



Natália de Lourdes Costa

**Um Estudo de Otimização de um Acelerômetro
Micro-Eletro-Mecânico Capacitivo**

São João del-Rei
Dezembro de 2017

Natália de Lourdes Costa

Um Estudo de Otimização de um Acelerômetro Micro-Eletro-Mecânico Capacitivo

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenadoria do Curso de Matemática, da Universidade Federal de São João del-Rei, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Matemática.

Orientador: Prof. Carlos Alberto da Silva Junior

São João del-Rei, _____ de _____ de _____

Banca Examinadora

Orientador: Prof. Carlos Alberto da Silva Junior

Prof(a) Dra. Andreza Cristina Beezão Moreira

Prof. Dr. Angelo Passaro

São João del-Rei
Dezembro de 2017

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus, que está sempre presente em minha vida, guiando meus passos.

Agradeço de forma especial aos meus pais, por me apoiarem incondicionalmente, e por serem a principal razão de eu seguir meus objetivos. Não poderia deixar de agradecer a meu irmão Wilson, que é sempre meu parceiro e amigo, quem está sempre comigo, me ajudando e apoiando da forma que só ele é capaz. Agradeço à minha avó, por sempre se preocupar, com aquele carinho que é próprio das avós, sempre perguntando se eu precisava de algo e me ajudando para que eu me dedicasse aos estudos.

Gostaria de agradecer também ao professor Carlos pela orientação deste trabalho, por se preocupar e ajudar com cada detalhe, além de toda a paciência e compreensão em cada momento que precisei. Também agradeço aos professores Andreza e Angelo, por aceitarem contribuir com este trabalho, enriquecendo-o com seus conhecimentos e experiências.

Cada pessoa que passa por nossas vidas nos marcam, deixando um pedaço delas em nós e levando um pouco de nós com elas. Não poderia ser diferente com todos os meus colegas de curso, que sempre estão presentes, me ouvindo de forma atenciosa e incentivando sempre. Agradeço a todos que fizeram parte de minha caminhada, contribuindo com meu crescimento pessoal e acadêmico. Agradeço por fim, de forma especial, a todos os meus amigos, do curso ou não, que contribuíram de forma efetiva com este trabalho.

“ Se assumirmos que chegamos à verdade absoluta, nós paramos de procurar, nós paramos de desenvolver. ”

— JOCELYN BELL BURNELL

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo de otimização de um Acelerômetro Micro-Eleto-Mecânico Capacitivo através da investigação das consequências da mudança dos parâmetros peso da função objetivo, juntamente com um estudo do parâmetro Gap vertical entre eletrodos e massa móvel, visando contribuir com estudos e desenvolvimento de dispositivos MEMS (microsistemas eletromecânicos). Para isto foram utilizadas as Meta-Heurísticas *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Black Hole* (BH), *Simulated Annealing* (SA) e *Evolutionary Algorithms* (EA). São apresentados aqui os resultados obtidos com relação aos parâmetros da função objetivo e do parâmetro Gap, em cada versão de função objetivo utilizada.

Palavras-chave: Meta-Heurísticas, Microcelerômetro, MEMS, Otimização.

Lista de Figuras

1.1	Previsão de Demanda de Mercado de dispositivos MEMS até 2022. Fonte: Yole Développement (Adaptada). {Disponível em < http://www.yole.fr/ >, acesso em 29 de junho de 2017.}	10
2.1	Representação do microacelerômetro como sistema massa-mola amortecido	12
2.2	Ilustração da geometria da estrutura mecânica do acelerômetro, com vista frontal da massa móvel	14
2.3	Ilustração da geometria da estrutura mecânica do acelerômetro, com vista lateral da massa móvel	14
2.4	Diagrama básico do acelerômetro capacitivo utilizado no trabalho de Zhou (ZHOU et al., 2014). (a) Esquema da estrutura do acelerômetro. (b) Esquema do corte transversal do acelerômetro.	17
2.5	Diagrama básico do acelerômetro capacitivo utilizado no trabalho de Kar (KAR et al., 2013).	18
2.6	Diagrama básico do acelerômetro capacitivo utilizado no trabalho de Chen (CHEN; HUANG, 2017).	18

Lista de Tabelas

2.1	Dados do Microacelerômetro de Referência	15
2.2	Variação dos pesos das parcelas da função objetivo	19
2.3	Restrições impostas ao problema	21
2.4	Limite das variáveis independentes do problema de otimização	22
3.1	Pseudocódigo para S-Metaheurísticas	25
3.2	Pseudocódigo para a S-Metaheurística Simulated Annealing	26
3.3	Pseudocódigo para P-Metaheurísticas	27
3.4	Pseudocódigo para os Algoritmos Evolucionários	28
3.5	Pseudocódigo para o PSO	29
3.6	Parâmetros de Entrada	31
3.7	Resultados obtidos (BH) - Primeira Versão da Função Objetivo	32
3.8	Resultados obtidos (PSO e BH) - Segunda Versão da Função Objetivo	33
3.9	Resultados obtidos (BH e SA) - Terceira Versão da Função Objetivo	34
3.10	Resultados obtidos (BH) - Quarta Versão da Função Objetivo	35
3.11	Porcentagem de Resultados Viáveis por Meta-heurística	35

Lista de Símbolos

A_m	Área da face da massa móvel normal ao eixo z
a_z	Aceleração no eixo z
a_{zlc}	Aceleração linear de corte
a_{zlcmin}	Aceleração mínima no eixo z
d_{lb}	Distância de recuo da viga
d_{lbmax}	Distância máxima de recuo da viga
d_{lbmin}	Distância mínima de recuo da viga
F_l	Frequência linear limite em Hertz
F_{lmin}	Frequência linear mínima em Hertz
f_n	Frequência natural mecânica em Hertz
h_0	Gap vertical entre eletrodos fixos e massa móvel
h_{0max}	Gap máximo entre eletrodos fixos e massa móvel
h_{0min}	Gap mínimo entre eletrodos fixos e massa móvel
l_b	Comprimento da viga
l_{bmax}	Comprimento máximo da viga
l_{bmin}	Comprimento mínimo da viga
L_m	Largura da massa móvel
p	Pressão do fluido
p_{best}	Melhor posição conhecida por uma partícula
p_{max}	Pressão máxima
p_{min}	Pressão mínima
$rand1$	Número randômico
$rand2$	Número randômico
R_z	Número de Reynolds modificado (componente na direção z)
S_E	Sensibilidade elétrica
S_{EM}	Sensibilidade eletromecânica
S_{EMN}	Sensibilidade eletromecânica normalizada
S_M	Sensibilidade mecânica
T	Temperatura absoluta
T_0	Temperatura de referência
t_b	Espessura da viga

t_{bmax}	Espessura máxima da viga
t_{bmin}	Espessura mínima da viga
T_d	Comprimento do dispositivo
T_{dmax}	Comprimento máximo do dispositivo
T_{dN}	Tamanho total do dispositivo normalizado
t_m	Espessura da massa móvel
t_{max}	Espessura máxima da massa móvel
t_{min}	Espessura mínima da massa móvel
V_s	Tensão elétrica de alimentação
w_b	Largura da viga
w_{bmax}	Largura máxima da viga
w_{bmin}	Largura mínima da viga
w_{gap}	Largura do gap lateral
w_{gap1}	Distância entre massa móvel e viga
$w_{gap1max}$	Distância máxima entre massa móvel e viga
$w_{gap1min}$	Distância mínima entre massa móvel e viga
w_{gap2}	Distância entre estrutura de sustentação e viga
$w_{gap2max}$	Distância máxima entre estrutura de sustentação e viga
$w_{gap2min}$	Distância mínima entre estrutura de sustentação e viga
w_m	Comprimento da massa móvel
w_{mmax}	Comprimento máximo da massa móvel
w_{min}	Comprimento mínimo da massa móvel
w_{rim}	Largura da estrutura de sustentação
w_{rimmax}	Largura máxima da estrutura de sustentação
w_{rimmin}	Largura mínima da estrutura de sustentação
w_{rimp}	Comprimento da borda plana da estrutura de sustentação, paralela as faces de contato dos eletrodos
z	Deslocamento no eixo z
ϵ_0	Permissividade elétrica no vácuo
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa do ar
σ_{adm}	Tensão normal máxima admissível
σ_{max}	Tensão normal máxima
ω	Frequência angular
ω_c	Frequência angular de corte
ω_{c0}	Frequência angular de corte otimizada
ω_{cN}	Frequência angular de corte normalizada
ω_n	Frequência natural angular

Sumário

1	Introdução	10
2	Contextualização	12
2.1	O Acelerômetro Micro-Eletro-Mecânico Capacitivo	12
2.2	O Modelo	13
2.3	O gap - panorama	16
2.4	O Problema	19
2.4.1	Restrições e limites impostos ao problema	20
3	Otimização do Acelerômetro Capacitivo	24
3.1	Meta-heurísticas	24
3.2	Meta-heurísticas Baseadas em Solução Única	24
3.2.1	Recozimento Simulado (Simulated Annealing - SA)	25
3.3	Meta-heurísticas Baseadas em População	26
3.3.1	Algoritmos Evolucionários	27
3.3.2	Inteligência de Partículas	28
3.3.3	Nuvem de Partículas - Particle Swarm Optimization (PSO)	29
3.3.4	Buraco Negro - Black Hole	30
3.4	Otimização	31
3.5	Resultados	32
4	Considerações Finais	37
	Referências	39

Capítulo 1

Introdução

Microsistemas Eletromecânicos, mais conhecidos pela sigla em inglês MEMS (*Micro-Electrical-Mechanical Systems*), fazem parte de uma tecnologia que permite a criação de dispositivos eletromecânicos em escala microscópica utilizando técnicas de fabricação utilizadas em microeletrônica (RODRIGUES et al., 2011).

