



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Micro-Motor Levitado Utilizando Capacitores em Serie Com Placa Móvel.

Luca Rosário Alexandre

Relatório Final de Iniciação científica PIBIC,
Orientado pelo Dr. José Roberto Senna.

INPE
São José Dos Campos
2021

Micro-Motor Levitado Utilizando Capacitores em Serie Com Placa Móvel.

Luca Rosário Alexandre

Relatório Final de Iniciação científica PIBIC,
Orientado pelo Dr. José Roberto Senna.

São José Dos Campos

2021

RESUMO

O objetivo deste trabalho é o entendimento quantitativo e demonstração experimental de um dispositivo micro-eleto-mecânico contendo uma peça móvel levitada eletricamente. Esta é um disco de vidro de diâmetro 4,95 mm e espessura 0,5 mm, metalizado nas duas faces planas. Em aplicações poderia atuar como o rotor de um micro-motor ou de um micro-giroscópio, e portanto chamamos essa peça de *rotor*.

Cada face atua eletricamente como a placa móvel de um capacitor variável. As duas placas fixas do capacitor variável são referidas como *estatores* e atraem a face correspondente do rotor. Para levitação *em qualquer posição*, são necessários dois estatores, cada um atraindo a face correspondente.

Para levitação *estável* as forças elétricas devem ser *regenerativas*, ou seja, a força de atração entre a placa móvel (rotor) e as placas fixas (estator) devem diminuir quando a distancia entre essa placa diminui e aumentar quando essa distancia aumenta. Usando corrente *contínua*, ocorreria exatamente o contrário disso.

Foi proposta por Kumar, Cho e Carr a levitação estável usando corrente *alternada*. Isso ocorre se o capacitor for parte de um circuito ressonante RLC, e a frequência aplicada for acima da frequência de ressonância do circuito com o rotor na posição de equilíbrio. A estabilidade em geral desse sistema foi analisada por P. G..Milani († 2020) em sua tese de Dr. no INPE.

Nosso microdispositivo é uma demonstração experimental dessa técnica. Serão apresentados:

- 1) Uma análise quantitativa para as dimensões específicas deste micro-dispositivo, incluindo a correção de um erro na análise geral original de Kumar et al., propagado em referencias posteriores.
- 2) A descrição de etapas de metalização e corte dos discos (feitas anteriormente por outros estudantes).
- 3) Algumas dificuldades de processamento causadas pelo método de fabricação dos rotores, e alternativas propostas para futuros trabalhos.
- 4) A micro-litografia para fabricação de estatores.
- 5) O processo de criação de espaçadores da ordem de microns, e de alinhamento entre estatores e rotores com precisão micrométrica.
- 6) Confeção do circuito para o acionamento do dispositivo.

E por fim os resultados obtidos na levitação.

Lista De Figuras	Pag.
Figura 2.1: Capacitor apresentando as dimensões l, d e w e as forças F_l, F_d e F_w em suas respectivas direções.	3
Figura 2. 1: Exemplo de suspensão CC	4
Figura2. 2: Layout para suspensão CA	4
Figura2. 3: Variação da tensão através das placas do capacitor em função da separação	6
Figura 3.1: Visão explodida do micromotor proposto.	8
Figura 3.2: Lamina metalizada com os estatores impressos.	9
Figura 3.3: Ordem da furação das laminas metalizadas	10
Figura 3.4: Padrão dos estatores com espaçadores.	12
Figura 3.5: Esquema da montagem do micromotor.	13
Figura 3.6: Representação do circuito Montado.	13
Figura 4.1: Gráfico d frequência exigida pela para diferentes valores de capacitância parasítica para levitação estável.	15
Figura 4.2: Banda de estabilidade da levitação.	17
Figura 4.3: Força resultante em relação à variação da posição do rotor.	17
Figura 4.4: Força resultante em relação a posição do rotor.	18
Figura 4.5: Força resultante em relação à posição rotor para um micromotor com estatores superior e inferior.	18

Sumário

1	INTRODUÇÃO	2
1.1	.OBJETIVOS GERAIS	2
1.2	.OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2	. REVISÕES DA LITERATURA	2
3	PROCESSOS PARA CONSTRUÇÃO DO CONSTRUÇÃO DO MICROMOTOR.....	8
4	RESULTADOS	14
5	. DISCUSSÃO	19
6	. CONCLUSÃO	20
7	. REFERENCIAS	20

1 Introdução

Este trabalho se propõem a apresentar conceitualmente a levitação usando a força elétrica que existe em capacitores, os processos de microfabricação para construção de um micromotor projetado previamente por outros alunos e por fim testar a levitação. Este dispositivo pode ser projetado para atuar como sensor de aceleração, e tem como vantagem o funcionamento sobre ação de qualquer força gravitacional. O micromotor se utiliza da existência da força elétrica entre as placas de um capacitor, que pode ser controlada se definindo os parâmetros de Voltagem RMS fornecida ao circuito, distancia entre as placas e a capacitância parasita, que pode definir se o dispositivo pode ser estável.

1.1 .Objetivos Gerais

- Demonstrar conceito físicos que rege a levitação elétrica;
- Apresentar os processos utilizados na fabricação das partes do dispositivo;
- Apresentar os testes e gráficos feitos demonstrando a levitação.

1.2 .Objetivos Específicos

Discutir o parâmetro que limitantes para a suspensão elétrica de um dispositivo micromotor capacitivo.

2 . Revisões da Literatura

O Micromotor levitado Por conjunto de capacitores em series com placa móvel se utiliza das propriedades elétricas inerentes a um capacitor, sendo que neste caso existem seis placas fixas que configuram o estator superiores e inferiores, e uma placa móvel, chamada de rotor. O mecanismo constitui um sistema capacitivo quando aplicado uma tensão entre as placas dos estatores, que por sua vez tem a sua capacitância variável, dependendo da distancia entre os estatores e o rotor, como é apresentado pela Fórmula 2.1 à capacitância de um capacitor varia de forma inversamente proporcional a distancia entre as placa.

A capacitância é dada pela por:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (2.1)$$

Onde:

C = capacitância

E= Coeficiente de permissividade elétrica do meio

A é a área do capacitor

d = distancia entre as placas do capacitor

Para a aplicação no micromotor temos que a capacitância não será a Equação 2.1, pois são duas placas com metade da área total e se configuram que são dois capacitores em serie, portanto a Equação 2.2 expressa realmente a capacitância que existe na configuração a da imagem 2.2.

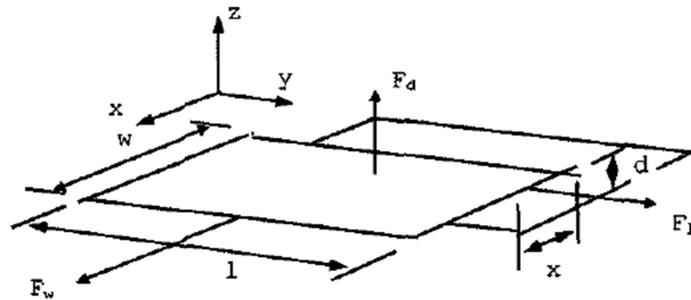
$$C = \frac{\epsilon A}{4d} \quad (2.2)$$

Podemos definir a força elétrica que existe entre as placas a partir do potencial elétrico que existe em um capacitor, a energia potencial de um capacitor é dada a seguir:

$$U = -\frac{1}{2}CV^2 \quad (2.3)$$

A Fórmula (2.3) relaciona a Tensão aplicada entre as placas (V) e a capacitância com o a energia potencial. Considerando um par de placas paralelas orientados conforme a imagem (2.1) abaixo se pode definir as força de interação elétrica que existe entre essas placas, que é apresentada pela Fórmula (2.4).

