



ESTUDO E MODELAGEM DE CAPACITORES VARIÁVEIS COMPLEMENTARES
MULTINÍVEIS POR VIBRAÇÃO EM DOIS EIXOS PARA COLETA DE ENERGIA
MECÂNICA VIBRACIONAL

Luiz Carlos Macedo de Oliveira Filho

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Antônio Carlos Moreirão de
Queiroz
Carlos Fernando Teodósio Soares

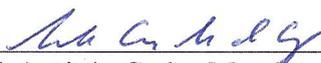
Rio de Janeiro
Setembro de 2019

ESTUDO E MODELAGEM DE CAPACITORES VARIÁVEIS COMPLEMENTARES
MULTINÍVEIS POR VIBRAÇÃO EM DOIS EIXOS PARA COLETA DE ENERGIA
MECÂNICA VIBRACIONAL

Luiz Carlos Macedo de Oliveira Filho

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

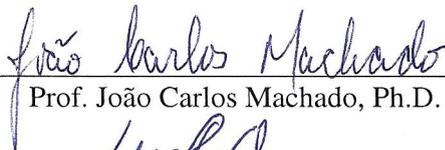
Examinada por:



Prof. Antônio Carlos Moreirão de Queiroz, D.Sc.



Prof. Carlos Fernando Teodósio Soares, D.Sc.



Prof. João Carlos Machado, Ph.D.



Prof. Luis Fabián Olivera Mederos, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
SETEMBRO DE 2019

Oliveira Filho, Luiz Carlos Macedo de
Estudo e Modelagem de Capacitores Variáveis
Complementares Multiníveis por Vibração em Dois Eixos
para Coleta de Energia Mecânica Vibracional/Luiz Carlos
Macedo de Oliveira Filho. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE,
2019.

XX, 114 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Antônio Carlos Moreirão de Queiroz
Carlos Fernando Teodósio Soares

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de
Engenharia Elétrica, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 89 – 93.

1. Coleta de Energia. 2. MEMS. 3. Impressão 3D. I.
Queiroz, Antônio Carlos Moreirão de *et al.* II. Universidade
Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia
Elétrica. III. Título.

*Para minha amada irmã, que me
inspira querer sempre desbravar o
conhecimento por nós dois.*

Agradecimentos

Gostaria de agradecer em primeiro lugar ao Povo Brasileiro por ter, ao longo de anos, fomentado uma universidade pública e cada vez mais popular. Que isto perdure, se intensifique com os anos que estão por vir e supere quaisquer adversidade pelo percurso. Agradeço também a instituição UFRJ e seus professores, que me permitiram cursar graduação e pós-graduação, sempre me agregando mais conhecimento. Em especial aos professores da COPPE pelo atual estágio de conhecimento que caminho, aos meus orientadores Antônio Carlos Moreirão de Queiroz e Carlos Fernando Teodósio Soares por me orientarem e cederem o vasto conhecimento que eles dispõem, guiando-me até o resultado final do mestrado. Agradeço ao professor Ricardo Michel do Instituto de Química por me auxiliar na construção do protótipo, cedendo as instalações, equipamentos e materiais do LabITAn e ser sempre tão solícito e atencioso nesse processo.

Agradeço também aos meus pais e irmãos que me incentivaram sempre, mesmo que isto fosse estar distante de casa. A minha mãe, pelo carinho, preocupação e acolhimento em momentos difíceis. Ao meu pai, pelo carinho amigo e por sempre se mostrar o mais orgulhoso entusiasta dos meus estudos. Ao meu irmão, pela amizade constante nesses anos, mesmo nos vendo menos pela distância, pelo arroubos cômicos que geram os risos sinceros para uma vida melhor. A minha irmã, por ser a âncora que preciso em momentos de tempestade e rebentação, não permitindo que eu desistisse, ou caísse, mostrando sempre um acalentador sorriso quando voltava para casa.

Aos amigos que trilharam comigo no mestrado em pequenos atos diários de confiança, camaradagem, empatia, alegria, que foram tão importantes. Aos amigos Breno Arosa e Gabriela Dantas por cursarmos o mestrado juntos, dividirmos as horas de almoço, ideias de pesquisa e descontrações tão necessárias. Ao amigo Rodrigo Frutuoso por ser valioso e sábio conselheiro acadêmico e de vida. Ao amigo Luis Beça por ser um grande entusiasta de minhas ideias. Agradeço especialmente a Paula da Silva Santos, carinhosamente Paulinha, pelos conselhos dados e tempo despendido em me escutar nos momentos mais difíceis, algo que não terei como retribuir e, sem o qual, não poderia chegar aqui, saiba que você está no meu coração e junto de minha família para sempre.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO E MODELAGEM DE CAPACITORES VARIÁVEIS COMPLEMENTARES
MULTINÍVEIS POR VIBRAÇÃO EM DOIS EIXOS PARA COLETA DE ENERGIA
MECÂNICA VIBRACIONAL

Luiz Carlos Macedo de Oliveira Filho

Setembro/2019

Orientadores: Antônio Carlos Moreirão de Queiroz

Carlos Fernando Teodósio Soares

Programa: Engenharia Elétrica

Apresenta-se, nesta dissertação, um estudo de uma nova estrutura eletromecânica para capacitores variáveis complementares, para aplicação em coleta de energia vibracional. O objetivo da estrutura é possibilitar sua fabricação em MEMS e que a estrutura possa realizar movimentos não convencionais, diferente como os vistos nas estruturas mais comuns na literatura. O protótipo é fabricado com impressão 3D usando ABS condutivo, assim pode-se observar comportamento eletromecânico e pensar em uma montagem em MEMS para a estrutura. Os circuitos usados são o Dobrador de Bennet, Unipolar de 2 Estágios e o Unipolar de 3 Estágios, tendo sua potência amostrada diretamente por um circuito amostrador de potência. O dispositivo demonstrou conseguir mover em mais de um eixo com liberdade e movendo de maneira não comportada, tendo conseguido atingir potência superior a $45 \mu W$ para este tipo de movimento, com frequência aproximada de $6 Hz$. Em outros casos mais comportado passou de $80 \mu W$ e com frequência de $11 Hz$.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

STUDY AND MODELING OF COMPLEMENTARY VARIABLE MULTILEVEL
CAPACITORS BY VIBRATION IN TWO AXIS TO VIBRATIONAL ENERGY
HARVESTING

Luiz Carlos Macedo de Oliveira Filho

September/2019

Advisors: Antônio Carlos Moreirão de Queiroz

Carlos Fernando Teodósio Soares

Department: Electrical Engineering

In this work, we present a study of a new electromechanical structure for complementary variable capacitors for application in vibrational energy harvesting. The purpose of the structure is to enable its fabrication in MEMS and that the structure can perform unconventional movements, different from the most common structures in the literature. The prototype is made with 3D printing using conductive ABS, so it is possible to observe the electromechanical behavior and the concept of a MEMS assembly for the structure. The circuits used are the Bennet Bender, 2-Stage Unipolar, and 3-Stage Unipolar, with their power sampled directly by a power sampler circuit. The device has been shown to be able to move on more than one axis freely and to move in a non-behavioral manner, being able to achieve power greater than $45 \mu W$ for this type of movement, with approximate frequency of $6 Hz$. In other cases more behaved went from $80 \mu W$ and with frequency of $11 Hz$.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xix
1 Introdução	1
1.1 Revisão Bibliográfica	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Metodologia	3
1.4 Organização do Trabalho	4
2 Construção Teórica	6
2.1 Conversão de Energia	6
2.2 MEMS	10
2.3 Impressão 3D e MEMS	12
3 Proposta e Coleta de Energia	14
3.1 Circuitos Usados	14
3.1.1 Dobrador de Bennet	15
3.1.2 Multiplicador Unipolar de Dois Estágios	16
3.1.3 Multiplicador Unipolar de Três Estágios	18
3.1.4 Circuito de Controle e Amostragem de Saída	20
3.2 Os Capacitores	21
3.2.1 Geometria	21
3.2.2 Forças Envolvidas	28
3.2.3 Construção no AutoCAD	30
4 Protótipo e Montagem	33
4.1 Impressão 3D Em Análise	33
4.1.1 Idealização e Resultado da Fabricação da Estrutura	33
4.1.2 Efeitos de Borda	35
4.1.3 Remodelagem	38
4.2 Montagem do Protótipo	40

4.2.1	Estrutura	40
4.2.2	Montagem dos Circuitos Multiplicadores de Tensão	44
5	Resultados	47
5.1	O Capacitor	47
5.2	Resultados das Máquinas Eletrostáticas	52
5.2.1	Dobrador de Bennet	52
5.2.2	Multiplicador Unipolar de Dois Estágios	58
5.2.3	Multiplicador Unipolar de Três Estágios	70
5.2.4	Comparação Entre os Circuitos	79
6	Conclusões	84
6.1	Comparação entre os Circuitos	84
6.2	Efeito Eletromecânico	85
6.3	Possível Implementação em MEMS	85
7	Discussões e Aplicações Futuras	87
7.1	Possível Implementação em MEMS	87
7.2	Perspectivas Futuras	88
	Referências Bibliográficas	89
A	Procedimento para Impressão 3D	94
B	Canton	108

Lista de Figuras

1.1	Diagrama que mostra os elementos envolvidos no processo de coleta de energia mecânica vibracional. O primeiro bloco representa a fonte de vibração que serve de estímulo mecânica para nosso sistema. O segundo bloco consiste no coletor de energia, que faz leitura do estímulo mecânico em estímulo elétrico, bem como sua potencialização e amostragem da tensão resultante nos níveis aceitos para o "Circuito de Saída" do terceiro bloco.	3
1.2	Etapas do ciclo do Dobrador de Bennet. A parte rachurada nas placas são dielétricos. Esta imagem pode ser vista com mais detalhes em [1].	4
2.1	Ilustração para o capacitor de placas paralelas. Em cinza temos as placas e azul um dielétrico entre as placas.	8
2.2	Exemplo de estrutura básica para capacitores com pentes interdigitados.	9
2.3	Imagem do protótipo desenvolvido em trabalho anterior [2].	9
2.4	Exemplo de estrutura básica para molas usada nas impressões 3D, sendo uma aproximação do que se usa em MEMS.	9
3.1	Esquemático do circuito Dobrado de Bennet. A versão utilizada foi construída sem a bateria, com o nó 1 sendo ligado a um capacitor de carga e conectada a um circuito conversor de tensão CC/CC.	15
3.2	A figura (a) mostra a parte da frente do circuito com os fios enumerados de acordo com os nós, a figura (b) mostra a relação da numeração dos nós do circuito.	16
3.3	Exemplo de possível saída dos circuitos multiplicadores de tensão usados neste trabalho. Este formato da onda é característico para os três circuitos estudados.	16
3.4	Esquemático do circuito Multiplicador Unipolar de Dois Estágios. Os pontos 4 e 4' ligam ao circuito de saída.	17
3.5	Circuito Multiplicador Unipolar de Dois Estágios utilizado nos experimentos.	17