De acordo com (SILVA, 2015), desde que se estabeleceu, em meados da década de 90, a indústria de microdispositivos e o setor de mercado relacionado às tecnologias MEMS vem ganhando força, estando em constante crescimento nos últimos anos, sendo que o setor de mercado que mais impulsiona este crescimento é o setor automotivo. Porém, outros setores como o mercado de sistemas e plataformas móveis de comunicação (*smartphones*) e entretenimento (*videogames*), por exemplo, também mantém a indústria MEMS em expansão. Outras aplicações de dispositivos MEMS podem ser encontradas na medicina, em tecnologias envolvendo realidade virtual (CALACHE, 2013), entre outros. Como pode ser visto na Figura 1.1, a demanda de mercado da indústria de dispositivos MEMS prevê um crescimento mundial para os próximos anos, movimentando bilhões de dólares (de acordo com grupo Yole Développement).

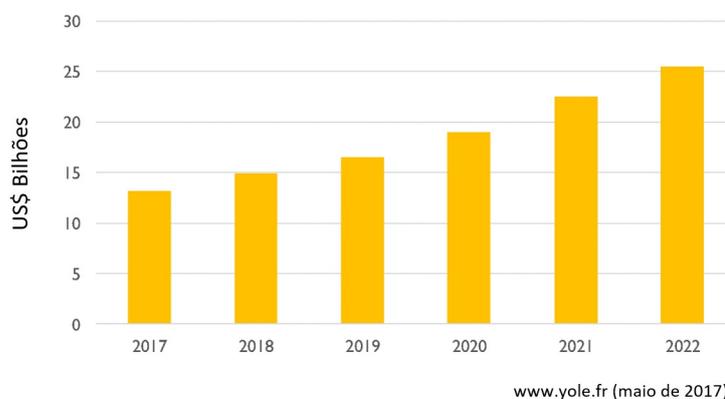


Figura 1.1: Previsão de Demanda de Mercado de dispositivos MEMS até 2022. Fonte: Yole Développement (Adaptada). {Disponível em <<http://www.yole.fr/>>, acesso em 29 de junho de 2017.}

Sensores e dispositivos MEMS também são utilizados em navegação de veículos aeroespaciais, que possuem uma grande importância para o Brasil, principalmente nos setores econômicos, técnico-científicos e militares. Porém, barreiras tecnológicas impedem um total acesso a sensores e dispositivos MEMS de alta performance. Sendo assim, foi criado o projeto Acelerômetro de Alto Desempenho (ACELERAD), buscando o desenvolvimento de tais dispositivos em território nacional (SILVA, 2015). No contexto deste projeto, foi desenvolvido um acelerômetro capacitivo utilizando-se a tecnologia MEMS. Visando propor melhorias no projeto e no desempenho deste acelerômetro, Silva (SILVA, 2015) apresentou uma proposta de otimização para o mesmo. Considerando que o seu trabalho é a principal referência aqui utilizada, e que será citado em muitos momentos no decorrer deste trabalho, iremos nos referenciar à ele somente como Silva daqui em diante.

Considerando a importância das tecnologias MEMS nos vários setores aqui citados, atrelada à demanda deste mercado em expansão, temos um estímulo ao estudo destes dispositivos, bem como à procura de melhorias nos modelos já existentes. Sendo assim, o objetivo deste trabalho de conclusão de curso é contribuir com os estudos e desenvolvimento de sensores e dispositivos MEMS, através de um novo tratamento na otimização do acelerômetro micro-eleto-mecânico realizada por Silva. Esta contribuição se dará através da investigação das consequências da mudança dos parâmetros peso da função objetivo, além de um estudo mais detalhado do parâmetro Gap vertical entre eletrodos e massa móvel.

A organização deste trabalho se dará da seguinte forma:

O capítulo 1 contém a introdução, onde é feita uma breve introdução aos dispositivos MEMS, sua indústria e mercado. Além disto, são expostos também o objetivo e a motivação deste trabalho.

No capítulo 2 é apresentada a descrição do Acelerômetro Micro-Eleto-Mecânico Capacitivo e a formulação do problema proposto por Silva; além de uma revisão bibliográfica da literatura relacionada ao tema do trabalho.

No capítulo 3 é apresentado um breve resumo de alguns algoritmos de otimização, entre eles o Nuvem de Partículas (PSO) e Buraco Negro (BH), e são apresentados os resultados obtidos.

Por fim, no capítulo 4 são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho.

Capítulo 2

Contextualização

2.1 O Acelerômetro Micro-Eleto-Mecânico Capacitivo

Acelerômetros micro-eleto-mecânicos são dispositivos que detectam acelerações pelo movimento de uma massa móvel posicionada entre duas placas paralelas, suspensas por vigas flexíveis. Este sistema funciona como um sistema massa-mola amortecido, sendo que as vigas flexíveis representam a mola, e a massa móvel representa a massa. Esta representação como um sistema massa-mola pode ser vista na Figura 2.1, onde V_s é a tensão elétrica de alimentação.

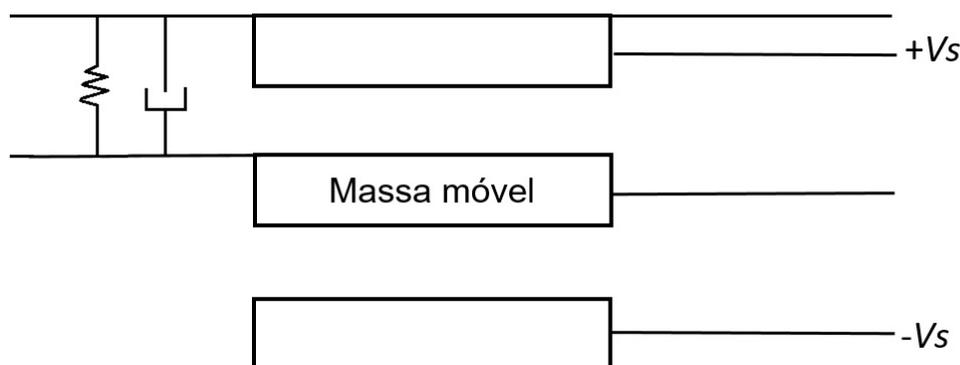


Figura 2.1: Representação do microacelerômetro como sistema massa-mola amortecido

O Acelerômetro Micro-Eleto-Mecânico Capacitivo tratado por Silva em seu trabalho foi desenvolvido dentro do projeto Acelerômetro de Alto Desempenho (ACELERAD) com a tecnologia de Sistemas Micro-Eleto-Mecânicos (*Micro-Electro-Mechanical Systems* – MEMS). O projeto ACELERAD foi desenvolvido e financiado pela FINEP e visa um produto com aplicações em sistemas aeroespaciais.

Silva apresentou a utilização de técnicas de otimização baseadas em meta-heurísticas com o objetivo de propor melhorias no projeto original do Acelerômetro Micro-Eleto-Mecânico Capacitivo aqui citado. Meta-heurísticas são algoritmos estocásticos que buscam uma boa solução para o problema de otimização (TALBI, 2009). No trabalho de Silva foram utilizadas duas meta-heurísticas: Nuvem de Partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO) (KENNEDY; EBERHART, 1995) e Buraco Negro (*Black-Hole* – BH) (ZHANG et al., 2008). Nesse trabalho, além dessas, também serão utilizadas as meta-heurísticas Recozimento Simulado (*Simulated Annealing* – SA) e Algoritmos Evolucionários (*Evolutionary Algorithms* – EA). Uma descrição destes métodos se encontra no capítulo 3 deste trabalho.

Para a implementação computacional do problema de otimização utilizando-se as meta-heurísticas citadas, foi utilizado o *framework* de otimização LOF-MH ¹ desenvolvido no Laboratório de Engenharia Virtual (LEV) do Instituto de Estudos Avançados (IEAv) (WAKIM, 2017).

2.2 O Modelo

Um acelerômetro micro-eleto-mecânico capacitivo detecta a aceleração por meio do movimento de uma massa móvel posicionada entre duas placas paralelas e suspensa por vigas flexíveis mecanicamente engastadas. O movimento da massa móvel é detectado como uma diferença de valor de capacitância entre as placas, e então é convertido para um sinal elétrico de tensão. Ilustrações da estrutura mecânica deste dispositivo podem ser vistas nas Figuras 2.2 e 2.3.

¹Disponível em:
<http://www.ieav.cta.br/efa/lev/projeto/lof-mh/>.

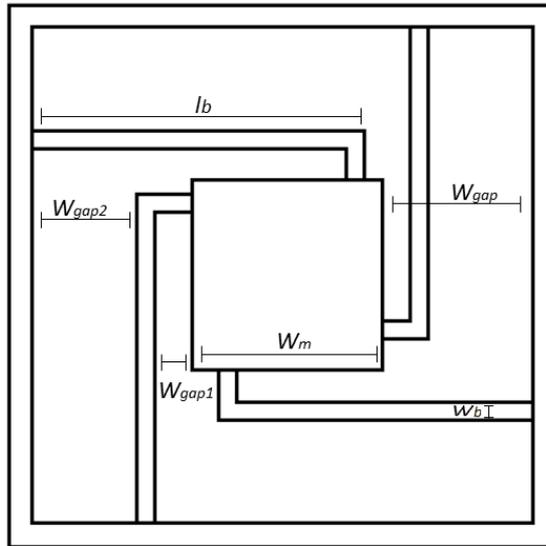


Figura 2.2: Ilustração da geometria da estrutura mecânica do acelerômetro, com vista frontal da massa móvel

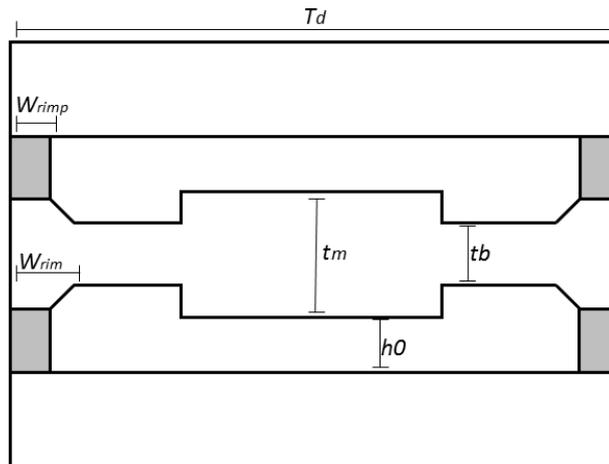


Figura 2.3: Ilustração da geometria da estrutura mecânica do acelerômetro, com vista lateral da massa móvel