Figura 2.1: Capacitor apresentando as dimensões l,d e w e as forças Fl, Fd e Fw em suas respectivas direções.



Fonte: Adaptada de Milani (1998)

$$F_z = -\frac{dU}{dz} \quad (2.4)$$

$$F_z = -\left(\frac{1}{2}\right) \cdot \frac{\epsilon \cdot A \cdot (V^2)}{4d^2} \quad (2.5)$$

Sendo que $w \cdot l$ é a área superficial da placa (A).

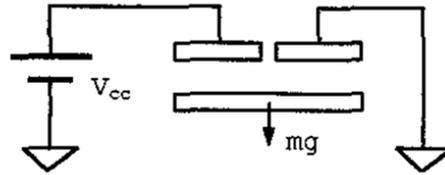
As componentes das forças F_x , F_y e F_z nos sentidos apresentados conforme as orientações dos eixos (x,y,z) pensando em um capacitor de placas paralelas conforme a imagem 2.1. Segundo Milani (1998), as forças F_w e F_l (F_x e F_y) indicam que, ao se deslocar uma placa em relação às outras, haverá uma força que tenderá a realinhá-las. Os valores dessas forças só estão corretos se desconsiderar os efeitos de bordas.

A Equação 2.4 apresenta a F_z que é a força no sentido z, esta força que tende causar o encontro entre as duas placas de um capacitor, caso alguma delas ou as duas fosse móvel, usando essa ideia de atração ente as placas que possibilitaria a suspensão de uma delas, entretanto é preciso considerar a força peso e analisar estabilidade desse sistema.

A estabilidade da suspensão será analisada primeiramente aplicando tensão a corrente contínua (CC) e posteriormente tensão a corrente alternada (AC). Pensando no primeiro caso em que temos um sistema como o da imagem 2.2, em que se aplica uma diferença de potencial entre o as placa de corrente contínua. Todas as placas no sistema são

condutoras, apenas a placa inferior não esta fixada, porem esta próxima das duas placas superiores. Esse conjunto de placas se comporta como dois capacitores em serie.

Figura 2.1:Exemplo de suspensão CC



Fonte: Milani (1998)

De acordo com Kumar et al. (1990), para que o sistema seja estável a derivada da somatória das na direção z que atuam sobre a placa móvel deve ser menor que zero. A placa movel esta sobre ação da força elétrica e a força peso. A equação 2.7 é derivada da Equação 2.6 com a distancia entre as placas podendo variar por se tratar de ser a placa móvel, com movimento em relação ao eixo z, por conta disso é usado a distancia entre as placas como (d-z).

$$\Sigma Fz = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \frac{\epsilon \cdot A \cdot (V^2)}{(d-z)^2} - mg \quad (2.6)$$

$$\left[\frac{d(\Sigma Fz)}{dz}\right]_z < 0 \quad (2.7)$$

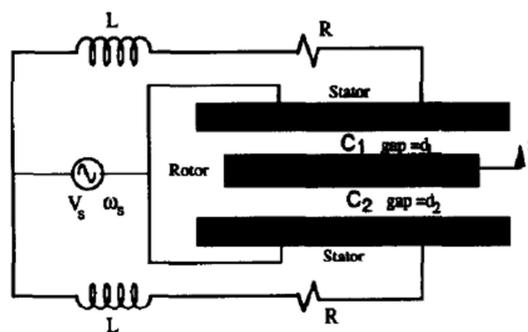
Resultando em:

$$\left[\frac{\epsilon A (V^2)}{d^3}\right] > 0 \quad (2.8)$$

A Inequação 2.6 não é satisfeita no caso do sistema sendo alimentado por uma tensão com corrente continua, portanto não esta de acordo com o critério necessário para que o sistema seja estável conforme dito por Kumar et al. (1990), conforme é apresentado pela Inequação 2.7. Então o sistema da imagem 2.2 não é estável quando é usado corrente continua (CC).

Analisando o segundo caso em que é submetida a uma tensão de corrente alternada entre as placas do capacitor. O sistema que será utilizado é um circuito RLC em serie exposto na imagem 2.3, o circuito anteriormente citado consiste de um resistor (R), um indutor(L), e um capacitor(C), conectados em série ou em paralelo.

Figura2. 2: Layout para suspensão CA



Fonte: Kumar et.al (1990)

A estabilidade do sistema esta relacionado com a frequência de ressonância, definida pela Equação 2.9. Primeiramente será exposta na Equação 2.8 a relação entre a voltagem da fonte (\tilde{V}_s) e a voltagem aplicada entre as placas do estator (\tilde{V}_c) quando é usada uma fonte de tensão a corrente alternada, conforme é apresentado pelo Kumar et. al. (1990), para que possa ser definida a força elétrica, que como apresentada pela Equação 2.5 depende da voltagem entre as placas do capacitor e posteriormente definir a condição de estabilidade do sistema.

$$\tilde{V}_c^2 = \frac{\tilde{V}_s^2}{[(LC(WS^2)-1)^2 - (RCWS)^2]} \quad (2.8)$$

Onde :

\tilde{V}_c é a voltagem RMS sobre o capacitor

\tilde{V}_s é a voltagem RMS aplicada pela fonte de corrente alternada

W_s é frequência gerada pela fonte

$$W_0 = (LC)^{-1/2} \quad (2.9)$$

Onde:

W_0 é frequência de ressonância;

L expressa a indutância do indutor do circuito;

C é a capacitância do micromotor levitado.

Segundo Kumar et. al. (1990), a força vertical nas placas será sempre atrativa com o a intensidade na voltagem RMS proporcional quadrado médio da amplitude da tensão da placa, devido a isso é usada à voltagem RMS em vez da voltagem comum. Para a levitação utilizando corrente alternada é definida a Equação da força sobre um rotor quando é utilizado dois estatores (placas fixas), segundo Kumar et al. (1990), que é o modelamento que será utilizado para definir as forças que atua sobre o rotor do micromotor levitado construído neste trabalho.

$$F_1 = \left[\frac{\epsilon A}{2(d_0 - z)^2} \right] \cdot \left\{ \frac{\tilde{V}_s^2}{[(LC_1(WS^2)-1)^2 - (RC_1WS)^2]} \right\} - mg \quad (2.10)$$

$$F_2 = \left[\frac{\epsilon A}{2(D_0 + z)^2} \right] \cdot \left\{ \frac{\tilde{V}_s^2}{[(LC_2(WS^2)-1)^2 - (RC_2WS)^2]} \right\} - mg \quad (2.11)$$