3.6	Circuito básico para o Multiplicador de Cockroft-Walton de dois estágios, com V_{in} no lugar de C_{var}	18
3.7	Esquemático do circuito Multiplicador Unipolar de Três Estágios.	19
3.8	Circuito Multiplicador Unipolar de Três Estágios utilizado nos experimentos.	19
3.9	Esquemático do circuito controlador de tensão e para amostragem de saída.	20
3.10	Montagem do circuito controlador de tensão e para amostragem de saída.	21
3.11	Geometria desenvolvida anteriormente [2]. Note que ainda se baseia na ideia de pentes, com adição de dentes a cada haste do pente. Cotas feitas em milímetros.	22
3.12	Exemplo do disco vazado que poderia ser usado para extrair energia de movimentos rotacionais.	23
3.13	Padrão xadrez pensado para usar como capacitor de placas paralelas variáveis. Imagem retirada de [3].	23
3.14	Padrão das placas dos capacitores. Este padrão é constituído por 5 placas móveis, 3 placas fixas de padrão igual à placa móvel e 3 placas fixas de padrão espelhado.	26
3.15	Representação da defasagem entre dois tabuleiros espelhados, um em preto por cima e outro em azul por baixo. Note que, ao defasar, perdem-se duas colunas de sobreposição dos capacitores, diminuindo o valor de capacitância máxima.	26
3.16	Padrão das placas dos capacitores. Este padrão é constituído por 6 placas móveis, 3 placas fixas de padrão igual à placa móvel e 3 placas fixas de padrão espelhado.	27
3.17	Vista de cima de um modelo preliminar, com cotas estimadas em milímetros. A estrutura parece um favo de mel nesta perspectiva.	31
3.18	A figura (a) mostra a linha da borda inferior da placa e (b) mostra uma linha central da placa. Consegue-se notar a diferença da geometria com clareza fazendo essa separação.	31
4.1	Perspectiva isométrica do modelo base preliminar das placas, com cotas estimadas em milímetros.	34
4.2	Perspectiva isométrica da placa móvel preliminar, com cotas estimadas em milímetros e abas em destaque.	34
4.3	Perspectiva isométrica da placa fixa preliminar, com cotas estimadas em milímetros e abas em destaque.	35
4.4	Cortes no plano XZ: (a) placas paralelas de maneira que os quadrados preenchidos fiquem com as bordas justapostas; (b) bordas afastadas por uma distância x , no eixo X.	37

4.5	Vista em corte XZ da estrutura, evidenciando a distância b	37
4.6	Novo modelo de capacitor baseado em um tabuleiro de xadrez. Cotas em milímetros.	40
4.7	Nova placa fixa com novas abas e cotas em milímetros.	40
4.8	Nova placa móvel com cotas em milímetros.	41
4.9	Descrição do deslocamento na diagonal (uma casa para esquerda e uma para cima): (a) vista com perspectiva isométrica; (b) vista no plano XY, explicitando a folga denotada em (a).	42
4.10	Montagem final: (a) posição inicial vista por cima; (b) níveis da estrutura e detalhes da montagem, seguindo, também, a posição inicial.	43
4.11	Deslocamento da estrutura: (a) no Eixo X (direção do motor com polia dupla); (b) mostra no Eixo Y (direção do motor com polia simples); (c) na diagonal, combinando movimentação dos dois motores.	45
4.12	Deslocamento da estrutura: (a) montagem do Dobrador de Bennet; (b) imagem do Unipolar de Dois Estágios; (c) imagem do Unipolar de Três Estágios. Todas as imagens apresentam os nós numerados. Os circuitos presentes são os mesmos das Figs. 3.2 ,3.5 e 3.8. Os nós 4 e 4' dos circuitos das Figs. 3.4 e 3.7 são representados pelos conectores soltos em (b) e (a).	46
5.1	Circuito simulado para o Dobrador de Bennet.	53
5.2	Simulações do Dobrador de Bennet: (a) simulação para o Movimento Simples, enquanto; (b) ampliação na imagem, para que possa-se visualizar melhor a forma de onda e seus patamares.	54
5.3	Medidas experimentais do Dobrador de Bennet: (a) tensão entre as placas do Dobrador de Bennet para 2 Hz de frequência de ciclo, destacando a tensão de pico a pico da onda em amarelo; (b) destaca o sinal de saída na marcação de tensão do canal 2, em verde. Para o sinal em amarelo, cada 500 mV exibido correspondem à 50 V de tensão real medida.	55
5.4	Resultado experimental com 200 V sobre os capacitores: (a) tensão pico a pico do Dobrador de Bennet para 1,6 Hz de frequência de ciclo, em amarelo; (b) sinal de saída para um frequência de 2 Hz, em amarelo. Para o sinal em amarelo, cada 500 mV exibido correspondem à 50 V de tensão real medida.	57
5.5	Simulação do Movimento Duplo: (a) simulação completa para o Movimento Duplo; (b) uma ampliação na imagem, para que possa-se visualizar melhor a forma de onda e seus patamares.	59

5.6	Resultados experimentais para o Movimento Duplo com Dobrador de Bennet: (a) para uma tensão entre as placas dos capacitores de 160 V , em amarelo; (b) para uma tensão de 200 V , em amarelo. Para o sinal em amarelo, cada 500 mV exibido correspondem à 50 V de tensão real medida.	60
5.7	Simulação para o Movimento Diagonal: (a) simulação completa para o Movimento Diagonal; (b) ampliação na imagem, para que possa-se visualizar melhor a forma de onda e seus patamares.	61
5.8	Resultado experimental do Movimento Diagonal para o Dobrador de Bennet: (a) 160 V entre as placas. sinal amarelo; (b) 200 V entre as placas, sinal amarelo. Nas duas imagens o marcador Y está sobre o sinal de saída do circuito amostrador. Para o sinal em amarelo, cada 500 mV exibido correspondem à 50 V de tensão real medida.	62
5.9	Circuito simulado para Multiplicador Unipolar de Dois Estágios.	63
5.10	Simulação para o Movimento Simples: (a) simulação completa;(b) ampliação na imagem, para que possa-se visualizar melhor a forma de onda e seus patamares.	65
5.11	Resultado experimental do Multiplicador de 2 Estágios: (a) resultado para 6 Hz de frequência de ciclo e tensão de 160 V , em amarelo; (b) resultado experimental para 6 Hz de frequência de ciclo e tensão de 200 V . Em ambos os casos o sinal destacado em verde no canal 2 é a saída do circuito amostrador de tensão, em verde. Para o sinal em amarelo, cada 500 mV exibido correspondem à 50 V de tensão real medida.	66
5.12	Simulação para o Movimento Duplo: (a) simulação completa; (b) ampliação na imagem, para que possa-se visualizar melhor a forma de onda e seus patamares.	67
5.13	Resultados experimentais para o Movimento Duplo com Unipolar de Dois Estágios: (a) tensão entre as placas dos capacitores de 160 V , em amarelo; (b) para uma tensão de 200 V , em amarelo. Para o sinal em amarelo, cada 500 mV exibido correspondem à 50 V de tensão real medida.	68
5.14	Resultado experimental com $5,5\text{ Hz}$ e 250 V de tensão aplicada entre as placas dos capacitores variáveis, em amarelo. Para o sinal em amarelo, cada 500 mV exibido correspondem à 50 V de tensão real medida.	69
5.15	Simulação para o Movimento Diagonal: (a) simulação completa ;(b) ampliação na imagem, para que possa-se visualizar melhor a forma de onda e seus patamares.	71
5.16	Resultados experimentais para o Movimento Diagonal com Unipolar de Dois Estágios: (a) tensão entre as placas dos capacitores de 160 V , em amarelo; (b) para uma tensão de 200 V , em amarelo. Para o sinal em amarelo, cada 500 mV exibido correspondem à 50 V de tensão real medida.	72

5.17	Circuito simulado para Multiplicador Unipolar de Três Estágios.	73
5.18	Simulação para o Movimento Simples do Multiplicador de 3 Estágios: (a) simulação completa; (b) ampliação na imagem, para que possa-se visualizar melhor a forma de onda e seus patamares.	74
5.19	Resultado experimental do Multiplicador de 3 Estágios: (a) 6 Hz de frequência de ciclo e tensão de 160 V entre as placas dos capacitores, em amarelo; (b) 6 Hz de frequência de ciclo e tensão de 200 V entre as placas dos capacitores, em amarelo. Em ambos os casos o sinal destacado em verde no canal 2 é a saída do circuito de amostragem. Para o sinal em amarelo, cada 500 mV exibido correspondem à 50 V de tensão real medida.	75
5.20	Resultado experimental para tensão de 260 V entre as placas para o Unipolar de 3 Estágios. Para o sinal em amarelo, cada 500 mV exibido correspondem à 50 V de tensão real medida.	76
5.21	Simulação para o Movimento Duplo do Unipolar de 3 Estágios: (a) simulação completa; (b) ampliação na imagem, para que possa-se visualizar melhor a forma de onda e seus patamares.	77
5.22	Resultados experimentais para o Movimento Duplo com o Multiplicador Unipolar de Três Estágios: (a) tensão entre as placas dos capacitores de 160 V, em amarelo; (b) para uma tensão de 200 V, em amarelo. Para o sinal em amarelo, cada 500 mV exibido correspondem à 50 V de tensão real medida.	78
5.23	Simulação para o Movimento Diagonal Unipolar de 3 Estágios: (a) simulação completa; (b) ampliação na imagem, para que possa-se visualizar melhor a forma de onda e seus patamares.	80
5.24	Resultados experimentais para o Movimento Diagonal com Unipolar de Três Estágios: (a) tensão entre as placas dos capacitores de 160 V, em amarelo; (b) para uma tensão de 200 V, em amarelo. Para o sinal em amarelo, cada 500 mV exibido correspondem à 50 V de tensão real medida.	81

- A.1 Tela de controle da extrusora. Logo acima da aba "*Extruder*", tem uma barra de rolagem chamada "*Infill Percentage*", ela corresponde a porcentagem de solidez da sua peça, pois a peça pode ser um tanto oca para economizar material. Dessa tela os valores estão como no padrão, somente o campo "*Extrusion Multiplier*" foi alterado para 1,00, sendo ele o fator de multiplicação da espessura expelida pelo bico da extrusora, de acordo com o diâmetro do filamento usado. Este parâmetro é responsável pelo preenchimento da peça também, assim como o "*Infill Percentage*", e, como foi usado filamento condutivo que tem baixa adesão, é importante ter um bom preenchimento para que a adesão ao vidro e entre camadas seja a melhor possível. 96
- A.2 Tela de configuração de camadas. Nesta aba, encontra-se duas áreas importantes, sendo elas a "*Layer Settings*" e "*First Layer Settings*". Na primeira, é importante a configuração da altura das camadas ("*Primary Layer Height*"), contribui diretamente para o número de camadas da impressão, com mais camadas fica mais fácil a adesão entre elas, pois a câmara aquece mais e, também, propicia um acabamento melhor. Os campos "*Top Solid Layers*", "*Bottom Solid Layers*" e "*Outline/Perimeters Shells*" são responsáveis pelo número de envoltórias, cascas, das camadas, como a impressão é composta por pequenas áreas é importante ter maior preenchimento para coesão da estrutura, assim é importante ter apenas uma para permitir maior preenchimento. Dessa tela, possivelmente a configuração mais importante é a de configurações para primeira camada que está presente em "*First Layer Settings*", nesta seção configura a altura ("*First Layer Height*"), a largura ("*First Layer Width*") e velocidade ("*First Layer Speed*"). Essas configurações são importantes, pois contribui majoritariamente para a adesão da impressão com a cama de vidro. Tanto altura e largura contribuem para o aumento da área da superfície de contato com o vidro. A velocidade é reduzida para melhorar a deposição sobre o vidro e dar mais tempo para a primeira camada colar na cama de vidro. 97

- A.3 Tela para adicionar auxílio à impressão. O único auxílio usado foi o *brim* e suas configurações se encontram na imagem. Foi posto *brim* apenas na primeira camada ("*Skirt Layers: 1*"), para facilitar seu destacamento depois de concluída a impressão e, também, facilitar a retirada da peça do vidro. Alguns testes feitos com duas camadas mostrou que torna difícil destacar, sendo que ao destacar ocorria o descolamento entre as camadas, como também dificultava retirar do vidro com a espátula, justamente por ser mais grosso. A opção "*Skirt Outlines*" determina o número de linhas que o *brim* terá. Foi selecionado quinze para aumentar a superfície de contato entre a peça e o vidro, aumentando a adesão. Esse número foi determinado empiricamente. 98
- A.4 Tela com configurações de preenchimento da peça. Em "*General*" temos a opção do padrão de preenchimento em "*Internal Fill Pattern*" e "*External Fill Pattern*", sendo escolhido "*Rectilinear*"(*retilinear*) para ter um preenchimento mais justo. É importante a peça ter um bom preenchimento, tanto para melhorar a adesão ao vidro, quanto a adesão entre camadas, portanto "*Interior Fill Percentage*" está em 100%. O campo "*Outline Overlap*" relaciona-se a porcentagem de sobreposição entre as camadas da linha de impressão que o bico faz, isso garante maior adesão entre as linhas, bem como preenchimento da peça e adesão entre as camadas. A opção "*Infill Extrusion Width*" serve, também para melhor acoplamento entre as linhas de impressão, adesão ao vidro e compensar possíveis diferenças na espessura do fio. As opções de ângulo "*Internal Infill Angle Offsets*" e "*External Infill Angle Offsets*" determinam o padrão de desenho que o bico da extrusora irá fazer, como foi escolhido o padrão retilíneo os ângulos de 45° e -45° foram posto por default, sendo que eles se alternam a cada camada da impressão. Através de testes foi visto que esse padrão realmente melhora a adesão entre as camadas. Foram feitos adicionando 0°, 60°, 120° e 180°, porém o preenchimento ficou melhor apenas com os dois ângulos originais. 99
- A.5 Tela para configuração de possíveis suportes para impressão. Na impressão não foi necessário usar nenhum suporte, tanto para as placas quanto para os espaçadores. Portanto, a configuração presente é uma padrão. 100