Os parâmetros geométricos do dispositivo desenvolvido no projeto ACELERAD foram utilizados por Silva como referência, o qual ele chamou como microacelerômetro de referência. Aqui será utilizada a mesma referência, como apresentada na Tabela 2.1:

Tabela 2.1: Dados do Microacelerômetro de Referência

Parâmetros Geométricos	Valor
Gap entre eletrodos e massa móvel (h_o)	2 μm
Distância entre massa móvel e viga w_{gap1}	210 μm
Distância entre estrutura de sustentação e viga w_{gap2}	210 μm
Comprimento da borda plana da estrutura de sustentação, paralelas as faces de contato dos eletrodos w_{rimp}	150 μm
Comprimento do dispositivo (T_d)	4380 μm
Espessura da viga (t_b)	55 μm
Largura da viga (w_b)	200 μm
Largura do gap lateral (w_{gap})	1040 μm
Comprimento da viga (l_b)	2820 μm
Comprimento da massa móvel (w_m)	2000 μm
Largura da massa móvel ($L_m = w_m$)	2000 μm
Espessura da massa móvel (t_m)	380 μm
Distância de recuo da viga (d_{lb})	220 μm
Frequência natural mecânica (f_n)	2678 Hz
Sensibilidade eletro-mecânica (S_{EM})	0,6 pF/g

A distância entre a massa móvel e cada uma das vigas de sustentação é chamada de gap (h_o). Estudos realizados por Silva mostram que quanto menor o valor de h_o , ou seja, quanto mais próximas as placas estiverem, maior é a sensibilidade capacitiva, e por conseguinte, a sensibilidade elétrica do dispositivo. Porém, uma redução muito grande deste valor pode comprometer o sistema, levando o mesmo a um colapso ou a um mau funcionamento. Em contrapartida, quanto mais afastadas estiverem as placas, ou seja, quanto maior h_o , mais linear é a resposta capacitiva obtida, além de ser mais viável do ponto de vista de fabricação. Além dos mais, o valor do gap está diretamente ligado à espessura da viga, sendo indicado um valor menor que $\frac{1}{4}$ da espessura da viga (RODRIGUES et al., 2011). Levando em consideração o processo de corrosão úmida aplicado para a obtenção da estrutura da massa móvel durante o processo de fabricação, foi assumido por Silva que a menor espessura de viga viável é $20\mu\text{m}$. Assim, levando em consideração a relação do valor do gap e a espessura da viga, poderíamos assumir como maior valor para o gap $h_o = 5\mu\text{m}$. A escolha de h_o mínimo como $2\mu\text{m}$ feita por Silva foi então tomada com base no menor valor de h_o que não colapse o sistema, além de já ter sido utilizada em processos de fabricação. Já a escolha de h_o máximo como $5\mu\text{m}$ foi tomada utilizando-se como referência o maior valor de h_o que seja viável pelo processo de fabricação da viga e que esteja de acordo com a relação gap-espessura da viga.

Sendo assim, o valor de $h_o = 5\mu\text{m}$ será utilizado como valor máximo neste trabalho,

mesmo valor utilizado no trabalho de Silva, como referência. O valor mínimo de $h_o = 1\mu\text{m}$ foi escolhido como sendo o de menor valor adotado em (GANJI; MAJLIS, 2009).

As equações que descrevem os parâmetros geométricos do dispositivo consideram os ângulos remanescentes do processo de corrosão úmida aplicado na fabricação. Sendo assim, as equações são apresentadas como:

$$w_{rim} = w_{rimp} + \frac{1}{2\tan(54,74^\circ)}, \quad (2.1)$$

$$w_{gap} = w_b + \frac{t_m}{\tan(19,57^\circ)} + w_{gap1} + w_{gap2}, \quad (2.2)$$

$$l_b = w_m + \frac{t_m}{\tan(54,74^\circ)} + w_{gap} - d_{lb}, \quad (2.3)$$

$$T_d = l_b + w_{gap} + d_{lb} + 2w_{rim} \quad (2.4)$$

Vale ressaltar que este trabalho não tem como objetivo alterar o modelo, e nada será modificado nas equações.

2.3 O gap - panorama

Considerando que uma das propostas deste trabalho é investigar o parâmetro Gap (h_0), foram pesquisados alguns autores que trabalharam com dispositivos MEMS do tipo capacitivo, a fim de investigar os valores de gap utilizados por eles.

Em (BEDYK et al., 2008), os autores apresentam um modelo de um MEMS *microphone* (aplicação da tecnologia MEMS aos microfones) capacitivo, onde investigou as influências que interferem com a sensibilidade e relação sinal-ruído, que são os maiores desafios em modelagem e otimização destes dispositivos. Foram realizados testes com três diferentes valores de gap: $1,5\mu\text{m}$; $2,7\mu\text{m}$ e $4\mu\text{m}$. A conclusão que os autores retiram da variação do gap é que um intervalo largo ($4\mu\text{m}$) prejudica a sensibilidade, podendo levar à um pico indesejado na função de resposta na frequência de ressonância. Por outro lado, o valor de $1,5\mu\text{m}$ prejudica a relação sinal-ruído, que é melhorada com aberturas de ar mais amplas. Sendo assim, o valor mais adequado para o gap entre os três investigados no seu trabalho foi considerado o valor de $2,7\mu\text{m}$.

Em (VAHDAT; REZAZADEH; AFRANG, 2011), um MEMS *microphone* capacitivo também foi estudado, sendo que o objetivo foi melhorar a resposta do microfone. Neste trabalho o valor do gap foi mantido fixo em $2\mu\text{m}$ e descrito como um pequeno gap de ar, sem entrar em maiores detalhes. Outro trabalho envolvendo um MEMS *microphone* capacitivo foi o trabalho de (GANJI; MAJLIS, 2009), onde os autores utilizaram um valor fixo de gap de $1\mu\text{m}$. Em (ZHOU et al., 2014), onde o foco principal é a fabricação de

um acelerômetro MEMS capacitivo, Figura 2.4, o valor de gap utilizado em sua fabricação foi de $2\mu\text{m}$. Um acelerômetro MEMS capacitivo é tratado em (KAR et al., 2013), que utilizaram um valor fixo de gap ($2,5\mu\text{m}$) entre os braços móveis e fixos, Figura 2.5. Em (BENMESSAOUD; NASREDDINE, 2013) é feita uma otimização de um acelerômetro MEMS capacitivo, e o valor para o gap é fixo e igual a $3\mu\text{m}$. Em (CHEN; HUANG, 2017) os autores apresentam um acelerômetro capacitivo com gap fixo, Figura 2.6, desta vez com o valor de $3\mu\text{m}$. No trabalho de (AYDEMIR; TERZIOGLU; AKIN, 2016) utiliza um valor fixo de $2\mu\text{m}$ para o gap vertical. Em todos os trabalhos citados neste parágrafo não há nenhuma justificativa a respeito da escolha dos valores de gap, havendo apenas a descrição dos valores de parâmetros utilizados em cada trabalho.

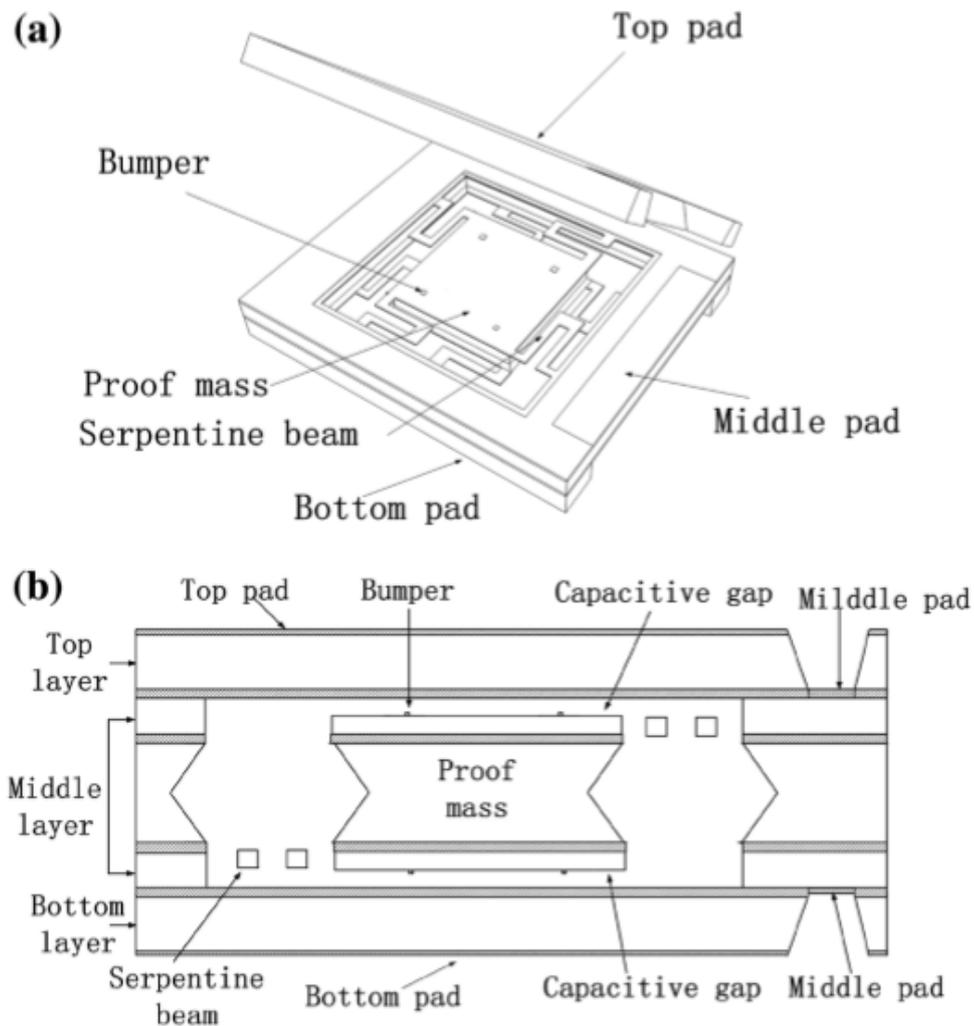


Figura 2.4: Diagrama básico do acelerômetro capacitivo utilizado no trabalho de Zhou (ZHOU et al., 2014). (a) Esquema da estrutura do acelerômetro. (b) Esquema do corte transversal do acelerômetro.