F_1 e F_2 são as forças que atuam sobre o rotor da perspectiva dos estatores de cima e de baixo, respectivamente. Portanto temos C_1 e C_2 referente à capacitância dos estatores superior e inferior, respectivamente. A força peso é considerada para os dois casos, por fim a força resultante sobre o rotor, portanto teremos:

$$F = F_1 - F_2 \quad (2.12)$$

Da mesma forma que foi feito com a Equação 2.7, devemos aplicar a condição de estabilidade para a Equação 2.12, aplicando a derivada da força sobre o rotor em relação ao eixo z no ponto de equilíbrio da suspensão elétrica, que por sua vez não será igual a $z=0$, será usado “zo” como posição de equilíbrio. É importante ressaltar que a posição de equilíbrio do rotor na configuração com dois estatores dependera da voltagem aplicada, e existe uma tensão mínima para tirar o rotor da inercia. Aplicando a condição teremos:

$$\left[\frac{d(\Sigma F)}{dz} \right]_{z = z_0} < 0 \quad (2.13)$$

Conforme demonstrado por Kumar et. al. (1990), teremos que a condição de equilíbrio para que a suspensão elétrica será:

$$(W_s^2) \left[L \left(\frac{\epsilon A}{d_0} \right) \right] > 1 \quad (2.14)$$

É conhecido que:

$$W_{no} = \left[L \left(\frac{\epsilon A}{d_0} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

Onde:

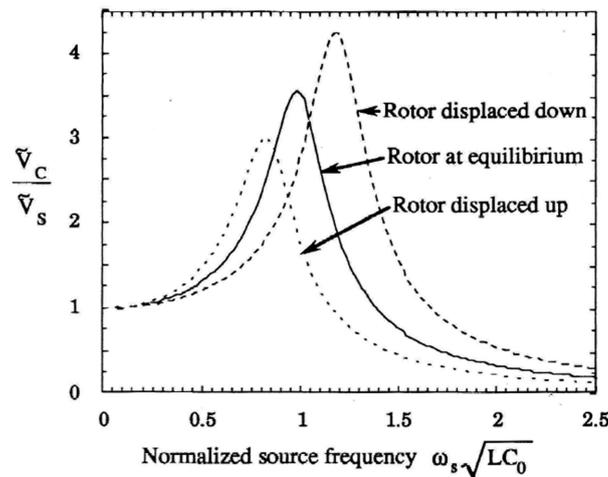
W_{no} é a frequência de ressonância na distancia de equilíbrio “do”

Manipulando a condição de equilíbrio e encontraremos:

$$\bar{W}_0 \equiv \frac{W_{no}}{W_s} < 1 \quad (2.16)$$

A Equação 2.16 é a forma final da condição de estabilidade para a suspensão definida por Kumar et. Al.(1990), dessa forma \bar{W}_0 defini a relação entre a frequência de ressonância e a frequência da fonte. Portanto para que o sistema seja estável a frequência da fonte (W_s) deve ser maior que a frequência de ressonância na posição de equilíbrio, conforme é apresentado pela figura 2.4.

Figura2..3:Variação da tensão através das placas do capacitor em função da separação



Fonte: Kumar et.al (1990)

Quando a condição de estabilidade é atendida a força elétrica se comportara como uma força regenerativa, dessa forma quando a distancia da placa móvel estiver abaixo de sua posição de equilíbrio, teremos a capacitância C_1 diminuindo e C_2 aumentando, como consequência $\tilde{V}c_1$ aumentara e em contra partida $\tilde{V}c_2$ diminuirá, como podemos analisar nas equações 2.10 e 2.11, a tensão entre as placas do capacitores são diretamente proporcionais a força elétrica de atração, portanto F_1 sofrera aumento e F_2 diminuição, como consequência final a força resultante sobre o rotor terá modulo positivo, sentido no eixo z e direção para cima, buscando recolocar a placa móvel em sua posição de equilíbrio. Analogamente, caso a o rotor estiver acima da sua posição de equilíbrio a força resultante vai atrai-lo para baixo, para sua posição de equilíbrio. Portanto se conclui que a suspensão elétrica quando aplicada a tensão a corrente alternada é estável.

Usando a condição de estabilidade é possível encontrar o valor da indutância do indutor do circuito RLC, manipulando a Equação 2.17, teremos:

$$L = \frac{1}{[(\bar{W}o \omega_s)^2 \cdot C_o]} \quad (2.17)$$

C_o é a capacitância no ponto de equilíbrio.

A Equação 2.17 mostra a relação entre a indutância L e a frequência fornecida pela fonte, portanto quanto maior o L menor poderá ser a frequência de ressonância portanto é preciso aplica menos frequência pela fonte para atender a condição de estabilidade 2.16 e o contrario também é verdade, quanto menor o L maior devera ser o ω_s . Esta relação 2.17 foi utilizada no dimensionamento do indutor que é utilizado no Micromotor.

Segundo Kumar et. al. (1990), uma das grandes dificuldades de construir um micromotor levitado esta na grande presença de capacitância parasita. A capacitância parasita é uma capacitância indesejada que pode existir em circuitos, principalmente em altas frequências que é o caso desta aplicação. Desta forma é necessário considerar essa a capacitância parasita (C_p) nos cálculos de força e na obtenção da condição de equilíbrio, C_p é considerada como uma capacitância em paralelo no circuito, portanto o novo valor da capacitância será $C = C_o + C_p$. Será apresentada a condição de estabilidade para caso de $C = C_p$, teremos:

$$\frac{1}{[L(C_o + C)]} < \omega_s^2 < \frac{1}{LC_p} \quad (2.18)$$

Assim teremos novos limites para $\bar{W}o$ que serão:

$$\frac{1}{\sqrt[3]{2}} < \bar{W}o < 1 \quad (2.19)$$

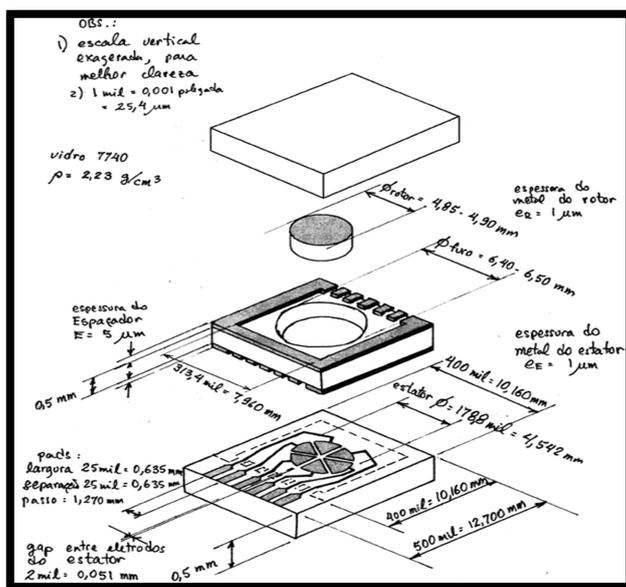
Portanto para o caso de $C_p = C$ é obtido novos limites para $\bar{W}o$, que devem ser respeitados para que a suspensão seja estável. Para que evitar a presença de capacitância parasítica no circuito utilizado para alimentar o micromotor deve ser bem isolado.