A.6	Tela com as definições de temperatura para a extrusora e cama de vidro. Apesar de não selecionada, a temperatura da cama de vidro pode ser definida clicando em " <i>Heated Bed</i> ", sendo ela definida em 115°C. A temperatura da extrusora é modificada da primeira camada para as restantes, com a primeira sendo de 250°C e as seguintes 235°C. A primeira camada é impressa com uma temperatura mais elevada para aumentar a adesão ao vidro, uma vez que a temperatura do vidro é inferior a do plástico, o que promove um encolhimento dele ao longo da impressão da primeira camada e aumentando a temperatura da primeira camada compensa esse efeito. As camadas seguintes são impressas numa temperatura menor, pois já entram em contato com o próprio ABS condutor, tendo ABS com ABS uma adesão maior que ABS com vidro. Essas temperaturas foram determinadas empiricamente, com 250°C a adesão ao vidro foi perfeita, não tendo nenhum ponto de descolamento e boa aderência com a camada superior. A temperatura de 235°C apresentou excelente adesão entre as camadas. Testes com 230°C para as camadas seguintes a primeira foram feitos, porém mostrou descolamento entre camadas.	101
A.7	Tela com opções de controle do resfriamento da extrusora. Não foi feita nenhuma modificação nessa seção, sendo as configurações presentes as padrão.	102
A.8	Tela de especificação do G-Code. Não foi feita nenhuma modificação nessa seção, sendo as configurações presentes as padrão.	103
A.9	Tela de especificação do <i>script</i> do G-Code. Não foi feita nenhuma modificação nessa seção, sendo as configurações presentes as padrão. . . .	104
A.10	Tela de definição das velocidades da impressão. Por ser um material de pior adesão, o ABS condutor requer uma velocidade de impressão menor que o ABS comum. Portanto, foi escolhido " <i>Default Printing Speed</i> " de 55 mm/s. As demais configurações foram as padrões.	105
A.11	Tela para configurações extras. Nessa tela a única opção que foi alterada nessa aba foi " <i>Horizontal size compensation</i> " que visa compensar a dilatação do ABS na horizontal e, assim, obter o tamanho mais próximo do real projetado no stl. Para impressão das placas foi escolhido 0,10 mm de compensação, uma vez que ao ver a prévia de impressão determinadas partes da impressão não seriam impressas, devido a resolução do bico da extrusora. Na impressão dos espaçadores foi usado -0,20 mm para se obter o tamanho exato para os parafusos de 1/8 de polegada.	106
A.12	Tela de opções avançadas. Não foi feita nenhuma modificação nessa seção, sendo as configurações presentes as padrão.	107

B.1	Tela inicial do Canton.	108
B.2	A figura (a) apresenta a estrutura alinhada e a figura (b) desalinhada. . . .	110

Lista de Tabelas

3.1	Tabela com os valores de área encontrados no AutoCAD para as duas linhas das bordas.	32
3.2	Tabela com os valores de área encontrados no AutoCAD para demais linhas da placa (entre as linhas de bordas).	32
3.3	Relação entre a área total e a efetiva.	32
5.1	Tabela com os valores do capacitor com placas padrão.	49
5.2	Tabela com os valores do capacitor com placas espelhadas.	49
5.3	Tabela com as relações de capacitância para o capacitor com placas padrão.	49
5.4	Tabela com as relações de capacitância para o capacitor com placas espelhadas.	50
5.5	Tabela com os valores para movimento duplo do capacitor com placas padrão.	50
5.6	Tabela com os valores para movimento duplo do capacitor com placas espelhadas.	50
5.7	Tabela de comparação com os resultados para movimento simples e duplo para o capacitor de placas padrão. Os valores mínimos 1 e 2 para o movimento simples são retirados de Cp_{min1} , uma vez que o movimento duplo só foi executado no eixo do motor com uma polia.	51
5.8	Tabela de comparação com os resultados para movimento simples e duplo para o capacitor de placas espelhadas. Os valores mínimos 1 e 2 para o movimento simples são retirados de Ce_{max1} , uma vez que o movimento duplo só foi executado no eixo do motor com uma polia.	51
5.9	Relação de capacitâncias para movimento duplo com placas padrão.	51
5.10	Relação de capacitâncias para movimento duplo com placas espelhadas.	52
5.11	Resultados para o Dobrador de Bennet de potência e frequência para cada movimento dos capacitores, com tensões de $160 V$ aplicadas entre as placas.	79
5.12	Resultados para o Unipolar de 2 Estágios de potência e frequência para cada movimento dos capacitores, com tensões de $160 V$ aplicadas entre as placas.	82

5.13 Resultados para o Unipolar de 3 Estágios de potência e frequência para cada movimento dos capacitores, com tensões de <i>160 V</i> aplicadas entre as placas.	82
5.14 Comparação de quantas vezes as medidas do Unipolar de 2 Estágios se relaciona para o Bennet.	82
5.15 Comparação de quantas vezes as medidas do Unipolar de 3 Estágios se relaciona para o Bennet.	83
5.16 Comparação de quantas vezes as medidas do Unipolar de 3 Estágios se relaciona para o Unipolar de 2 Estágios.	83

Capítulo 1

Introdução

1.1 Revisão Bibliográfica

O presente trabalho visa a elaboração de uma nova alternativa de estrutura para a coleta de energia a partir de vibrações mecânicas [4]. Esta área já vem sendo estudada desde meados da década de 1990 [5] e as primeiras otimizações mais viáveis surgiram no início dos anos 2000 [6], com enfoque na exploração do efeito piezoelétrico. Quanto ao estudo focado em energia eletrostática, os primeiros estudos começaram no início da década passada [7], explorando a variação de capacitores com a vibração. Esse segundo campo é o foco do presente trabalho.

Desde então, no que tange a capacidade de coleta de energia, os estudos que exploram a aplicação de capacitores para este fim têm evoluído constantemente, com enfoque em melhorias estruturais e modificações nos circuitos de captação de energia, que têm como base o circuito do Dobrador de Bennet e variantes [8–11]. Alterações nos circuitos de controle e auxílio da estrutura também mostraram avanços [12–16], permitindo melhor gerência de energia e aproveitamento, assim como o entendimento da física do sistema. Em conjunto com esses avanços, novas perspectivas de aplicação para essa tecnologia surgem [17, 18] como novas metas para o desenvolvimento da tecnologia, dimensões do circuito, tamanho do dispositivo, entre outros.

As soluções a serem utilizadas em microeletrônica visam a tecnologia de MEMS (Microelectromechanical Systems) [19], que tem diversos métodos de fabricação possíveis para as aplicações em coleta de energia [20], tendo sempre em vista possíveis limitações quanto à física em escalas micrométricas [21]. Os projetos, em sua maioria, buscam estruturas planares em formato mais similares a pentes interdigitados, que requerem uma movimentação bem determinada para o funcionamento. Diferentes configurações de movimentos para o aproveitamento da vibração já foram estabelecidas [22, 23]. Outras alternativas que visassem fugir de problemas estruturais entre partes da estrutura, vibrações fora do eixo de interesse e atuação da força eletromagnética na estrutura) foram pos-

tas em prática, bem como a análise de outros circuitos para melhor extração de energia [2, 24, 25].

O estudo aqui presente propõe uma estrutura com fabricação e montagem multinível, o que consiste em estruturas com andares e cada um podendo ter geometria diferente entre si, bem como características elétricas. Um bom estudo e exemplo de fabricação multinível é visto em [26], onde é são apresentados direcionamentos para a construção de uma estrutura multinível. Este mesmo estudo fornece, também, um ótimo compilado sobre propriedades de materiais, mecânica, molas, desgaste da estrutura, ação do ambiente e forças físicas para possíveis estruturas multiníveis. Além disso, serve para dar um vislumbre dos níveis de potência necessários para aplicações médicas e a possibilidade de fabricação em MEMS da proposta, mesmo que o protótipo seja feito em escala aumentada para fins de experimento de laboratório. A expectativa é que os resultados corroborem tanto para a consolidação da estrutura, como também para a validação dos circuitos testados, e mostre sua viabilidade em futuras aplicações de microeletrônica e de sua fabricação em MEMS multinível.

Para ilustrar o processo de coleta de energia mecânica, tem-se a Fig. 1.1 que mostra um fluxograma de como funciona este processo. O bloco do "Coletor de Energia" é dividido em três elementos: capacitor variável por vibração, multiplicador de tensão e o circuito amostrador de tensão. O trabalho presente usa de capacitores variáveis por vibração para captar o estímulo mecânico e transformá-lo em um estímulo elétrico. A variação de capacitância gera troca de carga entre as placas que são captadas, intensificadas, armazenadas e intensificadas por um circuito multiplicador de tensão. O circuito multiplicador de tensão consistem de máquinas eletrostáticas e tem sua saída conectada a um circuito amostrador de tensão, que converte a tensão para um valor aceitável para o circuito de saída. O circuito de saída pode ser um sensor, emissor de rádio frequência, ou outro dispositivo eletrônico.

1.2 Objetivos

O objetivo da alternativa proposta por esse estudo consiste na idealização de uma estrutura para capacitores variáveis complementares a ser construída de modo multinível, consistindo, assim, de vários andares. Isto foge das restrições mecânicas imposta a uma estrutura planar e consegue movimentos em diferentes direções. No projeto, os andares da estrutura se mantém a uma distância fixa entre eles e, assim, as partes dos capacitores não podem se tocar e deslocam-se mais livre. Este movimento pode ser feito de maneira desordenada. Visa-se, também, um projeto bem sucedido que envolva não só a montagem como, também, futuras implementações com MEMS a serem desenvolvidas.

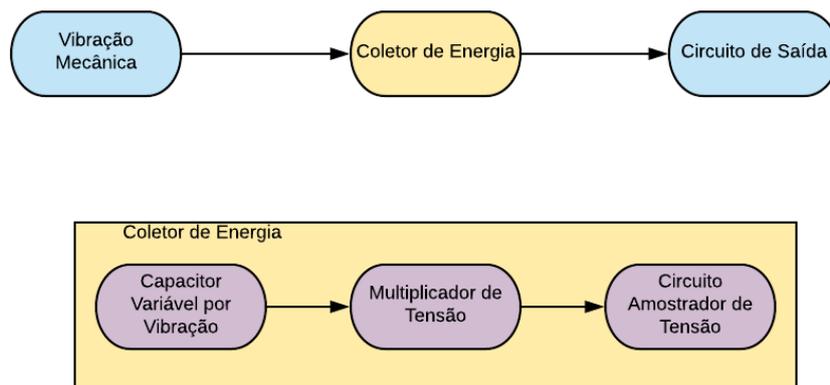


Figura 1.1: Diagrama que mostra os elementos envolvidos no processo de coleta de energia mecânica vibracional. O primeiro bloco representa a fonte de vibração que serve de estímulo mecânico para nosso sistema. O segundo bloco consiste no coletor de energia, que faz leitura do estímulo mecânico em estímulo elétrico, bem como sua potencialização e amostragem da tensão resultante nos níveis aceitos para o "Circuito de Saída" do terceiro bloco.