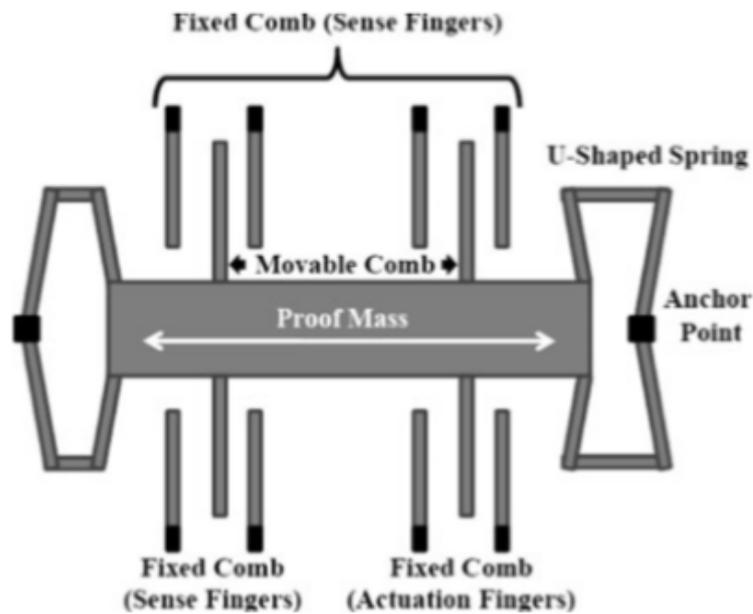


Figura 2.5: Diagrama básico do acelerômetro capacitivo utilizado no trabalho de Kar (KAR et al., 2013).

Na figura 2.5 é possível ver os braços móveis e fixos citados anteriormente (*Movable Comb* e *Fixed Comb*). Os braços móveis estão anexados à massa de prova. O gap é a distância entre os braços móveis e fixos.

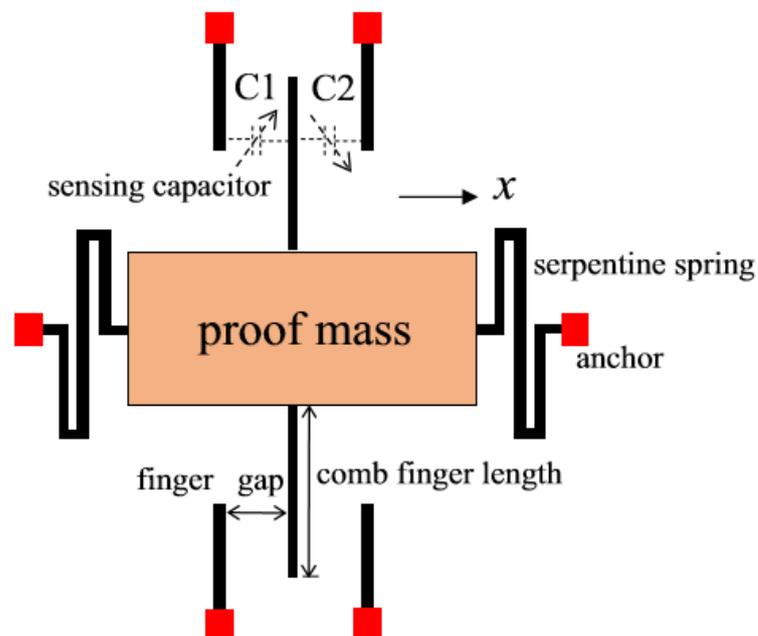


Figura 2.6: Diagrama básico do acelerômetro capacitivo utilizado no trabalho de Chen (CHEN; HUANG, 2017).

2.4 O Problema

Um problema de otimização consiste em encontrar uma boa solução para o problema em questão, aquela que apresenta a melhor relação custo x benefício. No caso do acelerômetro capacitivo aqui estudado, o objetivo da otimização é maximizar a sensibilidade eletromecânica, como também a frequência angular de corte. Além disto, tem-se também como objetivo a minimização do tamanho total do dispositivo.

O primeiro passo a ser tomado é definir quais as variáveis de projeto, em seguida é necessário definir a função objetivo. O próximo passo é identificar as restrições impostas ao problema. No caso do problema aqui estudado, proposto por Silva, temos que a função objetivo é definida pela Equação (2.5), onde a frequência angular de corte é referenciada como ω_c , a sensibilidade eletromecânica como S_{EM} e o tamanho total do dispositivo é T_d . Além disto, os parâmetros aplicados na função objetivo foram normalizados (devido às diferenças nas grandezas envolvidas), sendo que ω_{cN} se refere a frequência angular de corte normalizada, S_{EMN} se refere a sensibilidade eletromecânica normalizada e T_{dN} é o tamanho total do dispositivo normalizado. Nosso problema é um problema multiobjetivo, sendo assim, como a função objetivo é de mínimo, as parcelas que se referem aos parâmetros que se deseja maximizar estão escritas como sendo o inverso destes parâmetros. Além disso, tem-se que os dois primeiros termos da função objetivo são objetivos conflitantes, pois a frequência pode ser calculada como o inverso da sensibilidade.

$$FO = \text{minimizar } F.O. = P_1 \frac{1}{\omega_{cN}} + P_2 \frac{1}{S_{EMN}} + P_3 T_{dN}. \quad (2.5)$$

onde, P_1 , P_2 e P_3 são os pesos atribuídos às parcelas da função objetivo. Nesse trabalho os pesos foram modificados, de forma que foram obtidas 4 versões diferentes da função objetivo. Na primeira versão foram utilizados os valores utilizados por Silva, e nas demais versões estes pesos foram alterados, conforme apresentados na Tabela 2.2:

Tabela 2.2: Variação dos pesos das parcelas da função objetivo

Versão	P_1	P_2	P_3
Primeira	0,3	0,4	0,3
Segunda	0,2	0,6	0,2
Terceira	0,2	0,2	0,6
Quarta	0,6	0,2	0,2

As equações do modelo aqui apresentadas são válidas para pequenos deslocamentos da massa móvel.

A sensibilidade eletromecânica normalizada é dada por:

$$S_{EMN} = \frac{S_{EM}}{S_{EMnor}}, \quad (2.6)$$

onde a sensibilidade eletromecânica para normalização é $S_{EMnor} = 1,0$ pF/g. A sensibilidade eletromecânica é expressa por:

$$S_{EM} = S_E S_M, \quad (2.7)$$

S_E é a sensibilidade elétrica, e é dada por:

$$S_E = \frac{2\epsilon_r \epsilon_o A_m}{h_o^2}, \quad (2.8)$$

onde ϵ_r é a permissividade elétrica relativa ao ar, sendo $\epsilon_r = 1$. Já ϵ_o é a permissividade elétrica do vácuo ($\epsilon_r = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m) e A_m é a área da face da massa móvel que é normal ao eixo de sensibilidade de aceleração. A sensibilidade mecânica (S_M) é expressa por:

$$S_M = \frac{\partial z}{\partial a_z} = \frac{1}{\omega_n^2} = \frac{1}{4\pi^2 f_n^2}, \quad (2.9)$$

onde f_n é a frequência natural mecânica e ω_n é a frequência angular. A frequência angular de corte normalizada é dada por:

$$\omega_{cN} = \frac{\omega_{c0}}{\omega_{cnor}}, \quad (2.10)$$

onde ω_{c0} é a frequência angular de corte, que define o limite máximo da faixa linear dinâmica e $\omega_{cnor} = 600 \pi$ rad/s é a frequência angular de corte para normalização.

Por fim, o tamanho total do dispositivo normalizado é dado por:

$$T_{dN} = \frac{T_d}{T_{dnor}}, \quad (2.11)$$

onde T_d é o tamanho total do dispositivo, dado pela Equação 2.5 e $T_{dnor} = 4.500 \mu\text{m}$ é o tamanho total do dispositivo para normalização.

As demais equações e maiores detalhes sobre o modelo podem ser conferidas no trabalho de Silva.

2.4.1 Restrições e limites impostos ao problema

As restrições impostas ao problema, as quais a função objetivo está sujeita, são:

Tabela 2.3: Restrições impostas ao problema

Número da restrição	Condição
R_1	$S_{EM} > S_{EMmin}$
R_2	$T_d \leq T_{dmax}$
R_3	$a_{zlc} > a_{zclmin}$
R_4	$F_l > F_{lmin}$
R_5	$R_Z < 1$
R_6	$\sigma_{max} < \sigma_{adm}$
R_7	$t_m \geq 3t_b$
R_8	$w_b \geq 3t_b$
R_9	$z \leq \frac{1}{4}t_b$

As restrições estão organizadas em ordem, de forma que a restrição R_1 é considerada com menor penalidade e a restrição R_9 é a mais crítica. Começando da restrição com maior penalidade temos:

A restrição R_9 é mais crítica e está relacionada com o máximo deslocamento da massa móvel no eixo z ser $1/4$ da espessura da viga. A restrição R_8 diz que a espessura da viga deve ser no máximo $1/3$ da largura da viga. Já R_7 restringe a largura da viga em relação a largura da massa móvel. A restrição R_6 tem como objetivo garantir que os dispositivos sejam aptos do ponto de vista estrutural mecânico. A restrição R_5 limita o número de Reynolds ² modificado, uma grandeza da mecânica dos fluidos. As restrições R_4 e R_3 colocam um valor mínimo para a faixa linear de frequência e para a aceleração desejada do dispositivo, respectivamente. A restrição R_2 limita o tamanho total do dispositivo e a restrição R_1 penaliza dispositivos que apresentam valores abaixo do mínimo para a sensibilidade eletromecânica.