Além dos conceitos para teóricos para estabelecer o sistema elétrico necessário para estabelecer a suspensão elétrica do rotor do micromotor levitado. Foi necessário consultar os capitulos 5-*Photolithography* e 6-*Metallization, Interconnections and Packaging* do livro *Na Introduction to Semiconductor Microtechnology* para determinar as formas para construir o micromotor usando processos de microfabricação.

3 Processos Para construção do Construção Do Micromotor

O micromotor levitado foi projetado usando os conceitos teóricos desenvolvidos por Kumar et. al.(1990) e guiado pelo capítulo 9 – um primeiro experimento, da tese do Paulo G. Milani (1998). O projeto e as dimensões do micromotor foram definidos anteriormente por outros colegas alunos. A imagem 3.1 apresenta a visão explodida do micromotor com as dimensões das peças.

Figura 3.1: Visão explodida do micromotor proposto.



Fonte: Senna (2021)

O vidro o “pirex” 7740, representado pelas peças brancas na imagem 3.1, foi escolhido como substrato para realizar a litografia e formar a parte estrutural do micromotor levitado, por ser transparente, para facilitar a visualização do sistema funcionando, por possuir baixa rugosidade e alta planicidade. Outro motivo para a escolha do “pirex” 7740 é devido à possibilidade de ser feito solda anódica entre o vidro e os filmes de metal para a fixação das partes umas as outras. As peças de “pirex” 7740 passaram pelo processo de limpeza RCA, que utiliza soluções químicas que garantem a menor contaminação por impurezas e gorduras. Este processo irá garantir a qualidade do processo posterior, a metalização, pois com a superfície devidamente limpa temos uma melhor aderência do metal e uniformidade da camada aplicada.

O procedimento da limpeza RCA foi feito em uma capela química, e será descrito em três etapas, são elas:

- a)- Imersão das laminas de vidro em um béquer com solução $H_2SO_4 + H_2O_2$, na proporção 2:1, em temperatura ambiente pois esta reação é

exotérmica, por 10 minutos e depois lavagem por dois minutos em água DI. Esta solução elimina a gordura presente nas lâminas;

b)- Imersão das laminas de vidro em um béquer com solução $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$, na proporção 1:5:1, na temperatura de 70°C , por 10 minutos e depois lavagem por dois minutos em água DI. Esta solução elimina a gordura presente nas lâminas;

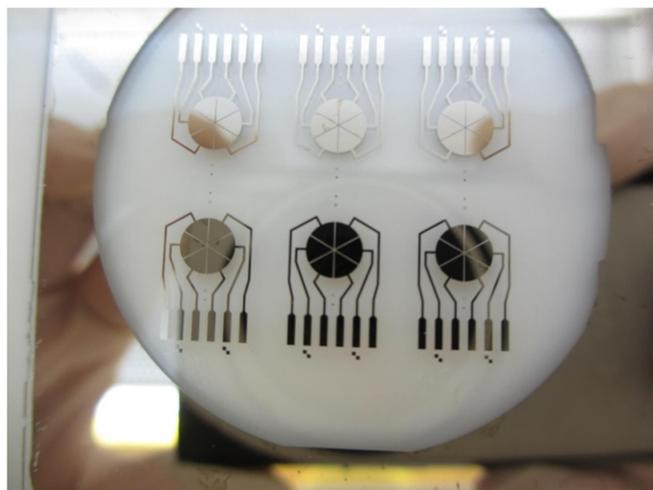
c)- Imersão das laminas de vidro em um béquer com solução $\text{HCl} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$, na proporção 1:6:1, na temperatura de 70°C , por 10 minutos e depois lavagem por dois minutos em água DI. Esta solução elimina os metais presentes na lamina;

Após o termino deste processo as laminas foram secas com N_2 e a guardadas em recipiente apropriado para que não fique exposta a impurezas do ar e gordura. Este recipiente somente poderá ser aberto em fluxo laminar.

Foram limpas seis laminas de vidro “pirex” 7740 pelo processo RCA, as dimensões das laminas são: 0,5 mm de espessura, 500 mm de comprimento e 400 de largura. As laminas 1, 3 e 4 foram metalizadas em apenas uma face, para ser feito litografias dos estatores, e as laminas 2 e 6 foram metalizadas nas duas faces para ser produzidos o espaçadores e rotores. A lamina 5 foi deixada de reserva e também foram metalizadas algumas laminas de microscópio para serem usadas de teste.

As laminas foram metalizadas no (IEAV), com $0,02 \mu\text{m}$ de cromo direto no vidro, pois este metal proporciona uma boa aderência no vidro e com outros metais, além de ser simples de ser retirado usando com HCl . E sobre o cromo foi depositado um filme fino de um $1 \mu\text{m}$ de níquel. Conforme é mostrado na imagem 3.2.

Figura 3.2:Lamina metalizada com os estatores impressos.



Fonte: Autor (2021)

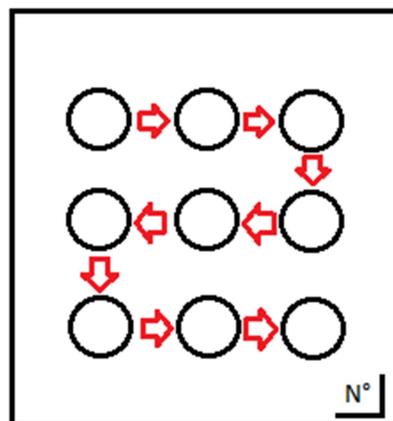
Os rotores e o espaçadores foram feitos usando as laminas 2 e 6, metalizadas nas duas faces, pois os rotores devem ter metalização nas duas faces. Para os espaçadores a metalização das duas faces não é vantajosa, pois pode gerar capacitância parasita que

limita o funcionamento do dispositivo. Os rotores foram retirados das laminas usando serra copo diamantada, em apenas um processo é produzido o espaçador e o rotor.

O processo de furação é composto por cinco etapas, apresentadas a seguir:

- a) Usou-se um paralelepípedo de alumínio, como suporte para possibilitar a fixação na fresa, foi usada cera de abelha para fixar o bloco de alumínio a uma placa de vidro “pirex” 7740 como suporte para a furação, a placa de vidro é usada para que a broca não chegasse ao bloco de alumínio e danifique a broca. É necessário colocar o bloco de alumínio na chapa quente, colocar a cera sobre o bloco para que ela amolecesse, foi espalhada com uma haste de vidro para formar um filme de cera e colocado à placa de vidro usada de suporte sobre o bloco de alumínio;
- b) O mesmo procedimento anterior de fixação com cera de abelha na chapa quente, foi usado para fixar as laminas 2 e 6 metalizadas nas duas faces, sobre a placa de vidro de suporte;
- c) A montagem das placa feita nas etapas anteriores foi posicionada na fresa e furada por um técnico mecânico. Usou-se uma broca serra copo diamantada com 4,9 mm de diâmetro e rotação de 950 RPM, a furação foi feita com avanços de 25 μm , ate passar espessura da lamina metalizada de 0,5 mm e mais um avanço de 25 μm na lamina de vidro de suporte. O primeiro furo foi posicionado de forma manual, os próximos furos foram feitos usando o alinhamento da fresa, conforme a sequencia e espaçamento da imagem 3.3;

Figura 3.3:Ordem da furação das laminas metalizadas



Fonte: Autor (2021)

- d) Os rotores foram retirados de dentro da broca serra copo ou mesmo após a furação ou continuaram coladas na placa de vidro de suporte, que foram retiradas na etapa seguinte;

- e) As laminas furadas são retiradas colocando a montagem do bloco de alumínio/placa de vidro de suporte/placa metalizada na chapa quente para amolecer a cera de abelha e ser possível retirar a placa de metalizada.