1.3 Metodologia

Um protótipo foi feito com impressão 3D usando ABS (acrilonitrila butadieno estireno), para que seja possível vislumbrar a mecânica do movimento e efeitos da interação eletromecânica. A montagem em multinível foi feita em uma base de acrílico e a estrutura montada usando parafusos e porcas. Diferentemente dos trabalhos anteriores e dos artigos citados anteriormente, não são usadas molas para realizar o movimento da estrutura e, assim, o movimento é feito por hastes ligadas a motores. Isto faz com que o movimento seja forçado. Este fator é aproveitado e usado para conseguir ter um controle dos movimentos e poder estudá-los com liberdade em mais de uma direção, podendo fazer diferentes proposições.

Os circuitos utilizados são os mesmos utilizados no estudo anterior [2]: Dobrador de Bennet, Multiplicador Unipolar de Dois Estágios e Multiplicador Unipolar de Três Estágios. Estes circuitos, que são máquinas eletrostáticas, são utilizados para realizar o acúmulo de carga e o direcionamento para um circuito auxiliar conversor de tensão-tensão, uma vez que a tensão gerada por estas máquinas eletrostáticas atingem níveis maiores que 150 V .

Este tipo de circuito funciona sobre o princípio de estocar cargas em capacitores e direcioná-las usando diodos, conforme os capacitores acumulam cargas e geram a diferença de tensão necessária para permitir o fluxo pelo diodo. Para exemplificar este funcionamento, a seguir está apresentada a explicação do princípio de funcionamento do Dobrador de Bennet, que serve de base para compreensão dos outros dois circuitos. Na Fig. 1.2, a etapa 1 mostra a Placa A inicialmente carregada com uma carga positiva $+Q$, a Placa B

aterrada encostada na Placa A, através de um material isolante, e a Placa C afastada, sem contato com as outras duas. Esta configuração confere à Placa B uma carga $-Q$, devido à indução por proximidade com a Placa A. Na etapa 2, a Placa B se aproxima da Placa C, que agora está aterrada. Assim, a Placa C fica com carga $+Q$, oposta a B, devido à indução por proximidade. A Placa A continua com a carga $+Q$ da etapa anterior. Na etapa 3, a Placa A é posta em contato com a Placa C, enquanto a Placa B é aterrada e posicionada sobre A, isto dobra a carga em A, $+2Q$, e B fica com o inverso dessa carga, $-2Q$. As etapas 2 e 3 podem ser repetidas k vezes, dobrando a carga da Placa A a cada ciclo, idealmente. Assim, pode-se afirmar que a carga inicial na Placa A aumentará por um fator de 2^k . Os demais circuitos funcionam pautados por este princípio também, sendo o acúmulo de cargas feito nas placas dos capacitores (no exemplo dado, sendo as Placas A, B e C) e o direcionamento das cargas por diodos (processo de afastar, encostar e aterrar as placas).

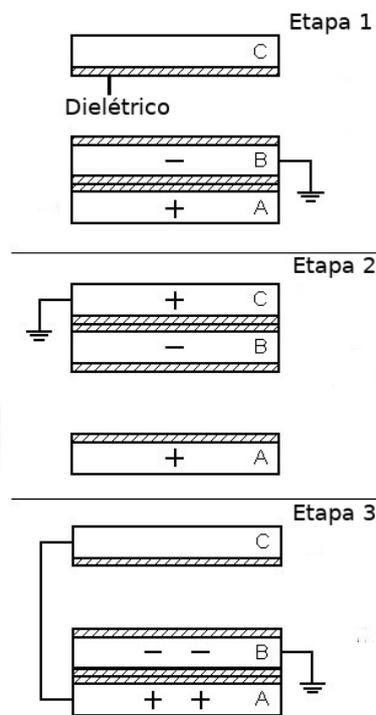


Figura 1.2: Etapas do ciclo do Dobrador de Bennet. A parte rachurada nas placas são dielétricos. Esta imagem pode ser vista com mais detalhes em [1].

1.4 Organização do Trabalho

Além deste capítulo, o presente trabalho tem outros cinco capítulos. O Capítulo 2 contém uma abordagem dos conceitos teóricos envolvidos na proposta do trabalho, bem como uma motivação para a construção do protótipo. O Capítulo 3 expõe a motivação da ideia para a formulação da geometria do capacitor e seu funcionamento, mostrando as suas diferenças para com outras estruturas conhecidas e feitas em trabalhos anteriores [22–24],

uma melhor apresentação dos circuitos utilizados e expectativas para a nova estrutura. O Capítulo 4 aborda a fabricação do protótipo, a apresentação dos resultados da fabricação e a montagem da estrutura junto com os circuitos. O Capítulo 5 apresenta os resultados práticos dos capacitores produzidos, comparações experimentais de seu funcionamento com as máquinas eletrostáticas utilizadas e em relação às simulações. O Capítulo 6 traz conclusões sobre o trabalho, analisando os resultados do capítulo anterior. Por fim, o Capítulo 7 propõe trabalhos futuros para aprimoramento, aprofundamento teórico e uma possível fabricação em MEMS.

Capítulo 2

Construção Teórica

Neste Capítulo é abordado e brevemente contextualizado alguns dos conceitos teóricos, bem como uma motivação para a construção do protótipo.

2.1 Conversão de Energia

Este princípio se baseia na conversão de energias diversas para energia elétrica, podendo ser exploradas as energia solar, térmica, química, biológica e mecânica, por exemplo. Essas energias geram estímulos que podem ser traduzidos em alguma propriedade elétrica. O trabalho presente explora a conversão de energia mecânica, com o foco voltado para a vibração. No que tange este meio, a conversão de energia pode ser feita pelo efeito piezoelétrico e por energia eletrostática. No primeiro modo, materiais piezoelétricos são expostos a vibrações e à deformação do material, que ativam o efeito. Estes dispositivos no geral têm o formato de hastes longas (prateleiras, do inglês "*cantilever*"), que possuem uma de suas extremidades fixadas a um substrato, ficando suscetíveis a trepidações. A coleta de energia eletrostática advém da troca de carga por indução entre superfícies condutoras, como terminais de capacitores, no qual a vibração movimentam as superfícies e influencia diretamente na indução de carga.

A conversão de energia por vibrações pode se dar de duas maneiras basicamente: pelo efeito piezoelétrico e por variações eletrostáticas. Este estudo será focado na conversão de energia eletrostática. O princípio básico para essa conversão de energia mecânica em elétrica está no uso da vibração para promover a troca de carga entre as placas de capacitores. Em seguida, um circuito multiplicador de tensão (máquina eletrostática) consegue amplificar essa carga fazer a estocagem da carga, fazendo a coleta dessa energia.

Para o caso estudado, usam-se máquinas eletrostáticas para realizar a conversão em energia elétrica. O princípio básico desse tipo de dispositivo usa capacitores variáveis para realizar uma troca de carga que ocorre ao variar o valor da capacitância, através da eletricidade por indução conforme explicado em 1.1. Esta carga é direcionada através

do circuito usando diodos, podendo ser estocadas em capacitores fixos, que auxiliam os capacitores variáveis no acúmulo de carga, e desta maneira a carga é elevada a cada ciclo de operação. Por fim, esta carga é armazenada em um reservatório (bateria [27], por exemplo), ou inserida diretamente em um circuito (sensor [18], por exemplo).

Agora, vale pensar como pode acontecer a variação de capacitância. A equação

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

retrata a fórmula ideal para capacitores de placas paralelas, princípio presente nesse estudo para capacitores, mostrando que há duas variáveis presentes: A e d . Assim, dois fatores podem ter seus valores alterados, sendo a área de sobreposição entre as placas A e a distância entre as placas d . A área de sobreposição pode ser escrita como produto da base b com a altura h do paralelogramo que descreve a placa, conforme visto em:

$$A = bh \quad (2.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} C, & \text{capacitância} \\ \epsilon_o, & \text{constante de permissividade no vácuo} \\ A, & \text{área de sobreposição das placas paralelas} \\ d, & \text{distância entre as placas paralelas} \\ b, & \text{base da área de sobreposição} \\ h, & \text{altura da área de sobreposição} \end{array} \right.$$

Em (2.1) e (2.2), em conjunto com a Fig. 2.1, é possível visualizar que se pode variar a capacitância variando os valores de d (eixo Z), b (eixo X) e h (eixo Y). Essa variação ocorre diretamente através da ação da vibração imposta no dispositivo. Percebe-se que as três variáveis correspondem diretamente aos três eixos (X, Y, Z) do espaço tridimensional, que dependerá da geometria proposta para o capacitor variável, para determinar qual variável se relaciona a qual eixo. A geometria também irá determinar como será relação da vibração com os eixos. Isso requer uma análise de como será o acionamento do dispositivo.

Algumas das geometrias estudadas [10, 14] e realizadas [2, 22, 23, 25] até o momento apresentam variação em um eixo de vibração, o que exige um movimento comportado, ou mecanismos adicionais para controlar a vibração [26, 28]. Outro problema relatado nos trabalhos anteriores é a colisão entre partes da estrutura do capacitor, o que ocasiona danos e até a perda total do dispositivo.

As citações feitas anteriormente giram em torno de estruturas similares a pentes interdigitados, como pode ser visto na Fig. 2.2, que apresenta uma vista em perspectiva

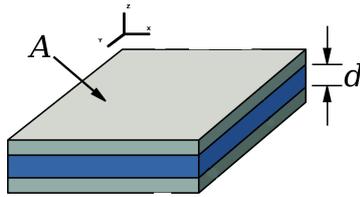


Figura 2.1: Ilustração para o capacitor de placas paralelas. Em cinza temos as placas e azul um dielétrico entre as placas.

XY. Ao vibrar, podem colidir entre si e danificar os dentes dos pentes, uma vez que isto ocorre mesmo com o acionamento limitando o deslocamento fora do eixo de interesse. A Fig. 2.2 também permite o entendimento das possibilidades de variação das três variáveis citadas anteriormente e sua relação para cada um dos eixos do espaço tridimensional. Ao variar a estrutura no eixo X, pode-se ver que varia o valor da área de sobreposição A entre os dentes, mais especificamente o valor de b e, numa escala menor, o valor d para as pontas dos dentes, mesmo que seja uma variação pequena na capacitância. Promovendo a vibração no eixo Y, a variável objetivo para estudo passa a ser a distância entre os dentes d . Para oscilações no eixo Z, a variação será, novamente, imposta sobre o valor da área de sobreposição A , porém agora sobre o valor de h . Um adendo deve ser feito com relação à variação no eixo Z. Sua aplicação em microeletrônica se mostra difícil e limitada, por dificuldade de fabricação, devido a precisão nos desgastes do material do MEMS, e controle adequado do movimento, tornando variações nos eixos X e Y mais atrativas. A organização dos pentes, pode mudar essa relação entre variáveis e eixo, sendo a Fig. 2.2 a geometria básica explorada. Uma forma diferente de organizar os pentes interdigitados foi proposta em um estudo anterior ao da presente dissertação (Fig. 2.3 [2]).

A vibração promove o movimento que é transferido para a estrutura através de molas, formando um circuito ressonante com a massa da parte móvel. Além disso, as molas podem servir de contatos elétricos. Em parte, as molas determinam a frequência de vibração e uma certa limitação ao movimento fora do eixo de interesse. Porém, essa limitação depende da excitação e não é suficiente para evitar as colisões já citadas. Nos exemplos referenciados, as molas são basicamente hastes que seguem um padrão de serpentina, conforme visto na Fig. 2.4. Esse modelo é bem comum de ser visto em MEMS, como será mostrado mais a frente. Outros estudos mostram modificações nas molas para melhorar o desempenho do MEMS, quanto à frequência de ressonância e comportamento mecânico [26], ou outras alternativas para frequência [29].