A faixa de variação das variáveis existentes no modelo é o que define a delimitação do espaço de busca da função objetivo, através dos valores de mínimo e máximo de cada parâmetro independente, de acordo com a seguinte relação:

²Um estudo do número de Reynolds pode ser encontrado em: [http : //lamon.com.br/ckfinder/userfiles/files/NumeroReynolds.pdf](http://lamon.com.br/ckfinder/userfiles/files/NumeroReynolds.pdf). Este estudo foi realizado pelo engenheiro Geraldo Lamon a respeito do comportamento do número de Reynolds em condições práticas, em regime de escoamento laminar e turbulento para diferentes tubulações.

$$\begin{aligned}
t_{bmin} &\leq t_b \leq t_{bmax} \\
w_{bmin} &\leq w_b \leq w_{bmax} \\
w_{mmin} &\leq w_m \leq w_{mmax} \\
t_{mmin} &\leq t_m \leq t_{mmax} \\
w_{gap1min} &\leq w_{gap1} \leq w_{gap1max} \\
w_{gap2min} &\leq w_{gap2} \leq w_{gap2max} \\
d_{lbmin} &\leq d_{lb} \leq d_{lbmax} \\
p_{min} &\leq p \leq p_{max} \\
h_{omin} &\leq h_o \leq h_{omax}
\end{aligned}$$

Os valores limites podem ser vistos na Tabela 2.4:

Tabela 2.4: Limite das variáveis independentes do problema de otimização

Variáveis	Valor
Espessura mínima da viga (t_{bmin})	20 μm
Espessura máxima da viga (t_{bmax})	126 μm
Largura mínima da viga (w_{bmin})	60 μm
Largura máxima da viga (w_{bmax})	380 μm
Comprimento mínimo da massa móvel (w_{mmin})	1500 μm
Comprimento máximo da massa móvel (w_{mmax})	2500 μm
Espessura mínima da massa móvel (t_{mmin})	60 μm
Espessura máxima da massa móvel (t_{mmax})	380 μm
Distância mínima entre massa móvel e viga ($w_{gap1min}$)	40 μm
Distância máxima entre massa móvel e viga ($w_{gap1max}$)	596 μm
Distância mínima entre estrutura de sustentação e viga ($w_{gap2min}$)	40 μm
Distância máxima entre estrutura de sustentação e viga ($w_{gap2max}$)	596 μm
Distância mínima de recuo da viga (d_{lbmin})	20 μm
Distância máxima de recuo da viga (d_{lbmax})	300 μm
Pressão mínima (p_{min})	50 Pa
Pressão máxima (p_{max})	500 Pa
Gap mínimo entre eletrodos fixos e massa móvel (h_{omin})	1 μm
Gap máximo entre eletrodos fixos e massa móvel (h_{omax})	5 μm

Sendo assim, o problema consiste em,

$$\min f(x) = P_1 \frac{1}{\omega_{cN}} + P_2 \frac{1}{S_{EMN}} + P_3 T_{dN}$$

sujeito a

$$\left\{ \begin{array}{l} 20 \mu\text{m} \leq t_b \leq 126\mu\text{m} \\ 60 \mu\text{m} \leq w_b \leq 380\mu\text{m} \\ 1500 \mu\text{m} \leq w_m \leq 2500\mu\text{m} \\ 60 \mu\text{m} \leq t_m \leq 380\mu\text{m} \\ 40 \mu\text{m} \leq w_{\text{wgap1}} \leq 596\mu\text{m} \\ w_{\text{40}} \leq w_{\text{wgap2}} \leq 596\mu\text{m} \\ 20 \mu\text{m} \leq d_{lb} \leq 300\mu\text{m} \\ 50 \text{ Pa} \leq p \leq 500 \text{ Pa} \\ 1 \mu\text{m} \leq h_o \leq 5\mu\text{m} \\ S_{EM} > S_{EMmin} \\ T_d \leq T_{dmax} \\ a_{zlc} > a_{zclmin} \\ F_l > F_{lmin} \\ R_Z < 1 \\ \sigma_{max} < \sigma_{adm} \\ t_m \geq 3t_b \\ w_b \geq 3t_b \\ z \leq \frac{1}{4}t_b \end{array} \right.$$

Capítulo 3

Otimização do Acelerômetro Capacitivo

3.1 Meta-heurísticas

A Otimização é o campo do conhecimento cujas técnicas visam determinar os extremos (máximos ou mínimos) de funções (GASPAR-CUNHA; TAKAHASHI; ANTUNES, 2012). No nosso problema, como já foi dito, deseja-se maximizar a sensibilidade do transdutor de aceleração, a frequência angular de corte e minimizar o tamanho do acelerômetro. Existem vários estudos de processos de otimização, tendo em vista que procurar soluções ótimas é algo que faz parte da humanidade. Porém, nem sempre é simples encontrar estas soluções em um tempo ou esforço computacional desejável. Assim, faz-se necessário o desenvolvimento de algoritmos e técnicas que nos auxiliem a encontrar boas soluções, como é o caso das Heurísticas.

Uma heurística é um procedimento de busca de boas soluções para o problema, sem garantir, portanto, que a solução encontrada seja a solução ótima exata. O que se faz é procurar a melhor solução dentre as várias soluções disponíveis, que é considerada uma boa solução. Temos também as meta-heurísticas, que são heurísticas estocásticas baseadas em operações suficientemente gerais e com conceitos genéricos para serem aplicadas a vários problemas (GASPAR-CUNHA; TAKAHASHI; ANTUNES, 2012). Entre as meta-heurísticas temos as Baseadas em Solução Única e as Baseadas em População, que serão brevemente apresentadas a seguir.

3.2 Meta-heurísticas Baseadas em Solução Única

As meta-heurísticas Baseada em Solução Única, ou S-Metaheurística (Single-Solution Based Metaheuristics) buscam soluções através de um conjunto de soluções viáveis, chamado vizinhança, até que um determinado critério de parada seja satisfeito. Um modelo

de algoritmo para uma S-Metaheurística é apresentado a seguir, (TALBI, 2009):

Tabela 3.1: Pseudocódigo para S-Metaheurísticas

Um algoritmo para S-Metaheurísticas
Entrada: Solução inicial S_0 .
$t = 0$;
Repita:
Gere um conjunto $N(s')$ de vizinhos de s' ;
Selecione a nova solução corrente s' do conjunto $N(s')$;
Atualize a melhor solução s^* ;
$t = t + 1$;
Até critério de parada satisfeito.
Saída melhor solução s^* encontrada.

Sendo assim, os pontos a serem definidos nos algoritmos S-Metaheurísticas são:

- a escolha da solução inicial para o algoritmo;
- a definição da vizinhança;
- as estratégias da fase de substituição;
- quais devem ser os critérios de parada.

A solução inicial pode ser escolhida randomicamente, gulosa, ou por alguma metaheurística. Já os critérios de parada podem ser um número máximo de iterações, chamada de função objetivo, valor obtido de função objetivo, tempo de processamento ou algum critério específico.

A estratégia de seleção de nova solução e substituição está relacionada com cada metaheurística. Entre as meta-heurísticas baseadas em solução única, encontra-se a *Simulated Annealing* - SA, ou Recozimento Simulado, que será brevemente apresentada a seguir.

3.2.1 Recozimento Simulado (Simulated Annealing - SA)

Recozimento Simulado, ou *Simulated Annealing* (SA) é uma S-metaheurística que faz analogia com o processo de *annealing*, ou recozimento (KIRKPATRICK; GELATT; VECCHI, 1983). Este processo é empregado na fabricação de cerâmicas, cristais e vidros e que consiste no aquecimento destes materiais a altas temperaturas com subsequente resfriamento, com o intuito de se obter estruturas cristalinas de alta qualidade, proporcionando resistência e têmpera ao material (AMENDOLA, 2007). Ainda de acordo com,

(AMENDOLA, 2007), no processo físico no qual se baseia o método, ao término do resfriamento o material terá atingido o estado de energia mínima, e isto implica em cristais sem imperfeições.

Nesse algoritmo, o valor da função objetivo é tomado como sendo a medida de energia do sistema, o conjunto de vizinhos são átomos, e o critério de parada pode ser um valor de temperatura mínimo ou um número máximo de iterações, por exemplo. O processo consiste em diminuir a temperatura do sistema até um determinado valor (arrefecimento), partindo-se de uma temperatura inicial. Um modelo de algoritmo para meta-heurística SA é apresentado a seguir, (TALBI, 2009):

Tabela 3.2: Pseudocódigo para a S-Metaheurística Simulated Annealing

Um algoritmo para a Metaheurística Recozimento Simulado - SA
Entradas:
Forma de decrescimento da temperatura $G(T)$.
$S = S_0$ (Solução inicial).
$T = T_0$ (Temperatura inicial).
Repita (para cada temperatura fixa):
Gere um vizinho s de s' ;
Calcule $\Delta E = f(s') - f(s)$;
Se $\Delta E < 0$, então $s' = s$;
Caso contrário aceite $s = s'$ com probabilidade $e^{-\frac{\Delta E}{T}}$;
Até um determinado número de vizinhos;
$T = g(T)$ (Atualização da nova temperatura);
Até T atingir um critério de parada ($T < T_{min}$).
Saída melhor solução encontrada.

ΔE é a média de variação de energia, sendo que quando $\Delta E \leq 0$ a solução s passa a ser a solução ótima. Para atualizar o valor da temperatura há algumas propostas, entre elas:

- fator geométrico: $T_i = \alpha T_{i-1}$, sendo $\alpha = (0, 1]$
- fator aritmético: $T_i = T_{i-1} - k$, sendo k uma constante

3.3 Meta-heurísticas Baseadas em População

As meta-heurísticas baseadas em População, ou P-Metaheurísticas, como o nome já diz, procuram trabalhar com uma população de soluções. Os algoritmos possuem uma fase de geração de população e aplicações para promover melhorias nas mesmas, se repetindo

até que um critério de parada seja satisfeito, como pode ser visto no algoritmo a seguir, (TALBI, 2009):

Tabela 3.3: Pseudocódigo para P-Metaheurísticas

Um algoritmo para P-Metaheurísticas
$P = P_o$ (Gere uma população inicial);
$t = 0$;
Repita:
Gerar (P'_t) (Gerar uma nova população);
$P_{t+1} =$ Selecciona População P_t U P'_t (Seleção de uma nova população);
$t = t + 1$;
Até critério de parada satisfeito.
Saída melhor solução encontrada.