Os rotores e as laminas de espaçamento foram limpas colocando em tricloroetileno fervido, seguido acetona pura, aquecida a 56°C (temperatura de ebulição da acetona), posicionada de forma a serem exposta apenas ao vapor da acetona e finalizando colocado em isopropileno fervido, para limpar os resíduos de cera. Para limpeza dos rotores foi feito um suporte de teflon para manter posição de cada rotor em relação a sua origem na placa de vidro, da mesma forma foi mantido a posição dos rotores ao guardar os rotores.

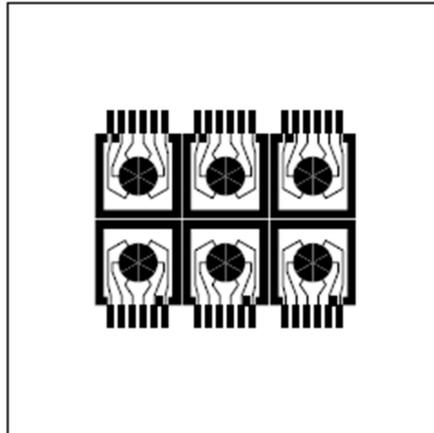
É importante saber a qual posição da lamina de vidro cada do rotor teve origem, por que a lamina “pirex” 7740 não são perfeitamente planas, então é importante manter o rotor nas posições de origem, pois as deformações na espessura dos rotores são as mesmas das posições de origens.

Os estatores foram produzidos nas laminas 1,3 e 4, estas foram metalizadas apenas uma face. Os padrões dos estatores apresentados na imagem 3.4, foram gravados nas laminas por meio de litografia. O processo de litografia dos estatores foi feito em 8 etapas, apresentadas abaixo:

- a) Consiste no espalhamento de fotoresiste sobre a lamina de “pirex” 7740 na face metalizada. Primeiramente a lamina é fixada no cabeçote do *spinner* por meio de vácuo e então colocado o fotoresiste. O *spinner* foi configurado para girar a 3000 RPM por trinta segundos para formar o filme fino ideal;
- b) Após o espalhamento do resiste de forma satisfatório as laminas são colocadas na estufa com temperatura aproximada de 100°C por 5 minutos, processo chamado de pré- *bake*. Ao saírem da estufa as laminas devem ser deixadas esfriar por alguns minutos até atingir a temperatura ambiente;
- c) Posicionamento da máscara com o padrão do estator na fotoalinhadora, é importante certificar que a emulsão da máscara esteja posicionada de forma a entrar contato com o filme de resiste (para baixo). É necessário ligar a lâmpada ultravioleta algumas horas antes para que estabilize;
- d) Colocar a lamina com fotoresiste na fotoalinhadora, a face da lamina com resiste deve ficar voltada para máscara (para cima), a máscara deve ser encostada com a lamina, e fazer o alinhamento com os limites da lamina;
- e) Com a fotoalinhadora pronta, se aciona o ultravioleta para gravar o padrão do estator no filme de resiste da lamina;
- f) Depois da exposição da lamina ao ultravioleta, ela deve ser revelada. Dessa forma a lamina deve ser mergulhada no revelador MF-319 por um minuto fazendo movimento circulares e de sobe e desce ajudando a retirar o resiste;

- g) Lavar a lamina revelada em agua DI por dois minutos e secada com N2;
- h) Pós-bake, consiste em colocar a lamina por 20 minutos em um forno aquecido a 100°C, para fixar o resiste a lamina.

Figura 3.4: Padrão dos estatores com espaçadores.



Fonte: Senna (2021)

Ao finalizar o processo de litografia temos gravado o padrão dos estatores sobre a metalização com fotoresiste, então seguimos para processo de corrosão dos filmes níquel e cromo que não esta coberta por resiste, para transferirmos o padrão, apresentado na imagem 3.4, para o filme de metal. A corrosão dos níquel e do cromo são fitas por diferentes soluções. O processo de corrosão do filme do metal e retirada do fotoresiste foi realizado em 3 etapas apresentadas a baixo:

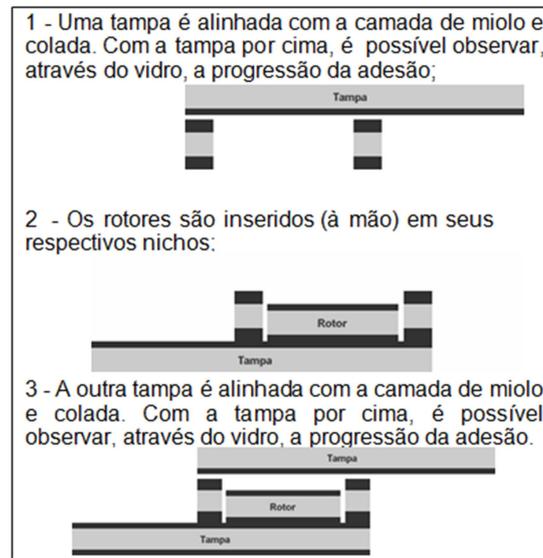
- a) Corrosão do níquel: foi preparada uma solução com 6,1% em massa de cloreto de ferro III em um béquer de polipropileno, a lamina metalizada foi colocada na solução usando uma barqueta de teflon por 47 segundos e então lavada por 2 min em agua DI corrente.
- b) Corrosão do cromo: Colocou-se HCl puro(direto da garrafa) em um béquer, então a lamina como níquel já corroído foi colocada no acido por aproximadamente 35 segundos, e depois lavada em agua DI por 2 min.
- c) Retirada do resiste: A lamina já com o padrão dos resistores gravados sobre o filme de metal foi colocada em uma barqueta de teflon e dentro de um béquer com acetona pura, de forma que ao ferver a acetona a lamina ficasse exposta apenas ao vapor da substancia. Este processo é feito ate a retirada total do resiste.

Após a gravação dos padrões dos estatores é importante analisar a as laminas para procurar se houve alguma trilha com curto circuito ou interrompida, isso ocorreu em uma das laminas em que foi gravado o padrão dos estatores. O processo de corrosão do níquel e cromo foi feito nos espaçadores (com as laminas 2 e 6), pois foi escolhido não

usar solda anódica como forma de fixação do dispositivo para evitar a criação de capacitância parasítica.

Com todas as peças do dispositivo prontas foram cortadas usando uma serra diamantada para vidro, em “tabuas” com 3 partes dos dispositivos alinhados para facilitar os testes. Em seguida foi realizada a montagem e fixação das partes. A montagem pode ser visualizada pelo esquema da imagem 3.6. A tampa são as laminas com os padrões dos estatores gravados. A colagem das partes foi feita usando resiste, e após o alinhamento e aplicação do resiste ele foi endurecido colocando 20 min em um forno a 80 graus centígrados.