A proposta que se seguirá ao longo dessa dissertação pretende contornar os problemas citados quanto à colisão entre partes da estrutura, oscilação em somente um eixo e necessidade de uma variação mais comportada, através do uso de outra geometria que não fique

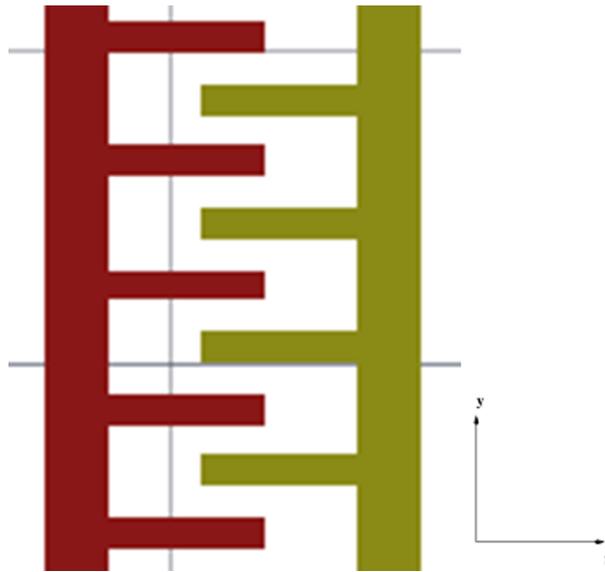


Figura 2.2: Exemplo de estrutura básica para capacitores com pentes interdigitados.

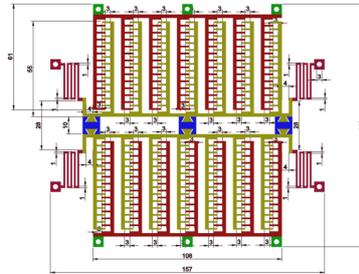


Figura 2.3: Imagem do protótipo desenvolvido em trabalho anterior [2].



Figura 2.4: Exemplo de estrutura básica para molas usada nas impressões 3D, sendo uma aproximação do que se usa em MEMS.

atrelada à ideia de pentes interdigitados.

2.2 MEMS

MEMS é uma tecnologia de fabricação em microeletrônica que explora a possibilidade de realizar dispositivos que usam interações eletromecânicas. O termo foi introduzido inicialmente em 1986 em uma proposta de desenvolvimento pela Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) e com os primeiros artigos já aparecendo no Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) nos anos seguintes [30–32].

O funcionamento de MEMS, bem como NEMS (Nanoelectromechanical Systems), se baseia na relação entre estímulos elétricos e mecânicos, onde, ao aplicar um estímulo elétrico, acontece uma reação mecânica ou, aplicando um estímulo mecânico, ocorre uma reação elétrica. Essa relação configura o princípio fundamental de funcionamento de todo MEMS. Tomando como exemplo o objeto de estudo dessa dissertação que usa vibração, o estímulo mecânico é usado para gerar variação de capacitância, que leva a uma reação elétrica. As aplicações dessa tecnologia vêm se expandindo cada vez mais com o passar dos anos, desde a sua introdução, bem como o barateamento da tecnologia, que custa mais que uma fabricação de circuito integrado convencional.

Uma aplicação possível de MEMS em biomédica, por exemplo, é a criação de sensores de agentes patogênicos. Essa implementação pode explorar o uso do efeito piezoelétrico do silício policristalino (polissilício), através da construção de uma estrutura similar aos dentes apresentados na Fig. 2.2, com a diferença de que é um dente com uma das extremidades fixada a um substrato. Pode ser chamado de prateleira, na tradução livre do termo em inglês "*cantilever*", como é mais conhecido esse tipo de tecnologia. O *cantilever* tem um biomarcador adicionado à sua extremidade livre, por exemplo, que irá reagir com um determinado tipo de componente de uma amostra biológica, permitindo que esse componente se acople ao *cantilever*. Após o acoplamento de uma determinada quantidade do componente, sendo esta quantidade levada em consideração no projeto, o *cantilever* irá envergar devido ao peso em sua extremidade livre, produzindo um estímulo mecânico, e, assim, ativando o efeito piezoelétrico que gera uma tensão que é detectada por um circuito sensor [33], a reação elétrica. Esse princípio também é aplicado em sensores de agentes químicos, nos chamados sensores de ponteira atômica, no qual a extremidade livre contém um reagente, que realiza acoplamento químico com o agente que se deseja detectar.

Esse princípio também é usado em microscópios de força atômica (AFM, do inglês *Atomic Force Microscopy*), que seguem a ideia dos toca-discos de discos de vinil. Como ocorre nos toca-discos que têm uma agulha que passa por cima das ranhuras do disco, o AFM possui um *cantilever* com uma agulha na extremidade livre. Quando a agulha está próxima de uma superfície, forças agem e fazem com que o *cantilever* se deforme, gerando estímulos para imageamentos [34].

Outra aplicação encontra-se nos acelerômetros, que podem tanto explorar a variação

de capacitância, quanto efeito piezoelétrico. Para o caso de capacitância, uma massa inercial suspensa no centro, similar a uma placa capacitiva paralela que com a aceleração sofre uma deflexão, gera mudança na capacitância sentida por eletrodos, sendo proporcional à força g aplicada ao MEMS [35]. Ao ocorrer um movimento, a massa será deslocada e a força g pode ser percebida, por exemplo, usando uma fibra ótica no ponto de ancoragem do *cantilever*, ou mesmo a tensão gerada pelo efeito piezoelétrico. Pode ser implementado, também, explorando uma massa inercial suspensa por *cantilevers* que, de acordo com a movimentação da massa, diferentes pontos de tensão distintas são detectados [36].

Usando ainda a variação de capacitância, giroscópios podem ser fabricados usando a tecnologia de MEMS. Giroscópios são sensores que servem para determinar orientação e velocidade angular. Uma estrutura com uma massa fixa no centro, envolta com vários capacitores variáveis que se baseiam na ideia dos pentes interdigitados, podem compor facilmente um giroscópio em MEMS. Ao ocorrer uma rotação, ocorrerá uma aceleração angular na estrutura, um princípio próximo ao do acelerômetro, e os capacitores terão suas capacitâncias modificadas e detectadas proporcionalmente em forma de tensão por circuitos diferentes, que informarão os níveis do deslocamento da rotação, determinando, assim, a velocidade angular e orientação do dispositivo após a rotação [37].

O efeito piezoelétrico também pode ser explorado para gerar energia, através da coleta de energia de vibrações. Fazendo uso dos conceitos citados anteriormente para sensoriamento, pode-se gerar energia a partir de vibrações. Com o uso de um circuito para armazenar a energia a cada ciclo de vibração, um *cantilever* posto em ambiente vibrante pode ter sua extremidade livre excitada, ativando o efeito piezoelétrico [38].

Desde a criação dos MEMS até o presente momento, diversas técnicas de fabricação foram criadas, permitindo diferentes implementações de geometria e empurrando os avanços tecnológicos na área. O processo ainda é caro, mais que a integração de um chip convencional, como também é caro a pesquisa em novos processos de fabricação nessa área. Com o avanço da computação, softwares para simulação de MEMS começaram a ser desenvolvidos. Um exemplo simples e livre para simulação de *cantilevers* é o SUGAR da Universidade de Berkley do início dos anos 2000 [39], aparentemente já descontinuado. Softwares de simulação mais sofisticado de MEMS, que simulam até etapas de um processo de fabricação selecionado, estão presentes no mercado. Porém, também com um preço elevado.

Uma possibilidade explorada anteriormente para verificação das propriedades eletromecânicas de MEMS foi a impressão 3D [2], algo que será tratado também nesta dissertação. Essa abordagem se mostra interessante pela possibilidade de desenvolvimento rápido e barato que permite observar parte da física envolvida no MEMS a ser desenvolvido, podendo, assim, evitar futuros erros na fabricação ou falhas no funcionamento.

2.3 Impressão 3D e MEMS

A impressão 3D tem representado um grande motor para o avanço da ciência e indústria, devido à sua praticidade em prototipagem e fabricação de peças mais complexas com materiais diversos. O processo de fabricação por impressão 3D teve seu início nos anos 80, porém, só a nível industrial e com o procedimento sendo fechado. Na década seguinte, novos métodos foram introduzidos, porém, ainda sendo algo bem fechado devido aos custos, patentes e peças. A impressão 3D tem o princípio de sua popularização nos anos 2000, com avanço da computação e internet, que ajudou a conectar pessoas que tinham diferentes abordagens no tema, assim, mesclando as experiências e protótipos de impressoras. Foi por volta do início dos anos 2010 que a impressão 3D tomou a forma como se apresenta hoje, com as ideias feitas apenas por entusiastas dos anos 2000 virando empresas e, por consequência, produtos. Isso foi possível muito devido à evolução de portais de internet do tipo fórum e barateamento das peças necessárias para a construção. Atualmente, o nível de detalhes e precisão que se consegue atingir com impressoras 3D são impressionantes, como o caso de impressoras que conseguem imprimir na escala nanométrica.

Suas aplicações estendem-se a diversas escalas da indústria, desde a farmacêutica e biomédica, até a indústria armamentista. A indústria farmacêutica começa a explorar a ideia de medicamentos personalizados e, através da impressão 3D, pretende controlar a dose exata para cada paciente, bem como fazer processos de fabricação mais otimizados [40]. No campo da biomédica, uma das principais aplicações é na fabricação de próteses, uma vez que é possível imprimir em materiais diversos, dependendo da impressora, e podendo ser fabricado no próprio hospital e obedecendo a todas as especificações para um atendimento personalizado para paciente, sendo muito mais rápido e prático que esperar por um fornecedor. O caso citado da indústria armamentista serve para exemplificar a diminuição do tempo do processo de fabricação, como relatado pela Lockheed Martin, que diminuiu um de seus processos de manufatura de seis meses para um mês e meio [41]. Como exemplo extra, a NASA recentemente começou a adotar impressão 3D na Estação Espacial Internacional (ISS, do inglês *International Space Station*) [42] como uma forma de baratear custos, ao fabricar suas próprias ferramentas e peças no espaço, uma vez que é muito caro levar materiais ao espaço, pois conseguem fabricar as ferramentas necessárias, ao invés de fazer viagens a cada necessidade nova.

A impressão 3D consiste basicamente em dois métodos. O primeiro deles é por síntese do material, que consiste na construção da peça através de reações físico-químicas que dão forma à estrutura. Como exemplo, para fabricação por polímeros é comum o uso da técnica de síntese à laser, no qual o material plástico líquido, geralmente, fica depositado dentro de um recipiente e uma base entra em contato, geralmente por cima, com o material. Nesse momento, o laser incide no material e faz o "desenho" das camadas da

impressão, dando forma à peça através de reações que ligam e fundem o plástico.

O segundo método é a modelagem por material fundido (do inglês *fused deposit modeling*, FDM). Este método consiste na deposição de plástico derretido em cima de uma superfície, geralmente vidro. Um rolo de filamento plástico (comumente sendo o poliláctico, PLA, ou acrilonitrila butadieno estireno, ABS) é puxado por um motor através de um bico extrusor quente (dependendo do material, pode ser acima de 230°C), o plástico derrete e é depositado em cima de uma superfície mais fria, uma cama (um vidro a 110°C, por exemplo). O bico extrusor irá desenhar a peça, camada por camada, dando forma à peça. A peça ganha altura através do deslocamento da cama para baixo, ou com o deslocamento do bico extrusor para cima, algo menos convencional nas impressoras atuais. Usou-se a impressão por FDM para a realização do protótipo visado nessa dissertação e com material plástico. Sendo o ABS condutor, que tem uma dopagem de carbono para permitir a condução elétrica, esse foi o material adotado nesse projeto, cuja eficácia será discutida mais adiante.

Capítulo 3

Proposta e Coleta de Energia

Neste capítulo aborda a motivação e apresenta a ideia para formulação da geometria do capacitor variável por vibração, o porquê de fazê-lo e seu funcionamento, diferenciando-o de outras estruturas já conhecidas e feitas no LPS (Laboratório de Processamento de Sinais) em trabalhos anteriores. Para concluir o capítulo, são também tratados os circuitos para ganho de energia usados e as expectativas desejadas com a aplicação desse novo capacitor junto a estes circuitos.