De forma similar às S-Metaheurísticas, os pontos a serem definidos nos algoritmos das P-Metaheurísticas são:

- criação da população inicial;
- a definição da forma de geração de uma nova população por iteração;
- as estratégias de seleção;
- os critérios de parada.

Entre as possibilidades de geração da solução inicial temos randomicamente, ou por alguma heurística de inicialização. Os critérios de parada também são similares aos das S-Metaheurísticas, podendo por exemplo ser atingir um número fixo de iterações, esgotar o limite de usos dos recursos da CPU ou outros.

Entre as P-Metaheurísticas podemos encontrar vários algoritmos diferentes, como os Algoritmos Evolucionários.

3.3.1 Algoritmos Evolucionários

Os algoritmos evolucionários (ou *Evolutionary algorithms* - EA) foram inspirados na Teoria da Evolução de Darwin, tendo como princípio básico a competição entre os indivíduos, que levam a evolução da população (BAECK, 1996). Na primeira etapa é feito um critério de seleção, a partir do qual indivíduos que possuem melhor aptidão são selecionados com maior probabilidade a partir de seus parentes. Depois de selecionados, há o processo de reprodução destes indivíduos, gerando assim novos descendentes. Assim, uma nova população é escolhida, entre os descendentes e seus parentes. Este processo se

repete até que um critério de parada seja satisfeito. Modelo de algoritmo evolucionário (TALBI, 2009):

Tabela 3.4: Pseudocódigo para os Algoritmos Evolucionários

Um algoritmo para as meta-heurísticas Algoritmos Evolucionários
P = P _o (Gere uma população inicial);
t = 0;
Enquanto o critério de parada não é satisfeito faça:
P'(t) = seleção (P(t)); (seleção dos melhores indivíduos)
P'(t) = reprodução (P(t)); (reprodução dos melhores selecionados)
Avalie P'(t); (obtenha o valor da função objetivo da população P'(t))
P'(t + 1) = substitua (P'(t),P(t)); (seleção d euma nova população)
t = t + 1;
Fim do enquanto;
Saída melhor solução encontrada.

Algumas estratégias de seleção são:

- seleção por roleta;
- seleção por torneio;
- seleção baseada em *rank*.

Já para a reprodução, alguns dos processos de utilizados são a mutação e o *crossover*. A mutação representa uma pequena mudança nos elementos selecionados, já o *crossover* utiliza as características de dois indivíduos para gerar um novo descendente.

3.3.2 Inteligência de Partículas

Outro tipo de algoritmo baseado em População são os algoritmos inspirados no comportamento coletivo de espécies, como abelhas, pássaros e peixes. Estes algoritmos são chamados de Algoritmos de Inteligência de Partículas (*Swarm Intelligence Algorithms*), e em geral sem baseiam na competição de indivíduos por alimento. Abaixo encontram-se alguns exemplos de meta-heurísticas de inteligência de partículas (TALBI, 2009):

- Colônia de Formigas (*Ant Colonies*);
- Nuvem de Partículas (*Particle Swarm Optimization*);
- Buraco Negro (*Black Hole*);

- Colônia de abelhas (*Bees Colonies*).

Os algoritmos que serão utilizados neste trabalho nesta categoria são o Nuvem de Partículas e o Buraco Negro. A seguir, serão apresentadas as principais características destes algoritmos.

3.3.3 Nuvem de Partículas - Particle Swarm Optimization (PSO)

O algoritmo Nuvem de Partículas, aqui referenciado como PSO, é uma técnica de otimização que utiliza-se do estudo de comportamento coletivo de pássaros voando. Neste algoritmo, cada indivíduo utiliza-se de conhecimentos adquiridos em interações anteriores, seja da própria partícula ou do bando.

No algoritmo considera-se que N partículas x_i voam sobre um espaço de busca viável, sendo que qualquer partícula x_i é uma candidata a solução do problema. Além disso, considera-se que cada partícula possui uma velocidade v_i . Assim, em cada iteração é feita uma atualização da velocidade (Equação 3.1) e posição da partícula (Equação 3.2). Um modelo para o algoritmo PSO é mostrado a seguir (TALBI, 2009):

Tabela 3.5: Pseudocódigo para o PSO

Um modelo para o algoritmo Nuvem de Partículas
Inicialize ramdomicamente N partículas x_i ;
Repita:
Avalie cada x_i
Para toda partícula i faça:
A atualização da velocidade
A atualização da posição
Se $f(x_i) < f(Pbest_i)$ Então $Pbest_i = x_i$;
Se $f(x_i) < f(Gbest_i)$ Então $Gbest_i = x_i$;
Até que um critério de parada seja satisfeito;
Saída melhor solução (ou população) encontrada.

O $Pbest$ é a melhor posição conhecida pela partícula i , ou seja a posição da partícula que apresentou a melhor função objetivo até então. Além do $Pbest$, tem-se também o $Gbest$, que é a melhor posição conhecida dentre todas as partículas até então. Ou seja, enquanto o $Pbest$ representa a experiência de cada partícula individualmente, o $Gbest$ representa a experiência do bando.

Além dos critérios de parada já citados anteriormente, o PSO pode também utilizar o valor de $Gbest$ depois de um determinado número de iterações.

Quanto a atualização da velocidade, tem-se que a velocidade é considerada o passo que a partícula dá em determinada direção, e pode ser feita através da seguinte equação:

$$v_i^{k+1} = \omega \cdot v_i^k + c_1 \cdot rand1 \cdot (Pbest - x_i^k) + c_2 \cdot rand2 \cdot (Gbest - x_i^k) \quad (3.1)$$

Temos que ω é o quanto a partícula confia em si mesma, chamado fator de inércia da partícula. Além disso, tem-se que $rand1$ e $rand2$ são números randômicos que pertencem ao intervalo $[0,1]$. Os fatores c_1 e c_2 são fatores de aprendizagem da partícula, sendo que c_1 é o quanto a partícula confia na própria experiência e c_2 o quanto ela confia na experiência do grupo.

Já a atualização da posição da partícula é dada pela equação:

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (3.2)$$

onde x_i é a posição da partícula na iteração anterior e v_i^{k+1} é a velocidade atualizada.

3.3.4 Buraco Negro - Black Hole

Buraco Negro, ou BH, é uma meta-heurística inspirada no fenômeno físico de mesmo nome, que consiste em um corpo celeste com massa muito grande comparada ao espaço que ocupa, possuindo um campo gravitacional muito intenso. Além disto, em um buraco negro há o que se chama de horizonte de eventos, que é uma região a partir da qual todo objeto que se aproximar de um buraco negro de forma a ultrapassar este horizonte de eventos (ou raio de atração) não consegue escapar (FRÓES, 2014).

No início do algoritmo BH tem-se uma população de estrelas (soluções viáveis) que são geradas aleatoriamente. O cálculo de função objetivo (ou valor de aptidão) de cada estrela é feito, sendo que a que apresentar o melhor valor é denominada de *Black Hole* ou BH.

Determinado o BH, calcula-se a região de atração do BH. Assim, toda estrela que estiver em uma distância menor que o raio de atração do BH será “absorvida”, ou seja, será destruída, sendo que uma nova estrela é gerada aleatoriamente. Este processo se repete até que um critério de parada seja satisfeito.

A atualização da partícula no BH é dada por:

$$x(t+1) = x(t) + rand(x_{BH} - x(t)) \quad (3.3)$$

onde x_{BH} é a posição da estrela com o melhor valor de função objetivo até o momento.

Esta atualização pode ser obtida considerando as equações de atualização da velocidade e posição da partícula do PSO (Equações 3.1 e 3.2) e assumindo-se que $\omega = c_1 = c_2 = 0$.

3.4 Otimização

O processo de otimização se deu a partir de 4 versões diferentes da função objetivo, sendo que para cada versão foram repetidos 10 vezes cada algoritmo utilizado (PSO, BH, EA e SA). Sendo assim, foram executados 40 testes para cada versão diferente da função objetivo. Em cada uma destas versões foram alterados os pesos atribuídos as parcelas da função objetivo, de acordo com a tabela 2.2.

Os parâmetros de entrada para o algoritmo PSO foram escolhidos com base no trabalho de (DASILVAJUNIOR et al., 2014) e os demais parâmetros a partir de estudos em andamento no LEV - Laboratório de Engenharia Virtual do Instituto de Estudos Avançados - IEAV/CTA. Os valores adotados podem ser vistos na tabela 3.6.

Tabela 3.6: Parâmetros de Entrada

Parâmetros - PSO	Valores
Fator de inércia da partícula (ω)	0,625
Coefficiente de aprendizado da partícula C_1	1,875
Coefficiente de aprendizado da partícula C_2	1,875
Total de partículas	40
Critério de Parada (Número de Iterações)	100000
Parâmetros - BH	Valores
Total de partículas	40
Critério de Parada (Número de Iterações)	100000
Parâmetros - SA	Valores
Número de vizinhos	600
Fator Geométrico	0,95
Temperatura inicial	1e-4
Temperatura final	1e-25
Critério de Parada (Número de Iterações)	100000
Parâmetros - EA	Valores
Taxa de mutação	60%
Taxa de reprodução	100%
Número de Indivíduos	40
Critério de Parada (Número de Iterações)	100000

Os resultados obtidos foram analisados, sendo que a os valores de sensibilidade eletromecânica, frequência de corte e tamanho total do dispositivo obtidos em cada teste foram analisados, com objetivo de se comparar com o acelerômetro de referência utilizado

por Silva. Assim, a partir dos resultados obtidos em cada versão da função objetivo, os dados foram analisados de forma obter dispositivos que tivessem um ganho em relação aos valores de referência.

3.5 Resultados

É importante ressaltar, que nesse trabalho, apenas o melhor valor de função objetivo para cada teste foi analisado. Além do mais, apenas resultados que não violaram nenhuma restrição foram considerados. Também é importante observar que apesar da função objetivo, Equação 2.5, ser calculada com a frequência angular de corte, a Tabela 2.1 apresenta um valor de referência para a frequência natural mecânica (f_n). Assim, para uma comparação mais simples dos ganhos obtidos, será analisada aqui a frequência natural mecânica, que é diretamente relacionada com a frequência angular de corte de acordo com a seguinte relação: $\omega_n = 1/5 f_n$ (SILVA, 2015).