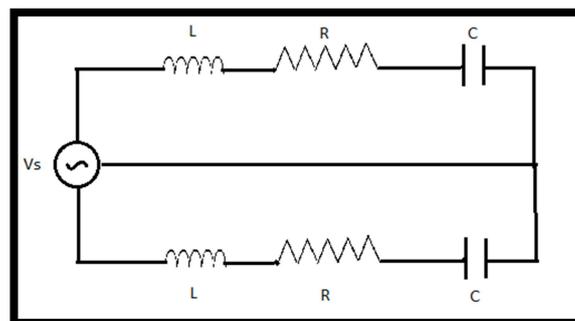
Figura 3.5: Esquema da montagem do micromotor.



Fonte: Senna (2021)

A construção do circuito para o acionamento do micromotor foi feito buscando ter a menor capacitância parasita possível, portanto após alguns testes, foi montado um circuito no ar, apenas com os fios e os componentes, para evitar a proximidade com qualquer superfície metálica. O circuito está apresentado na imagem 3.6. “O circuito foi soldado nos “pads” dos estator usando fios com espaçamento próximo aos dos” pads”.

Figura 3.6: Representação do circuito Montado.



Fonte: Autor (2021).

O circuito apresentado na imagem anterior é um circuito RLC foi conectado a uma fonte de corrente alternada Minipa MFG-4210, que possui um conector coaxial fêmea na saída da fonte, portanto foi utilizado um conector coaxial macho para ligar o circuito. Os fios foram soldados ao pino de sinal e na carcaça do conector coaxial macho.

Foi implementado uma associação de 5 indutores em serie que juntos apresentam uma indutância efetiva de 5 mH. A associação de indutores foi necessário para facilitar manter a frequência de ressonância, apresentada na Fórmula 2.7, em um valor razoável abaixo de 10 Mhz, que é a frequência máxima da fonte de corrente alternada usada. A resistência usada foi à resistência do próprio circuito e do micromotor, que serão apresentadas nos resultados.

4 Resultados

Nos resultados serão apresentados às medidas e testes feitos no desenvolvimento do micromotor, e então os cálculos e gráficos da levitação usando as medidas e os parâmetros dos equipamentos e do projeto.

A resistência do circuito foi medida após a sua montagem completa, porém sem o dispositivo estar conectado. Ao medir a resistência do circuito usando um multímetro foi obtida uma resistência de 26.7 ohms. A resistência do dispositivo foi medida após a soldagem dos fios aos *pads* do estator, a medição foi feita entre a ponta do fio soldado e o estator correspondente. Como os estratores foram ligados em serie dois a dois, portanto temos três resistências, são elas 63.3 Ohms, 44.7 Ohms e 63.4 Ohms, que tem como resistência resultante 18.7 Ohms. Portanto a resistência Efetiva do circuito é 45.3 Ohms.

Com tudo montado, foi ligado o circuito a fonte de corrente alternada e a um osciloscópio para monitoramento dos das frequências e voltagens que estão sendo aplicadas ao sistema. Foi feito uma medição da saída da fonte, para saber a voltagem RMS da saída da fonte (\tilde{V}_s), a voltagem media e frequência fornecida ao circuito ($f_s = W_s/2\pi$).

A segunda ponta de prova foi colocada logo antes do dispositivo e no terra pra mediar a voltagem RMS do micromotor (\tilde{V}_c). Essa medida foi usada para encontrar a as medidas de ressonância do sistema RLC, e ser possível calcular a capacitância total do sistema ($C_t = C + C_p$) e também conseguir calcular a capacitância parasítica (C_p). O calculo para a capacitância total do circuito foi feita usando uma manipulação da Equação 2.9, dessa forma temos:

$$C_t = \frac{1}{4\pi^2 L (f_o)^2} \quad (4.1)$$

Onde f_o é a frequência de ressonância do circuito.

E por consequência obtemos a capacitância parasítica C_p , pela Equação abaixo:

$$C_p = C_t - C \quad (4.2)$$

Onde a C é a capacitância do micromotor.

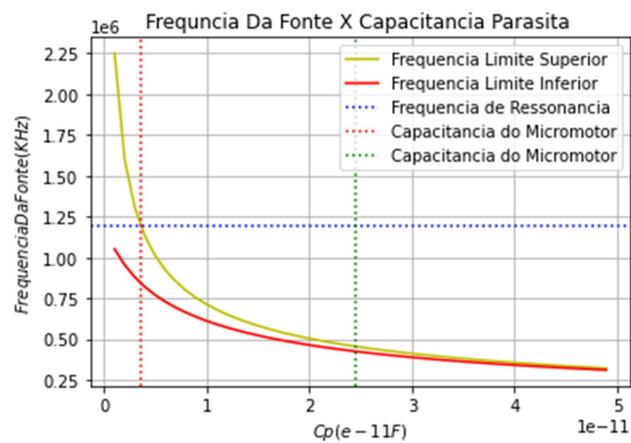
A Capacitância parasítica variava com frequência devido à disposição dos fios, a proximidade dos fios as peças metálicas do microscópio, devido à ponta de prova e outras possíveis fontes. Portanto a medida da ressonância do circuito para o cálculo da capacitância parasita foi feita toda vez que foi tentado fazer o micromotor funcionar, buscando uma maior precisão.

A distancia entre o rotor e o estator foi feito usando o microscópio que possui escala micrométrica. A medição foi realizada usando a objetiva com aumento de 50 vezes, para focar no rotor e marcar a distancia do foco, fazendo um movimento em apenas uma direção a partir de uma grande distancia do foco evitar a folga entre as engrenagens para maior precisão da medida, andando com o foco na mesma direção o microscópio foi focado no estator e marcado a distancia do foco. Dessa forma a distancia entre o estator e o rotor (d) foi calculada por meio da variação entre as distancias dos focos do microscópio. Esse processo foi feito varias vezes para confirmar a medida da distancia.

Então foram obtidas todas as medidas necessárias para iniciar os testes da levitação, foi construído um dispositivo com apenas o estator superior, como a imagem 2.3. Foi usado a condição de estabilidade proposta por Kumar et.al (1990) apresentada na Inequação 2.18 que é derivada da condição de estabilidade primaria apresentada pela Inequação 2.16. Porém não foi possível realizar a levitação usando os parâmetros de estabilidade apresentados por Kumar et.al (1990).

A figura 4.1 apresenta um gráfico da Inequação 2.18, de forma que o eixo x é a variação da capacitância parasita (C_p) e o eixo y apresentando a variação da frequência da fonte (W_s).

Figura 4.1: Gráfico d frequência exigida pela para diferentes valores de capacitância parasítica para levitação estável.



Fonte: Autor (2021).

Aplicando a frequência da fonte dentro da banda de frequência apresentada pelo gráfico 4.1, com a capacitância parasita atual de todo o circuito de 25.6 pF, apresentado pela linha pontilhada vertical verde, não foi possível realizar a levitação pois entra em

conflito com a condição de estabilidade 2.16, por que a frequência gerada pela fonte será menor que a frequência de ressonância (W_{no}) do micromotor.