3.1 Circuitos Usados

Os circuitos das máquinas eletrostáticas (multiplicadores de tensão) utilizados neste trabalho são os mesmos utilizados no Projeto de Graduação [2]. Esta escolha foi feita, pois estes circuitos vem sendo usado ao longo de anos nos experimentos e transpassam confiança nos testes feitos até o momento.

O princípio de funcionamento desses circuitos para coleta de energia se baseia no acúmulo de carga através do efeito da indução eletrostática. Ao variar a capacitância, têm-se uma variação de carga entre as placas dos capacitores. Estes circuitos conseguem acumular essa carga e depositá-la em um reservatório, ou aplicá-la diretamente a um circuito (um sensor ou bateria, por exemplo). Para realizar tal feito, os circuitos são compostos por capacitores, que estocam a carga obtida a cada ciclo, e diodos, que funcionam como chaves e dão sentido ao fluxo de carga através do circuito. Os diodos usados nos circuitos de tensão são do tipo retificadores de tensão, o que minimiza a fuga de carga e capacitâncias parasitas. No circuito de controle amostragem de tensão, foram usados diodos retificadores retirados de forno de micro-ondas, enquanto que nos multiplicadores de tensão foram retirados de impressoras laser, de $8\text{ kV } 5\text{ mA}$ da Fuji.

3.1.1 Dobrador de Bennet

O Dobrador de Bennet e suas possíveis variações foram amplamente utilizados em diversos trabalhos [8–14, 17, 22, 23, 27, 43, 44]. Por ser um circuito pequeno, ele é bem atrativo para se trabalhar. Se a aplicação tiver uma limitação quanto ao tamanho, isto é um fator importante. Também apresenta tempo de partida da elevação de tensão menor que os outros circuitos utilizados, que serão mostrados mais a frente neste trabalho, justamente por ter apenas um capacitor para carregar. Porém, tem menor valor de potência extraída. O esquemático e a montagem física do circuito podem ser vistas nas Figs. 3.1 e 3.2, respectivamente. O Capítulo 4 mostra como se dá a montagem do circuito com os capacitores variáveis.

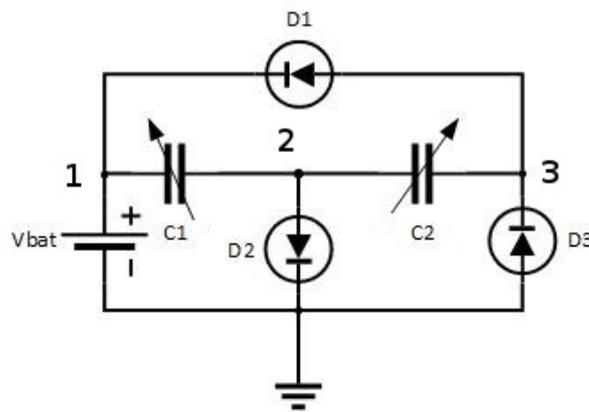


Figura 3.1: Esquemático do circuito Dobrado de Bennet. A versão utilizada foi construída sem a bateria, com o nó 1 sendo ligado a um capacitor de carga e conectada a um circuito conversor de tensão CC/CC.

A Fig. 3.1 mostra um esquemático possível para o Dobrador de Bennet, com uma bateria na saída (nó 1). Esta representação serve para visualizar e interpretar a explicação da troca de carga feita no Capítulo 1. Como dito anteriormente, os diodos servem para direcionar o fluxo de carga acumulada nos capacitores variáveis complementares ($C1$ e $C2$) e V_{bat} armazena as cargas geradas a cada ciclo. Perceba as direções que os diodos possibilitam, ao trocar o referencial de terra entre os capacitores variáveis e, também, o fluxo de carga em direção a V_{bat} . Estes direcionamentos estão atrelados diretamente as cargas nos capacitores variáveis, pois eles geram as tensões nas pontas dos diodos e, portanto, pondo-os em condução, ou não. Uma análise detalhada do funcionamento do circuito pode ser encontrada em [8].

O formato de onda aproximado esperado na saída desses circuitos multiplicadores de tensão pode ser observado na Fig. 3.3. As regiões que mostram um rampa com aumento de tensão são parte do ganho de tensão do ciclo de multiplicação de carga das máquinas eletrostáticas. As regiões que a tensão se mantém constante representam os momentos dos acúmulos de cargas das placas dos capacitores. Quando a tensão atinge o valor pico

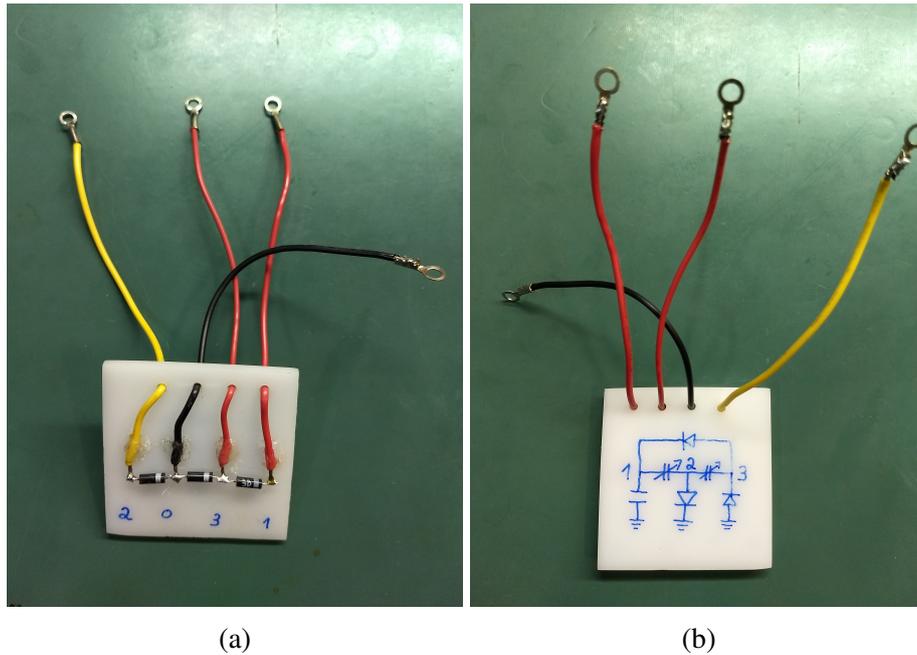


Figura 3.2: A figura (a) mostra a parte da frente do circuito com os fios enumerados de acordo com os nós, a figura (b) mostra a relação da numeração dos nós do circuito.

a pico da tensão limite regulada pelo amostrador de tensão, ocorre uma descarga total da tensão para o circuito amostrador.

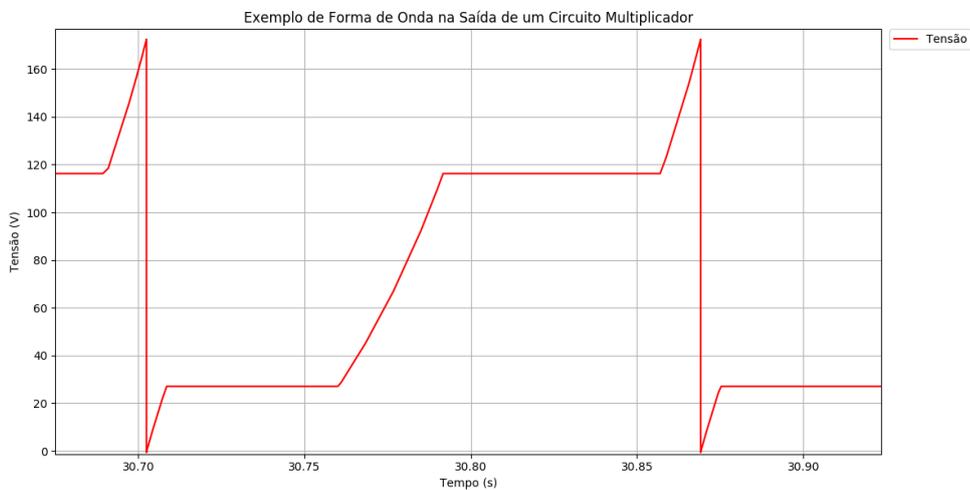


Figura 3.3: Exemplo de possível saída dos circuitos multiplicadores de tensão usados neste trabalho. Este formato da onda é característico para os três circuitos estudados.

3.1.2 Multiplicador Unipolar de Dois Estágios

O Multiplicador Unipolar de Dois Estágios apresenta uma complexidade de circuito maior que a do Dobrador de Bennet, constando seis diodos e quatro capacitores. Estes

quatro capacitores servem para elevar o acúmulo de carga, assim, gerando mais tensão e, conseqüentemente, mais energia que o Dobrador de Bennet. As tensões internas desse circuito e a aplicada sobre as placas dos capacitores variáveis são maiores que a do Dobrador de Bennet, quando impostas as condições de vibrações iguais nos dois circuitos. Apresenta, também, períodos de descarga mais curtos, conseguindo, assim, entregar energia mais rápido [25, 45, 46]. Porém, este circuito apresenta maior tempo de partida que o Bennet, pois apresenta mais capacitores para carregar. O esquemático do circuito Unipolar 2 está presente na Fig. 3.4. A montagem do circuito pode ser vista na Fig. 3.5 e consiste de capacitores de 470 pF e diodos comuns.

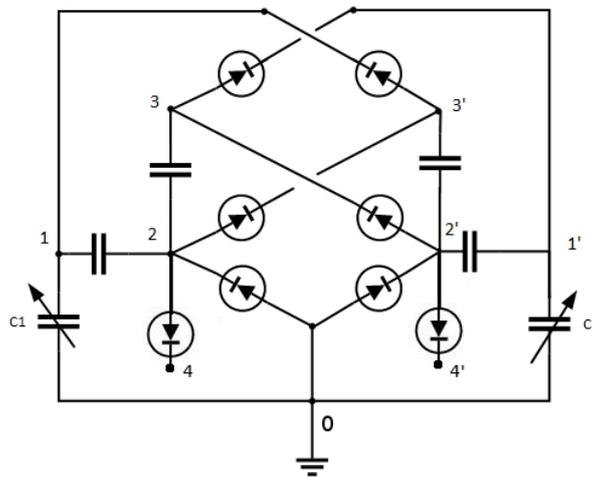


Figura 3.4: Esquemático do circuito Multiplicador Unipolar de Dois Estágios. Os pontos 4 e 4' ligam ao circuito de saída.

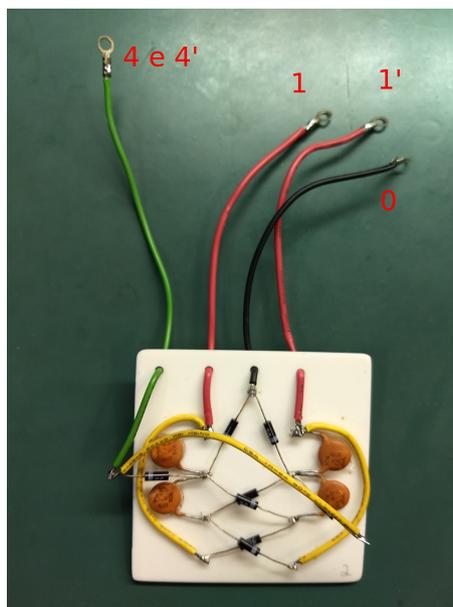


Figura 3.5: Circuito Multiplicador Unipolar de Dois Estágios utilizado nos experimentos.

O Multiplicador Unipolar é uma simplificação do circuito Multiplicador de Crockoft-Walton [25] e o funcionamento de ambos é semelhante. Para ajudar a explicação, será

abordado o Crockoft-Walton, pois é um circuito mais clássico e com mesmo princípio de funcionamento. A Fig. 3.6 apresenta o circuito para o Cockroft-Walton de dois estágios, sendo perceptível que esta montagem se assemelha bastante com uma metade do Multiplicador Unipolar. O circuito em questão tem uma fonte de tensão alternada V_{in} , para facilitar a explicação. No circuito aplicado na prática do Unipolar, a fonte é substituída pelo capacitor variável.