Na primeira versão da função objetivo obtivemos resultados viáveis apenas com o algoritmo BH. Nos algoritmos SA, EA e PSO não foi obtido nenhum resultado que não tenha violado alguma restrição.

Sendo assim, dentre os testes realizados com o método BH, procurou-se identificar os melhores resultados obtidos para sensibilidade, frequência natural e tamanho total do dispositivo. Assim, a diferença percentual entre os valores obtidos e os valores do dispositivo de referência foi calculada (chamaremos de ganho) e os resultados mais interessantes são apresentados na Tabela 3.7. O melhor ganho obtido para sensibilidade, frequência natural e tamanho total do dispositivo estão designados por Ganho S, Ganho F e Ganho T, respectivamente. Também nomearemos estes melhores resultados como dispositivos BH1, BH2 e BH3, afim de melhor referenciar estes resultados.

Tabela 3.7: Resultados obtidos (BH) - Primeira Versão da Função Objetivo

Variável	Ganho S	Ganho F	Ganho T
Sensibilidade eletromecânica	32,05%	24,94%	-1,14%
Frequência natural mecânica	-54,30%	-38,84%	-48,76%
Tamanho do Dispositivo	-26,03%	-24,23%	-26,04%
Gap	3,26 μ m	2,47 μ m	3,39 μ m
Dispositivo	BH1	BH2	BH3

O dispositivo com melhor ganho em relação a sensibilidade, um aumento de 32%, obteve uma redução de aproximadamente 54% na frequência e uma redução de 26% no tamanho do dispositivo. Já o dispositivo com melhor resultado para a frequência, uma redução de quase 39%, obteve um aumento para a sensibilidade de aproximadamente 25%

e uma redução de 24% no tamanho do dispositivo. Em todos os dispositivos a frequência apresentou uma redução e não um aumento. Assim, o melhor ganho apresentado é o dispositivo que obteve a menor redução.

O melhor resultado em relação ao tamanho do dispositivo não apresentou um ganho muito maior em comparação com a redução de apresentada no dispositivo com melhor sensibilidade, pois ambos ficaram em torno dos 26%. Além disso, a sensibilidade apresentou uma redução e não um aumento, como desejado, e a frequência obteve uma redução de 48,76%.

Por fim, analisando os resultados do gap, percebe-se que os três dispositivos apresentaram um valor maior que $2\mu\text{m}$, valor do dispositivo de referência, como pode ser visto na Tabela 2.1.

Serão apresentados agora os resultados obtidos na segunda versão da função objetivo, onde foi priorizada a sensibilidade eletromecânica. Nesta versão, assim como na anterior, não obtivemos resultados viáveis com os métodos SA e EA, e apenas dois resultados que não violaram nenhuma restrição com o método PSO. Quase todos os resultados obtidos com o BH foram viáveis (apenas um violou alguma restrição), porém o melhor ganho para sensibilidade e tamanho total do dispositivo para todos os resultados obtidos com o BH coincidiram no mesmo dispositivo. Sendo assim, será apresentado o melhor ganho para frequência, que foi um dos resultados do PSO e o melhor resultado do BH. Estes resultados serão referenciados como dispositivos PSO1 e BH4, respectivamente.

Tabela 3.8: Resultados obtidos (PSO e BH) - Segunda Versão da Função Objetivo

Variável	Ganho S	Ganho F	Ganho T
Sensibilidade eletromecânica	119,70%	20,24%	119,70%
Frequência natural mecânica	-67,35%	-15,36%	-67,35%
Tamanho do Dispositivo	-22,77%	-20,60%	-22,77%
Gap	$3,76\mu\text{m}$	$2,0\mu\text{m}$	$3,76\mu\text{m}$
Dispositivo	BH4	PSO1	BH4

Como citado anteriormente, os melhores resultados em termos de aumento de sensibilidade eletromecânica e redução no tamanho total do dispositivo para os resultados com o método BH coincidem. Além disto, se formos comparar os valores obtidos no dispositivo BH4 com os valores obtidos anteriormente, onde nenhuma variável foi priorizada em relação a outra, percebemos um ganho enorme em termos de aumento de sensibilidade. A redução obtida com o método PSO para a frequência foi a menor, sendo o melhor resultado apresentado até então.

Em relação ao gap, vê-se que o resultado do algoritmo PSO forneceu o mesmo valor de gap do dispositivo referência, mas o resultado apresentado pelo BH apresentou um valor

bem acima.

Na próxima versão da função objetivo foi priorizado o tamanho do dispositivo. Todos os resultados com o PSO e EA violaram alguma restrição, nenhum resultado com o BH violou restrições e um resultado com o SA não violou nenhuma restrição. O dispositivo obtido com o SA obteve o melhor ganho para sensibilidade e será chamado SA1. Os dispositivos obtidos com o BH com o melhor ganho para frequência e tamanho do dispositivo serão chamados BH5 e BH6, respectivamente.

Tabela 3.9: Resultados obtidos (BH e SA) - Terceira Versão da Função Objetivo

Variável	Ganho S	Ganho F	Ganho T
Sensibilidade eletromecânica	100,10%	6,92%	6,88%
Frequência natural mecânica	-60,93%	-34,75%	-51,95%
Tamanho do Dispositivo	-26,33%	-24,71%	-27,33%
Gap	3,18 μ m	2,67 μ m	3,35 μ m
Dispositivo	SA1	BH5	BH6

Percebe-se nos resultados com o BH que a menor redução de frequência foi de 34,75%, valor entre os melhores encontrados até então, porém não o melhor. Em compensação, a melhor redução no tamanho do dispositivo (aproximadamente 27%) foi a melhor encontrada em comparação com os testes anteriores, porém não foi uma redução tão significativa em comparação com a obtida na primeira versão da função objetivo, visto que nesta versão o tamanho total do dispositivo foi priorizado. Já o dispositivo obtido com o SA resultou no melhor ganho para a sensibilidade eletromecânica, além de um bom resultado para o tamanho total do dispositivo. Novamente temos valores de gap acima de 2 μ m, valor do dispositivo de referência.

Na quarta e última versão da função objetivo foi priorizada a frequência natural mecânica. Foram obtidos apenas dois resultados sem violar nenhuma restrição, ambos com o teste BH. Sendo assim, os dois resultados serão apresentados a seguir. Os dispositivos serão nomeados como BH7 e BH8. Os dois resultados para sensibilidade foram iguais, então não será escolhido melhor ganho para a sensibilidade.

Tabela 3.10: Resultados obtidos (BH) - Quarta Versão da Função Objetivo

Variável	Ganho S	Ganho F	Ganho T
Sensibilidade eletromecânica	-	-16,63	-16,63
Frequência natural mecânica	-	-26,13	-32,02
Tamanho do Dispositivo	-	-20,65	-21,26
Gap	-	2,69 μ m	2,76 μ m
Dispositivo	-	BH7	BH8

Os dois resultados apresentados na Tabela 3.10, sugerem que priorizar a frequência trouxe uma redução menor que as obtidas anteriormente, com exceção do dispositivo PSO1. A sensibilidade porém teve uma redução em 16,63%, e o tamanho do dispositivo obtido foi com uma redução de aproximadamente 21% em ambos os dispositivos. No entanto, todos os testes anteriores resultaram em ganhos similares ou melhores. Analisando os valores obtidos para o gap, temos mais uma vez valores acima do dispositivo de referência.

Em relação aos valores obtidos para o parâmetro Gap nos resultados aqui apresentados, como já comentado, à exceção do dispositivo PSO1 são maiores que 2,0 μ m, que é o valor do microacelerômetro de referência. Além disso, nenhum valor chegou a 4,0 μ m, ou seja, os valores não se aproximaram dos valores limites, seja inferior ou superior.

Em relação aos métodos utilizados no trabalho, observa-se que o BH apresentou melhores resultados em relação aos outros algoritmos. Considerando-se o total de testes realizados com cada método, podemos calcular a % de resultados viáveis que cada um apresentou:

Tabela 3.11: Porcentagem de Resultados Viáveis por Meta-heurística

SA	EA	PSO	BH
2,5%	0%	5%	77,5%

Os resultados que não foram viáveis são os que violaram alguma restrição. Entre as restrições apresentadas na tabela 2.3, as mais violadas nos resultados aqui obtidos foram as restrições R_1 e R_3 . A restrição R_8 também apareceu em vários resultados.

Assim, pode-se dizer, em relação aos resultados aqui apresentados, que analisando o primeiro conjunto de testes, Tabela 3.7 tem-se um bom aumento da sensibilidade eletromecânica (aproximadamente 32%) no dispositivo BH1, sendo que este mesmo resultado apresentou uma redução aproximada de 26% no tamanho do dispositivo. Porém, o melhor resultado para o tamanho do dispositivo (BH3) não trouxe aumento da sensibilidade eletromecânica, e além disto a redução no tamanho do dispositivo foi praticamente a

mesma nos dois casos, com uma diferença mínima. Já o dispositivo BH2, além de apresentar o melhor resultado para a frequência, apresentou valores interessantes em relação à sensibilidade e ao tamanho total do dispositivo.

Observando os resultados obtidos na segunda versão da função objetivo, Tabela 3.8, podemos dizer que priorizar a parcela da sensibilidade eletromecânica realmente nos trouxe um ganho muito grande, com um aumento de mais de 100% deste parâmetro. Além disto, o tamanho total do dispositivo ainda teve uma boa redução, sendo esta de 22,77%. Analisando agora o único resultado viável obtido pelo método PSO percebe-se que este apresenta o melhor resultado referente à frequência natural mecânica, entre todos os dispositivos analisados.

Ao priorizar o tamanho total do dispositivo, Tabela 3.9 o melhor resultado deste parâmetro foi o BH6, com uma redução de 27,33% no tamanho do dispositivo. Percebe-se porém que o aumento da sensibilidade eletromecânica foi de aproximadamente 6,88%.