A levitação será estável quando a capacitância parasita for igual ou menor a capacitância do micromotor, pois dessa forma a banda de frequência permitida terá uma região que estar acima da frequência de ressonância do micromotor, que no gráfico esta apresentada na região do gráfico que esta antes da linha pontilhada vertical vermelha que apresenta a capacitância do micromotor levantado. E não se conseguiu reduzir a capacitância parasítica do sistema para os valores necessários.

Para tentar feito uma tentativa de reformular as condições de estabilidade analisando a condição de estabilidade primaria, Inequação 2.15, e a afirmação feita por Kumar et.al (1990) na Inequação 2.18, encontrei uma outra forma de expressar a condição de estabilidade, apresentada a seguir:

$$\frac{1}{\sqrt[2]{1+t}} < \bar{W}0 < \frac{1}{\sqrt[2]{t}} \quad (4.3)$$

A variável t é a relação entre Cp e Co, apresentada abaixo:

$$t = \frac{Cp}{Co} \quad (4.4)$$

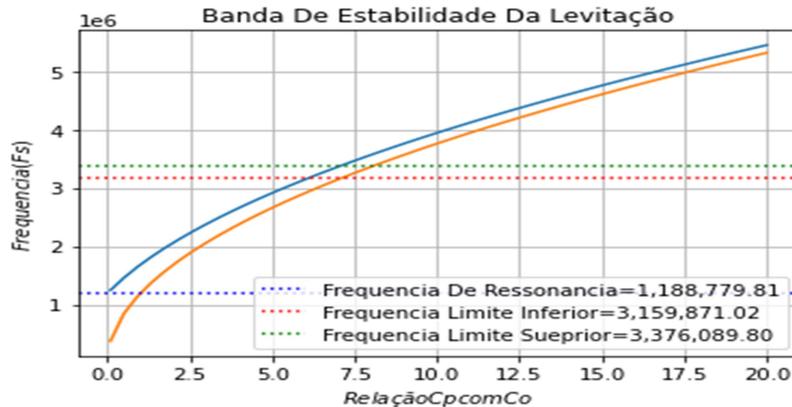
Dessa forma usando a Equação 4.3 é possível relacionar a frequência de ressonância do dispositivo com a frequência fornecida pela fonte usando a condição 2.16.

$$\frac{W_{no}}{\sqrt[2]{1+t}} > W_S > \frac{W_{no}}{\sqrt[2]{t}} \quad (4.5)$$

Considerando a discussão apresentada na revisão bibliográfica temos que a levitação somente é estável se a frequência fornecida pela fonte for maior que a frequência de ressonância do micromotor (W_{no}). Se considerarmos a condição 2.18, teremos uma frequência fornecida pela fonte que para todos os valor de capacitância parasita maior que a capacitância do micromotor estará abaixo da frequência de ressonância do dispositivo, que feri a condição de estabilidade 2.18.

A figura 4.2 apresenta as curvas que definem a banda de estabilidade da levitação, que se encontra entre as curvas continuas azul e laranja, conforme apresentado pela Inequação 4.5. É possível ver que a banda de estabilidade esta acima da frequência de ressonância do dispositivo, apresentada pela legenda como a linha pontilhada azul.

Figura 4.2: Banda de estabilidade da levitação.



Este gráfico foi plotado usando a condição de estabilidade encontrada pelo autor, Inequação 4.5. Porém esta condição se mostra inviável pois não gera uma força alta suficiente para proporcionar a suspensão do rotor.

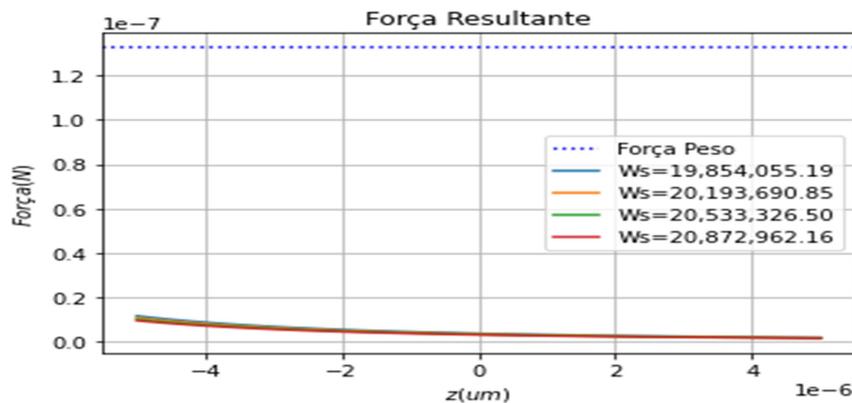
Fonte: Autor (2021).

A figura 4.2 também apresenta os limites de estabilidade para o rotor a uma distancia de $10\mu m$ do estator, e com uma capacitância parasítica de $25.33\rho F$. Por tanto temos que a relação $t = 7.065$, dessa forma temos que as frequências limites serão:

$$3,376MHz > F_s > 3,159MHz \quad (4.6)$$

A condição 4.5 apresentada acima esta acima da frequência de ressonância (W_{no}) para vários valores de capacitância parasita. Usando a condição 4.5 para definir os limites para frequência da fonte foi possível movimentar o rotor. Aplicado 8 volts RMS (\tilde{V}_s) não foi possível vencer a força peso, apenas a força de atrito entre o rotor e o vidro de base, então o rotor realizou um movimento de giro mas não levitou.

Figura 4.3: Força resultante em relação à variação da posição do rotor.

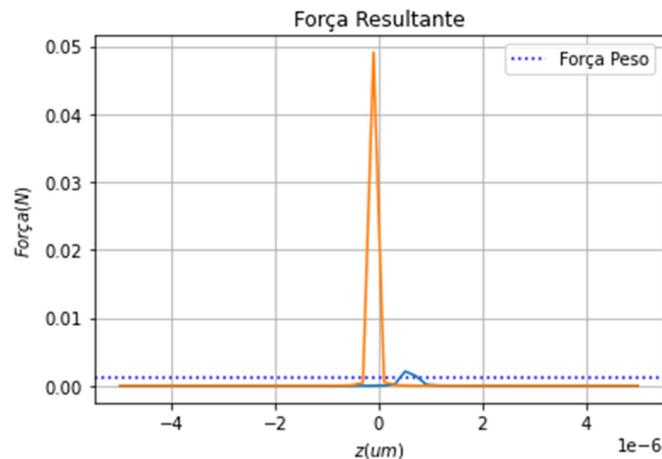


Força resultante sobre o rotor em relação à variação da posição mesmo, quando é usada a condição 4.5, proposta pelo autor. É possível perceber que não é gerado força elétrica o suficiente para equilibrar com a força peso, isso se deve frequência fornecida estar muito acima da frequência de ressonância do micromotor.

Fonte: Autor (2021).