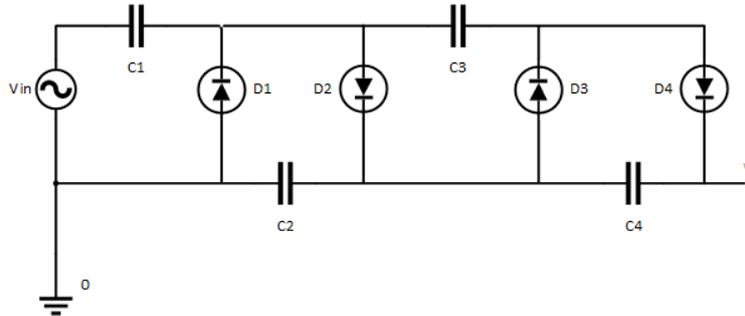


Figura 3.6: Circuito básico para o Multiplicador de Cockroft-Walton de dois estágios, com V_{in} no lugar de C_{var} .

A fonte fornece uma tensão de pico V_p . Quando a fonte atinge este valor negativo ($-V_p$), a corrente flui para $D1$ e carrega o capacitor $C1$ com o valor da tensão de pico, V_p . Numa segunda etapa, quando a fonte reverte a polaridade atingindo a tensão $+V_p$, a placa da direita do capacitor $C1$ alcança a tensão $2V_p$. Nesta condição, $D1$ não conduz e a corrente flui por $D2$, abastecendo o capacitor $C2$ com $2V_p$. Na terceira etapa, a fonte volta a tensão $-V_p$ e a corrente flui de $C2$ para $C3$, através de $D3$, ficando com tensão de $2V_p$. Na quarta e última etapa, algo similar à anterior ocorre, com a fonte voltando para $+V_p$. Assim, a corrente flui de $C3$ para $C4$ através do diodo $D4$, ficando com tensão de $2V_p$. Isto encerra o ciclo de carga do Cockroft-Walton e a cada ciclo essa tensão dobrará, pois este exemplo apresenta dois estágios. A tensão de saída V_o está atrelada ao número de estágios N :

$$V_o = 2NV_p \quad (3.1)$$

Esta relação segue para o Multiplicador Unipolar de mais estágios e para o caso seguinte.

3.1.3 Multiplicador Unipolar de Três Estágios

O Multiplicador de Três Estágios é composto por oito diodos e seis capacitores, dois capacitores e dois diodos a mais que o de Dois Estágios. Devido a isto, ele apresenta um tempo de partida maior que o de Dois Estágios, conseqüentemente, um tempo ainda maior em relação ao de Bennet. Este circuito consegue atingir maiores valores de energia e maior tensão aplicada sobre as placas dos capacitores variáveis. A maior tensão entre as

placas motiva maior energia extraída. Porém, também apresenta um desafio no dimensionamento das placas. Um problema pode ser a atração entre as placas pela força elétrica e possível faiscamento entre as mesmas, pois ambos dependem da tensão. Os desafios citados anteriormente serão analisados no próximo capítulo para os três circuitos testados. O esquemático do circuito Unipolar 3 está presente na Fig. 3.7. A montagem do circuito pode ser vista na Fig. 3.8 e consiste de capacitores de 470 pF e diodos comuns.

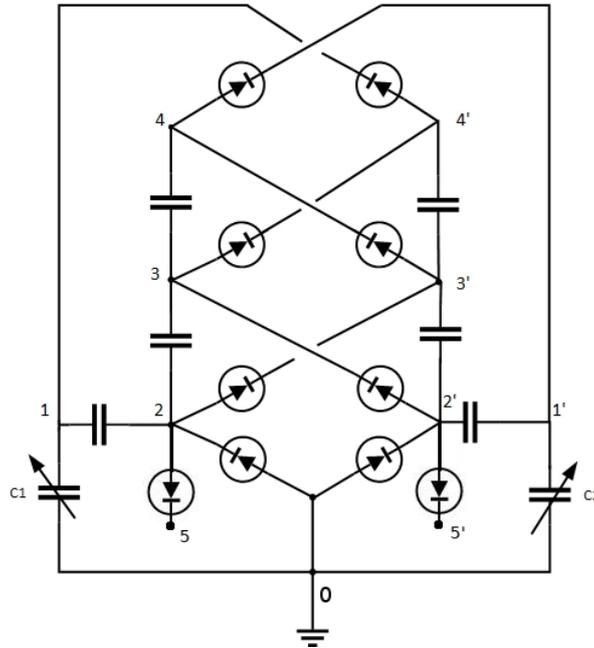


Figura 3.7: Esquemático do circuito Multiplicador Unipolar de Três Estágios.

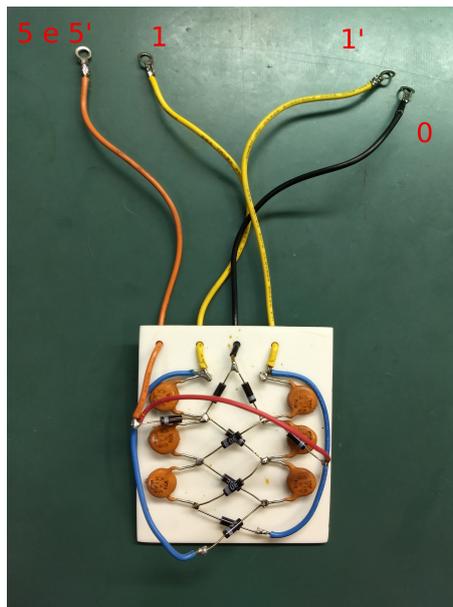


Figura 3.8: Circuito Multiplicador Unipolar de Três Estágios utilizado nos experimentos.

3.1.4 Circuito de Controle e Amostragem de Saída

As tensões geradas nas saídas das máquinas eletrostáticas atingem valores de centenas de volts e estes valores não podem ser aplicados diretamente sobre um sensor, por exemplo. A fim de ter uma aplicabilidade, é necessário utilizar um controle de tensão que regule a tensão de saída para níveis acessíveis para a aplicação proposta. Neste trabalho, foi utilizado um circuito produzido num projeto de Iniciação Científica, ainda não publicado pelo aluno Gabriel Morgado Fonseca e orientado pelo professor Antônio Carlos Moreirão de Queiroz, que tem seu esquemático presente na Fig. 3.9 e sua montagem na Fig. 3.10. A saída do circuito apresenta tensões na ordem de milivolts, que são traduzidas em microwatts numa escala de 2/30, ou seja, uma saída de 300 mV corresponde a $20\text{ }\mu\text{W}$.

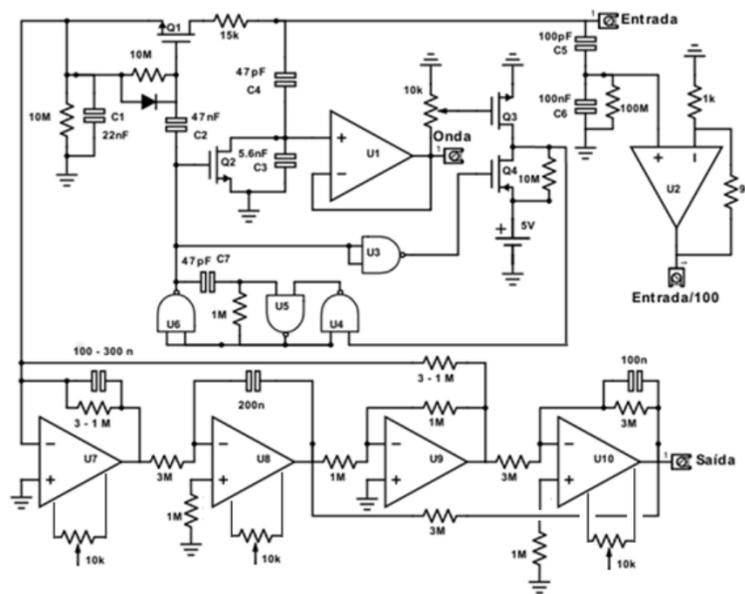


Figura 3.9: Esquemático do circuito controlador de tensão e para amostragem de saída.

O circuito permite regular, através de uma chave, a tensão pico a pico do sinal de saída dos circuitos das máquinas eletrostáticas, variando de uma faixa de pouco mais de 150 V a até pouco mais de 300 V . A regulação dessa tensão influi diretamente na tensão entre as placas dos capacitores variáveis. Portanto, a seleção do valor de tensão dependerá do comportamento dos capacitores variáveis quanto ao faiscamento e à atração entre as suas placas.

O circuito da Fig. 3.9 pode ter seu funcionamento explicado de maneira simplificada. O sistema medidor de potência recebe a tensão de saída dos multiplicadores de tensão (circuitos eletrostáticos mencionados anteriormente) e diminui o valor de tensão em 100 vezes na saída do amplificador operacional U2. Os amplificadores operacionais U7, U8, U9 e U10 formam um filtro passa-baixas de terceira ordem que filtra o sinal de entrada fornecido pelo multiplicador de tensão, quando ocorre a descarga. Na saída de U10, é apresentado um sinal de tensão proporcional numericamente à potência (em microwatts)



Figura 3.10: Montagem do circuito controlador de tensão e para amostragem de saída.

fornecida pelo dispositivo, uma vez que a tensão, quando o corre a descarga é fixa, a corrente média é proporcional à potência média.

3.2 Os Capacitores

3.2.1 Geometria

As estruturas apontadas nos capítulos anteriores apresentam a geometria similar a pentes, conforme visto na Fig. 2.2. Essa estrutura apresenta a possibilidade de movimento em apenas um eixo no espaço tridimensional, correndo o risco de danos e até de quebra caso tenha movimentos abruptos fora do eixo de interesse para vibração. Isto configura uma limitação para o movimento em que o dispositivo pode ser operado, gerando, assim, a necessidade de algo mais comportado para as vibrações. Esse comportamento limitado da vibração é um entrave para aplicações mais realísticas do dispositivo. Em microeletrônica, estas apresentam, também, uma geometria para fabricação em um nível, ou andar, através de MEMS.

Em um trabalho anterior, foi explorada uma geometria que possibilitasse diminuir as chances de colisões e que também aumentasse a capacitância no processo [2]. Tal geometria se mostrou eficaz em reduzir as chances de colisão, segundo as observações experimentais. Devido à robustez, trepidações em outros eixos fora do interesse se mostraram irrelevantes para o funcionamento do dispositivo, tendo atingido os valores de variação de capacitância necessários para o funcionamento dos circuitos. Em adição, vale ressaltar que a estrutura foi feita em plástico ABS dopado com elemento condutor, enquanto que em uma fabricação em microeletrônica, esta seria feita de metal, ou polissilício, confe-

rindo, assim, ainda mais robustez e resistência a trepidações. Porém, mesmo que tenha funcionado e adicionado melhorias, a limitação de vibração em apenas um eixo está presente. Como pode ser visto na Fig. 3.11, a estrutura se baseia no conceito de pentes interdigitados. Com a adição de dentes às hastes dos pentes, permite-se uma menor trepidação fora do eixo de interesse. Porém, ainda atrela a vibração a apenas um eixo de vibração. Conclusões tiradas desse experimento voltarão à luz para análises e comparações com a geometria desenvolvida nesta dissertação.

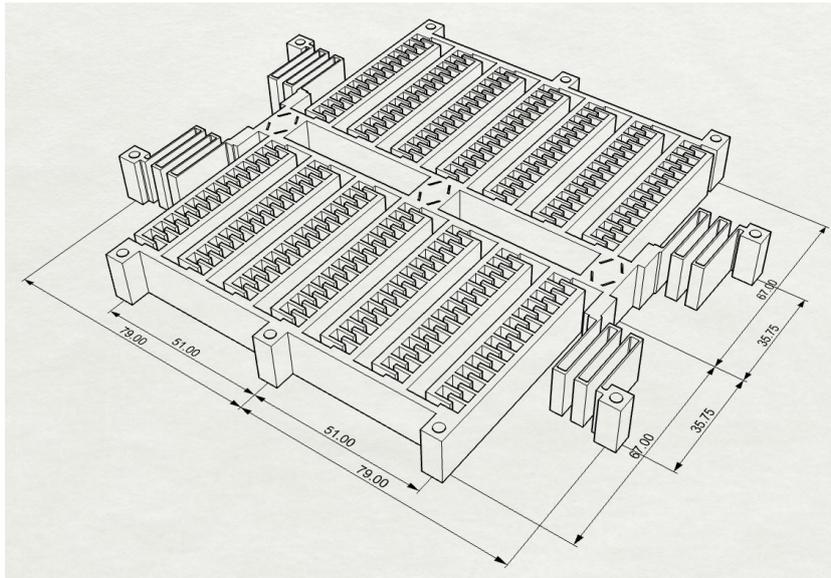


Figura 3.11: Geometria desenvolvida anteriormente [2]. Note que ainda se baseia na ideia de pentes, com adição de dentes a cada haste do pente. Cotas feitas em milímetros.