Ao priorizar a frequência angular de corte, Tabela 3.10 há um prejuízo em relação à sensibilidade eletromecânica, pois os dois resultados obtidos apresenta uma redução de 16,63% neste parâmetro. Além disto o ganho em relação à própria frequência não foi o melhor obtido, e a redução no tamanho do dispositivo foi uma das menores apresentadas.

Capítulo 4

Considerações Finais

Neste trabalho realizou-se então uma investigação a cerca dos parâmetros da função objetivo (sensibilidade eletromecânica, frequência natural mecânica e tamanho total do dispositivo) do problema de otimização do acelerômetro micro-eletromecânico capacitivo. Esta investigação consistiu em variar os pesos destas parcelas, a fim de identificar possíveis influências de cada parâmetro no resultado do dispositivo final. Assim, para dizer se houve um ganho ao se variar estes pesos, é preciso analisar os resultados obtidos e descritos na seção anterior, em relação à cada versão de função objetivo.

Na primeira versão da função objetivo, Tabela 3.7, tem-se dois dispositivos que se destacaram, o BH1, com melhores resultados para a sensibilidade e o tamanho total do dispositivo e o BH2 com melhor resultado para a frequência. Assim, neste primeiro conjunto de testes pode-se considerar como melhor resultado o BH2, caso a prioridade seja uma menor redução da frequência natural, ou o BH1, caso a sensibilidade e o tamanho total do dispositivo sejam os parâmetros que se deseje dar prioridade.

Em relação à segunda versão da função objetivo, Tabela 3.8, temos apenas dois dispositivos apresentados com melhores ganhos. O dispositivo BH4 com melhores ganhos para a sensibilidade e o tamanho total do dispositivo e o PSO1 com menor redução da frequência natural. Vale ressaltar que o BH4 apresenta o maior ganho de sensibilidade e o PSO1 apresenta a menor redução de frequência entre todos os resultados obtidos. Assim, o dispositivo BH4 é uma opção melhor caso se deseje priorizar a sensibilidade eletromecânica, e o dispositivo PSO1 é a melhor opção caso a prioridade seja a frequência natural mecânica. Comparando estas duas variáveis é possível dizer que quando a sensibilidade foi priorizada o ganho nesta variável foi significativo, sendo que o tamanho do dispositivo não foi prejudicado. Houve uma redução menor no tamanho deste dispositivo em relação ao melhor resultado no qual o tamanho foi priorizado, mas pouca diferença. Por outro lado, quando o tamanho total do dispositivo foi priorizado, a diferença entre o aumento da sensibilidade obtido neste resultado e o BH4 é bem grande. Pode-se dizer então que a sensibilidade foi prejudicada ao se priorizar o tamanho total do dispositivo, mas que o tamanho não foi prejudicado ao se priorizar a sensibilidade.

Em relação à terceira versão da função objetivo, Tabela 3.9, observa-se que o dispositivo SA1 apresenta o melhor resultado desta versão em relação à sensibilidade, próximo ao valor do BH4, que apresentava o melhor resultado para este parâmetro até então. Além disto, a redução no tamanho do dispositivo foi bem próxima do BH6, que apresenta o melhor resultado para este parâmetro. Porém, a frequência natural mecânica teve uma redução muito grande, mais de 60%, o que torna este dispositivo uma boa escolha em termos de sensibilidade e tamanho, mas uma escolha ruim em termos da frequência.

Por fim, os dados apresentados na Tabela 3.10 nos mostram que a quarta versão da função objetivo foi a que apresentou menos resultados viáveis. Apesar de apresentar uma das menores reduções de frequência natural, apresenta os piores resultados para a sensibilidade eletromecânica e praticamente os piores resultados para o tamanho total do dispositivo também. Sendo assim, os dispositivos BH7 e BH8 não seriam boas escolhas.

Assim, ficam as perguntas “Vale a pena priorizar a sensibilidade em detrimento das outras variáveis?” ou “Vale a pena priorizar o tamanho do dispositivo em detrimento das outras variáveis?” E pode-se perguntar o mesmo em relação à frequência angular de corte. Os resultados apresentados aqui são um indicativo de que é interessante priorizar a sensibilidade eletromecânica se um melhor ganho neste parâmetro for o objetivo, pois não se terá perda no tamanho total do dispositivo. Porém, o dispositivo BH4, que apresenta melhor ganho para a sensibilidade apresenta também o pior resultado para a frequência natural. Em relação a priorizar o tamanho total do dispositivo, com exceção do SA1, os resultados não foram bons para os demais parâmetros, além do ganho no tamanho não ter sido tão maior que os valores encontrados por outros dispositivos. Por fim, priorizar a frequência trouxe os resultados menos interessantes, apesar de apresentar uma das menores reduções neste parâmetro.

Assim, entre os três parâmetros, vale a pena priorizar algum destes, pois os melhores resultados entre todos apresentados não são relativos à primeira versão da função objetivo, onde se manteve os pesos utilizados por Silva, mas se encontram em alguma das outras versões. O melhor resultado entre todos para a sensibilidade, o BH4, se encontra na segunda versão da função objetivo, onde foi de fato priorizada a sensibilidade. De forma análoga, o melhor resultado para o tamanho total do dispositivo se encontra na terceira versão da função objetivo, onde se priorizou este parâmetro. Curiosamente porém, o melhor valor para a frequência se encontra na segunda versão, e não na quarta versão, onde a frequência foi priorizada.

Quanto ao Gap, cuja análise também faz parte do objetivo deste trabalho, observa-se que a maioria dos valores obtidos ficou próxima de $3\mu\text{m}$. Com exceção do PSO1, todos foram acima de $2\mu\text{m}$, o que sugere que um aumento no valor do Gap utilizado no acelerômetro de referência possa trazer resultados mais interessantes. Além do mais, este aumento do parâmetro Gap facilita o processo de fabricação do dispositivo, o que é uma vantagem.

Por fim, analisando as meta-heurísticas utilizadas, tem-se que a porcentagem de boas soluções apresentadas pelo BH foi muito superior aos demais métodos. O que sugere que em trabalhos futuros sejam utilizados outros parâmetros de entrada para os algoritmos SA e EA, que não apresentaram uma taxa interessante de resultados viáveis.

Em trabalhos futuros, uma sugestão seria trabalhar sem os pesos fixos, eliminando P_1 , P_2 e P_3 da equação 2.5, para que se possa assim ter um *feeling* maior a respeito do peso de cada parcela da função objetivo.

Referências Bibliográficas

AMENDOLA, A. F. Meta-heurísticas de otimização aplicadas à coordenação hidrotérmica. *Universidade Federal do Rio de Janeiro*, v. 84, 2007.

AYDEMIR, A.; TERZIOGLU, Y.; AKIN, T. A new design and a fabrication approach to realize a high performance three axes capacitive mems accelerometer. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 244, p. 324–333, 2016.

BAECK, T. *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice: Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Algorithms: Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Algorithms*. 1st. ed. Oxford: UK: Oxford University Press, 1996. ISBN 0-19-509971-0.

BEDYK, W. et al. Automated extraction of multi-energy domain reduced-order models demonstrated on capacitive mems microphones. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 145, p. 263–270, 2008.

BENMESSAOUD, M.; NASREDDINE, M. M. Optimization of mems capacitive accelerometer. *Microsystem Technologies*, Springer, v. 19, n. 5, p. 713–720, 2013.

CALACHE, D. C. Caracterização de um acelerômetro baseado em sistemas microeletromecânicos (mems). *Projeto de graduação*, 2013.

CHEN, J.-H.; HUANG, C.-W. 0.35 μm cmos–mems low-mechanical-noise micro accelerometer. *Microsystem Technologies*, Springer, p. 1–6, 2017.

DASILVAJUNIOR, C. A. et al. *A Metric to assist the selection of the particle swarm optimization parameters*. [S.l.]: CRC Press, 2014. ISBN 978-1-138-027725-1.

FRÓES, A. L. D. Astronomia, astrofísica e cosmologia para o ensino médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 36, n. 3, p. 3504, 2014.

GANJI, B. A.; MAJLIS, B. Y. Design and fabrication of a new mems capacitive microphone using a perforated aluminum diaphragm. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 149, n. 1, p. 29–37, 2009.

GASPAR-CUNHA, A.; TAKAHASHI, R.; ANTUNES, C. H. *Manual de computação evolutiva e metaheurística*. [S.l.]: Imprensa da Universidade de Coimbra/Coimbra University Press, 2012.

KAR, S. K. et al. Testing of mems capacitive accelerometer structure through electro-static actuation. *Microsystem technologies*, Springer, v. 19, n. 1, p. 79–87, 2013.

- KENNEDY, J.; EBERHART, R. Proceedings of ieee international conference on neural networks. *Perth, Australia*, 1995.
- KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. *Science*, v. 220, p. 671–680, 1983.
- RODRIGUES, J. R. et al. Modelagem e simulação de um microacelerômetro capacitivo. *Área de Sistemas Aeroespaciais e Mecatrônica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos*, p. 219, 2011.
- SILVA, L. L. *Caracterização e Otimização de um Acelerômetro Micro-Eleto-Mecânico Capacitivo para Aplicação Aeroespacial. 241 f.* Dissertação (Mestrado) — Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais - Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 2015.
- TALBI, E.-G. *Metaheuristics: from design to implementation*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.
- VAHDAT, A. S.; REZAZADEH, G.; AFRANG, S. Improving response of a mems capacitive microphone filtering shock noise. *Microelectronics Journal*, Elsevier, v. 42, n. 5, p. 614–621, 2011.
- WAKIM, B. S. *Framework de Otimização baseada em Meta-heurísticas. 137 f.* Dissertação (Mestrado) — Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais - Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 2017.
- ZHANG, J. et al. Random black hole particle swarm optimization and its application. In: IEEE. *Neural Networks and Signal Processing, 2008 International Conference on*. [S.l.], 2008. p. 359–365.
- ZHOU, X. et al. Fabrication of a mems capacitive accelerometer with symmetrical double-sided serpentine beam-mass structure. *Microsystem technologies*, Springer, v. 20, n. 7, p. 1365–1372, 2014.