo está contida a rotina de MATLAB usada para gerar a entrada do software de otimização desenvolvido (contido no ANEXO B), de acordo com o explicado na seção de implementação numérica.

(código completo entregue em CD durante a apresentação)

ANEXO D

Tabela de Excel com parâmetros dos protótipos

Essa tabela contém as informações da geometria dos protótipos fabricados nesse projeto, juntamente com sua nomenclatura. Quando exportada em TXT essa tabela é entrada para rotina de MATLAB do ANEXO E.

Caso	Estator			Rotor			Gap	Relação Estator/Rotor	
	Raio externo	pólo		Raio	dente			Nomenclatura	
		altura	largura		altura	largura		Estator	Rotor
1	750	250	20	496	250	20	4	s752520	r502520g4
2	750	250	20	496	250	25	4	s752520	r502525g4
3	750	250	20	496	200	20	4	s752520	r502020g4
4	750	250	20	496	200	25	4	s752520	r502025g4
5	750	200	25	546	250	20	4	s752025	r552520g4
6	750	200	25	546	250	25	4	s752025	r552525g4
7	750	200	25	546	250	30	4	s752025	r552530g4
8	750	200	25	546	200	20	4	s752025	r552020g4
9	750	200	25	546	200	25	4	s752025	r552025g4
10	750	200	25	546	200	30	4	s752025	r552030g4
11	750	150	25	596	200	20	4	s751525	r602020g4
12	750	150	25	596	200	25	4	s751525	r602025g4
13	750	150	25	596	200	30	4	s751525	r602030g4
14	700	250	20	446	200	20	4	s702520	r452020g4
15	700	250	20	446	200	25	4	s702520	r452025g4
16	700	250	20	446	150	20	4	s702520	r451520g4
17	700	250	20	446	150	25	4	s702520	r451525g4
18	700	250	25	446	200	20	4	s702525	r452020g4
19	700	250	25	446	200	25	4	s702525	r452025g4
20	700	250	25	446	200	30	4	s702525	r452030g4
21	700	250	25	446	150	20	4	s702525	r451520g4
22	700	250	25	446	150	25	4	s702525	r451525g4
23	700	250	25	446	150	30	4	s702525	r451530g4
24	700	250	25	442	200	20	8	s702525	r452020g8
25	700	250	25	442	200	25	8	s702525	r452025g8
26	700	250	25	442	200	30	8	s702525	r452030g8
27	700	200	25	496	150	20	4	s702025	r501520g4
28	700	200	25	496	150	25	4	s702025	r501525g4
29	700	200	25	496	150	30	4	s702025	r501530g4
30	500	150	15	346	200	15	4	s501515	r352015g4
31	500	150	15	346	200	20	4	s501515	r352020g4
32	500	150	15	346	200	25	4	s501515	r352025g4
33	500	150	15	346	150	15	4	s501515	r351515g4
34	500	150	15	346	150	20	4	s501515	r351520g4

35	500	150	15	346	150	25	4	s501515	r351525g4
36	500	150	20	346	200	15	4	s501520	r352015g4
37	500	150	20	346	200	20	4	s501520	r352020g4
38	500	150	20	346	200	25	4	s501520	r352025g4
39	500	150	20	346	150	15	4	s501520	r351515g4
40	500	150	20	346	150	20	4	s501520	r351520g4
41	500	150	20	346	150	25	4	s501520	r351525g4
42	500	150	15	342	150	15	8	s501515	r351515g8
43	500	150	20	342	150	20	8	s501520	r351520g8
44	500	150	20	342	150	25	8	s501520	r351525g8
45	500	100	20	396	150	20	4	s501020	r401520g4
46	500	100	20	396	150	25	4	s501020	r401525g4
47	500	100	20	396	150	30	4	s501020	r401530g4
48	500	100	20	396	100	20	4	s501020	r401020g4
49	500	100	20	396	100	25	4	s501020	r401025g4
50	500	100	20	396	100	30	4	s501020	r401030g4
51	500	100	25	396	150	20	4	s501025	r401520g4
52	500	100	25	396	150	25	4	s501025	r401525g4
53	500	100	25	396	150	30	4	s501025	r401530g4
54	500	100	25	396	100	20	4	s501025	r401020g4
55	500	100	25	396	100	25	4	s501025	r401025g4
56	500	100	25	396	100	30	4	s501025	r401030g4
57	500	100	20	392	100	20	8	s501020	r401020g8
58	500	100	20	392	100	25	8	s501020	r401025g8
59	500	100	25	392	100	25	8	s501025	r401025g8
60	500	100	25	392	100	30	8	s501025	r401030g8
61	450	150	20	296	100	20	4	s451520	r301020g4
62	450	150	20	296	100	25	4	s451520	r301025g4
63	450	150	20	292	100	20	8	s451520	r301020g8
64	450	150	20	292	100	25	8	s451520	r301025g8

ESPECIAIS:

Estator com bushing de 3 pinos

65	500	100	20	396	150	20	4	s501020b3	r401520g4
66	500	100	20	396	150	25	4	s501020b3	r401525g4
67	500	100	20	396	150	30	4	s501020b3	r401530g4
68	500	100	20	396	150	20	4	s501020b3	r401520g4
69	500	100	20	396	150	25	4	s501020b3	r401525g4
70	500	100	20	396	150	30	4	s501020b3	r401530g4

Estator sem eixo

71	500	100	20	396	150	20	4	s501020se	r401520g4
72	500	100	20	396	150	25	4	s501020se	r401525g4
73	500	100	20	396	150	30	4	s501020se	r401530g4
74	500	100	20	396	150	20	4	s501020se	r401520g4
75	500	100	20	396	150	25	4	s501020se	r401525g4
76	500	100	20	396	150	30	4	s501020se	r401530g4

Rotor de 4 dentes

77	500	100	25	396	150	25	4	s501025	r401525g4d
78	500	100	25	396	150	30	4	s501025	r401530g4d
79	500	100	25	396	150	35	4	s501025	r401535g4d

ANEXO E

Rotina de MATLAB para gerar arquivo em AutoLISP dos desenhos do micro-motor

Essa rotina de MATLAB gera um arquivo TXT na linguagem AutoLisp (linguagem própria do AutoCAD), para modelagem do projeto dos protótipos de micro-motores desse trabalho, de acordo com os parâmetros da tabela apresentado no ANEXO D.

(código completo entregue em CD durante a apresentação)

ANEXO F

Sub-rotina de MATLAB para gerar arquivo em ActionScript para interface

Essa rotina da MATLAB é chamada pela rotina apresentada no ANEXO C e gera um arquivo TXT em linguagem ActionScript 2.0 (linguagem para implementações em Flash), para construção de parte da interface do software desenvolvido.

(código completo entregue em CD durante a apresentação)