A figura 4.3 apresenta a força elétrica que atua sobre rotor quando se aplica frequências dentro dos limites apresentado pela Inequação 4.6, e podemos ver claramente que usando quaisquer frequências dentro desse gap não é possível vencer a força peso quando aplicado 8 volts RMS, que é a máxima voltagem RMS fornecida pela fonte utilizada. Por conta desse fato ficou claro que a condição de estabilidade 2.18 é a que realmente possibilita o funcionamento do micromotor, pois quanto mais próximo a frequência da fonte (ω_s) estiver próxima da frequência de ressonância maior a força elétrica que atuara sobre o rotor em uma mesma voltagem RMS.

Figura 4.4: Força resultante em relação a posição do rotor.



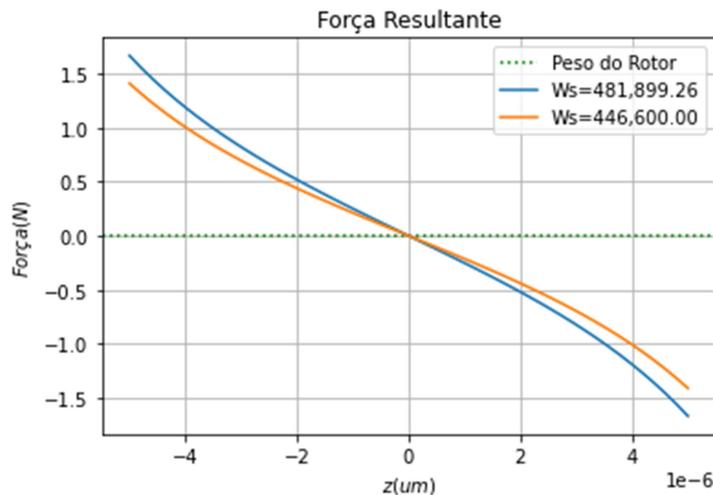
Este gráfico utilizada a Equação 2.10 para plotar o gráfico, a condição de estabilidade proposta por Kumar et.al (1990). É possível perceber que a força elétrica em duas posições do rotor. Curva Laranja esta 481,899.26 Khz; Curva azul 446,600.00 Khz.

Fonte: Autor (2021).

Na figura 4.4 foi plotado usado a Equação 2.10, que relaciona a posição do rotor em relação ao estator com a força que atua sobre o próprio rotor. Usaram-se as frequências limites definida pela condição de estabilidade 2.18. Portanto a curva laranja esta usando 481,899.26 Khz e a curva azul esta aplicada a uma frequência de 446,600.00 Khz, limites estes que foram encontrados a partir usando a capacitância parasita 21.8pF medida. É possível averiguar no gráfico acima que usando a condição 2.18 existem pontos em que a força elétrica se equilibra com a força peso, porém com o valor atual de capacitância parasita não é possível estabilizar essa levitação.

Considerando um dispositivo completo, portanto com estatores superior e inferior, como a figura 3.1, e aplicando os limites de frequência conforme a Inequação 2.18 e estimando que o sistema tivesse a mesma capacitância parasita de 21.8 pF e aplicando 8 volts RMS. Podemos ver os resultados no gráfico abaixo.

Figura 4.5: Força resultante em relação à posição rotor para um micromotor com estatores superior e inferior.



Fonte: Autor (2021).

Com a configuração com estatores superior e inferior o micromotor deve conseguir funcionar independente da força da gravidade que atue sobre ele, portanto poderia ser utilizado em lugares com diferentes valores de aceleração da gravidade.

5 . Discussão

A busca pelo por construir um micromotor capacitivo com placa móvel operante possibilitou entender melhor a dinâmica da levitação, e também foi possível entender os pontos cruciais e limitantes do projeto.

Os resultados obtidos estão de acordo com as ideias propostas por Kumar et.al (1990), apenas a o calculo da capacitância difere do que foi proposto por Kumar, pois quando considerando que em cada par de estator é se comporta são dois capacitores em serie, seguindo a associação em serie de capacitores temos que a capacitância equivalente tenha um fator de dois dividindo, e devido a existência de dois capacitores em é necessário considerar que cada placa do capacitor tenha metade da área, e assim teremos como resultado que a capacitância do micromotor terá por fim um fator de 4 dividindo a capacitância proposta por Kumar et.al (1990), essa Equação foi corrigida em seu artigo publicado por Kumar em 1992 chamado “*Experimental Study of Electric Suspension for Microberings*”.

Em relação à alta resistência no micromotor, foram medidas as resistências de cada pétala do estator com e sem os fios soldas e foi possível averiguar que a alta resistência é proveniente da metalização, portanto seria importante testar outras configurações de estatores para encontrar uma que possua resistência menor. Outra opção seria aumentar a espessura da metalização em si.

Mas analisando os resultados obtidos e os gráficos sobre a levitação, podemos concluir que nos protótipos construídos o limitante que não possibilitou a levitação estável é a grande capacitância parasítica existente nos circuito e no micromotor. A capacitância parasítica limita a condição de estabilidade da levitação e também a força elétrica

gerada. Foi este parâmetro que não possibilitou a levitação, pois ainda não se conseguiu baixar a capacitância parasítica para valores iguais ou menores a capacitância do micromotor, dessa forma não foi possível aplicar força suficiente para levantar o rotor, foi possível apenas força elétrica para vencer a força de atrito do rotor com o vidro.

6 . Conclusão

O trabalho foi realizado, entretanto a levitação propriamente dita ainda não foi alcançada, entretanto foi possível entender qual foi a condição que impediu que não tivesse ocorrido a levitação. A capacitância parasítica presente no circuito e no micromotor estava maior que a capacitância do próprio micromotor, portanto a levitação não foi estável. Para trabalhos futuros sobre esse tema aconselho se concentrar na construção de um circuito RLC com baixa capacitância parasítica, que para que possibilite a levitação deve ser menor ou igual à capacitância do micromotor. Acredito que o trabalho foi proveitoso para afunilar em quais são as maiores dificuldades na construção e funcionamento do micromotor.

7 . Referencias

KUMAR, S.; CHO, D.; CARR, W.. A proposal for electrically levitating micromotors. **Sensors And Actuators A: Physical**, [S.L.], v. 24, n. 2, p. 141-149, jul. 1990. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0924-4247\(90\)80019-2](http://dx.doi.org/10.1016/0924-4247(90)80019-2).

KUMAR, S.; CHO, D.; CARR, W.N.. Experimental study of electric suspension for microbearings. **Journal Of Microelectromechanical Systems**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 23-30, mar. 1992. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/84.128052>.

MILANI, Paulo Giácomo. **Análise de Suspensões Elétricas Para Microsensores e Microatuadores**. 1998. 120 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Tecnologias Espaciais, Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, São José dos Campos, 1997. Cap. 10.

MORGAN, David Vernon; BOARD, Kenneth. Photolithography. In: MORGAN, David Vernon. **An Introduction to Semiconductor Microtechnology**: kenneth board. 2. ed. New York: The Open University, 1990. Cap. 9. p. 1-208.

MORGAN, David Vernon; BOARD, Kenneth. Metallization, Interconnections and Packaging. In: MORGAN, David Vernon. **An Introduction to Semiconductor Microtechnology**: kenneth board. 2. ed. New York: The Open University, 1990. Cap. 9. p. 1-208.