A motivação deste trabalho vem do pensamento de não ser necessário um movimento comportado, quebrando o paradigma de apenas um eixo de vibração. A inspiração veio de uma confluência de ideias, com a principal vindo da operação de um motor a combustão de dois tempos, no qual algumas etapas normais de um motor de quatro tempos (admissão, compressão, explosão e exaustão) ocorrem simultaneamente. Neste tipo de motor, o movimento de algumas partes altera a área de sobreposição, tendo movimentações diferentes para os eixos. Com isso, veio o pensamento de fazer algo que não precise do comportamento síncrono de vibração em apenas um eixo, podendo vibrar em dois eixos e até mesmo de maneira mais livre. A primeira ideia foi para um movimento circular, no qual dois discos teriam partes vazadas para mudar a área de sobreposição e iriam girar sobre o mesmo eixo de rotação, sendo que os padrões vazados seriam alternados entre os discos (Fig. 3.12). Essa estrutura permitiria extrair energia de movimentos rotacionais. A evolução dessa ideia veio logo em seguida, uma vez que os trabalhos feitos usam vibrações que podem se dar em qualquer direção, sendo restringidas por molas, ou outros aparatos mecânicos. Assim, a ideia passou para placas paralelas vazadas, similares a um tabuleiro de xadrez (Fig. 3.13), com as casas escuras preenchidas e as brancas sendo

vazadas. Essas placas poderiam vibrar em dois eixos para variar a capacitância, sendo os mais notórios para isso os eixos X e Y, com o eixo Z sem movimentação. A variação de capacitância, assim, ocorre através da alteração do valor da área de sobreposição das placas, tanto pela mudança de valor em b , quanto em h , ambos presentes na (2.2).

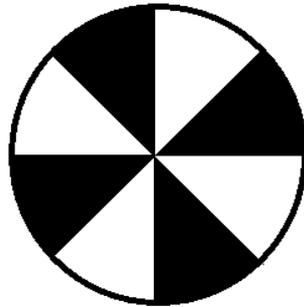


Figura 3.12: Exemplo do disco vazado que poderia ser usado para extrair energia de movimentos rotacionais.

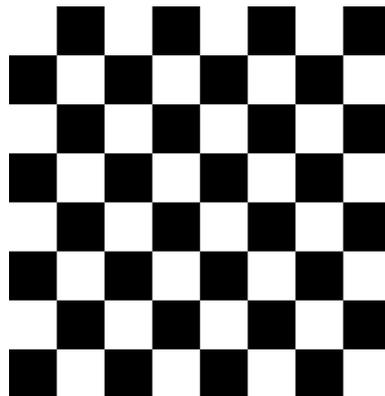


Figura 3.13: Padrão xadrez pensado para usar como capacitor de placas paralelas variáveis. Imagem retirada de [3].

Com este princípio dos tabuleiros de xadrez como placas de capacitores paralelos, percebe-se que a descrição teórica ideal da capacitância entre as placas é bem mais simplificada que a presente na descrição da estrutura da Fig. 3.11[2]. A descrição simplificada e ideal seria a (2.1) escalada para uma relação de $1/2$, uma vez que seria uma placa paralela com metade de sua área vazada. Assim a relação é reescrita como

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{2d}, \quad (3.2)$$

lembrando que é uma relação ideal. Através de (3.2) e (2.2), fica evidente que, ao mover as placas pelo eixo X, ou Y, ou ambos ao mesmo tempo, teremos a variação da capacitância. Além disso, o valor descrito em (3.2), também condiz com o valor de capacitância máxima, C_{max} , para essa geometria, como em

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{2d} = C_{max}. \quad (3.3)$$

Quanto ao valor de capacitância mínima, C_{min} , idealmente seria 0, pois não haveria sobreposição de área entre as placas. Entretanto, as bordas do tabuleiro ainda terão uma região de sobreposição e têm a presença do efeito da capacitância de borda (efeito de franja) dos quadrados desalinhados dos tabuleiros, que podem ter valores relevantes para a razão de capacitância, algo que será discutido mais adiante na presente dissertação. Portanto, tem-se um valor diferente de 0 para C_{min} . Isto é importante de ser analisado devido ao valor da razão de capacitância, N , entre C_{max} e C_{min} ,

$$N = \frac{C_{max}}{C_{min}}, \quad (3.4)$$

pois esta é fundamental para o funcionamento do dispositivo. A relação de capacitância influi diretamente com a capacidade do circuito em conseguir manter o acúmulo de cargas estável, pois se relaciona com a quantidade de carga armazenada nos capacitores variáveis a cada ciclo de operação e cada circuito tem sua relação mínima para ter funcionamento contínuo, como já mencionado em trabalho anterior [2]. O valor mínimo objetivo a ser alcançado no projeto é $N = 2$. Assim, será almejado no dimensionamento valor superior a $N = 3$, se possível, para compensar possíveis perdas no processo de fabricação.

Com essa configuração de tabuleiros sobrepostos, tem-se um capacitor variável. Porém, o ideal seria ter dois capacitores variáveis complementares. Para tal feito, é necessária a realização de uma montagem multinível, com as placas formando um "sanduíche" de placas. Percebe-se pela Fig. 3.13 que, ao espelhar o tabuleiro, os espaços preenchidos ocupam os espaços que antes eram vazios. Assim, usando placas espelhadas e não espelhadas, é possível fazer capacitores variáveis complementares, de maneira que, quando um conjunto de placas estiver com sua capacitância no valor máximo, o conjunto de placas espelhadas estará com seu valor de capacitância mínima.

Essa arrumação consiste em separar este "sanduíche" em três grupos de placas: o primeiro grupo com placas fixas, o segundo com placas móveis com o mesmo padrão xadrez que o primeiro grupo de placas fixas e, por fim, o terceiro grupo com placas fixas com padrão xadrez espelhado em relação às placas fixas do primeiro grupo. O grupo de placas móveis é o primeiro terminal elétrico da montagem, sendo ele comum aos dois capacitores variáveis, podendo ser aterrado, ou um ponto comum na montagem do circuito, como será mostrado no Dobrador de Bennet, mais a frente. Assim, cada grupo de placas fixas será o terminal faltante de cada um dos capacitores variáveis e estes serão complementares. Mais a frente será apresentado como a montagem dos capacitores pode variar para cada um dos circuitos testados.

A Fig. 3.14 traz um corte do plano XZ do esboço de uma possibilidade dessa

configuração de placas, seguindo a estrutura multinível citada. A composição é feita com seis placas fixas, separadas em dois grupos de três placas (um espelhado ao outro para cada terminal do capacitor), as quais serão postas intercaladas com cinco placas móveis que separam as placas fixas. Com esse padrão, cada conjunto de placas fixas terá cinco placas móveis para variação de capacitância. Porém, essa mesma configuração apresenta um inconveniente: o conjunto de placas fixas que forem espelhadas em relação às placas móveis, terá menor valor de capacitância máxima que o conjunto de placas fixas que têm o mesmo padrão das placas móveis. Isto ocorre, pois, ao deslocar esse conjunto de placas para a posição de capacitância máxima, fileiras do "tabuleiro de xadrez" não serão sobrepostas, conforme ilustrado na Fig. 3.15. Essa desvantagem acarreta no problema dos capacitores que, apesar de complementares, não serão simétricos, apresentando valores de capacitância máxima e mínima diferentes e, conseqüentemente, tendo relações de capacitância diferentes, o que afeta diretamente a coleta e energia.

Um movimento simples para a posição de capacitância máxima em apenas um eixo, que vise deslocar apenas uma casa dos tabuleiros espelhados, leva à perda de duas fileiras, conforme visto na Fig. 3.15. Ao realizar a defasagem de duas casas dos tabuleiros em um eixo, haverá a perda de quatro fileiras. Assim, fica evidente a perda de fileiras para o posicionamento de capacitância máxima das placas espelhadas. Por conseqüência, pode ser facilmente inferido que essa relação será dobrada para um deslocamento nos dois eixos simultaneamente, no qual, ao deslocar uma casa do tabuleiro na diagonal, serão quatro fileiras perdidas. Uma forma de tentar compensar esse efeito seria colocar mais placas que tenham o padrão espelhado, ou mais placas móveis se relacionando com a placa espelhada.

O experimento a ser realizado tem a premissa de testar movimentos com uma ou duas casas de defasagem. Assim, uma solução para esse problema é colocar mais uma placa móvel imediatamente acima da última placa fixa presente na configuração da Fig. 3.14. Assim, o arranjo de placas espelhadas terá um nível a mais para área de sobreposição, podendo compensar a perda de fileiras. Este arranjo pode ser visto na Fig. 3.16. Nessa configuração, a placa fixa espelhada é sobreposta por seis placas móveis, enquanto que a placa fixa de mesmo padrão que a placa móvel é sobreposta por cinco placas móveis. Isto tende a aproximar a relação entre a capacitância máxima e mínima nos dois conjuntos de capacitores variáveis para um valor comum.

Com cargas igualmente distribuídas nas placas, a variação de capacitância acontece idealmente, devido a deslocamentos nos eixos X e Y, variando-se os valores de b e h , respectivamente, como dito anteriormente. Denomina-se o deslocamento no eixo X como x_o e no eixo Y como y_o . Assim, a (3.2) é reescrita como:

$$C_{var} = \frac{\epsilon_o(b - x_o)(h - y_o)}{2d} \quad (3.5)$$

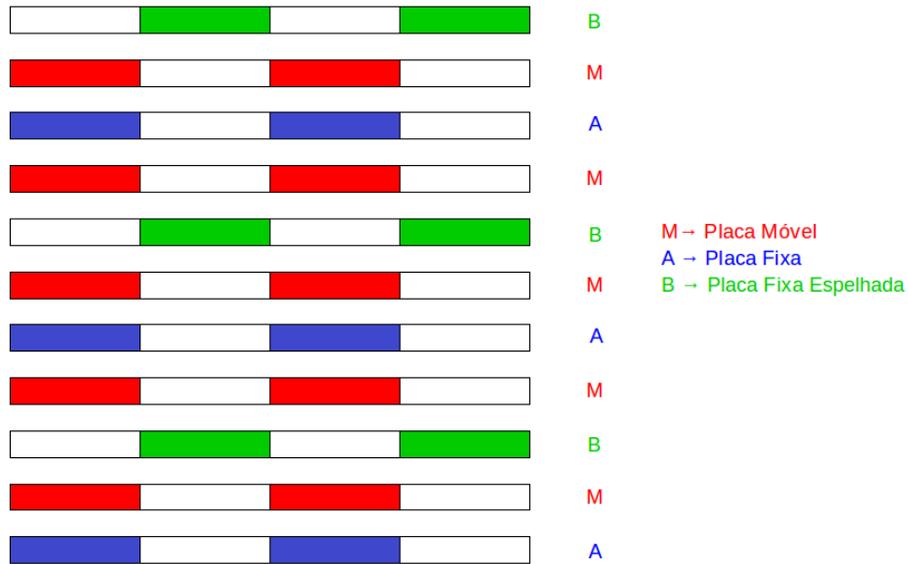


Figura 3.14: Padrão das placas dos capacitores. Este padrão é constituído por 5 placas móveis, 3 placas fixas de padrão igual à placa móvel e 3 placas fixas de padrão espelhado.

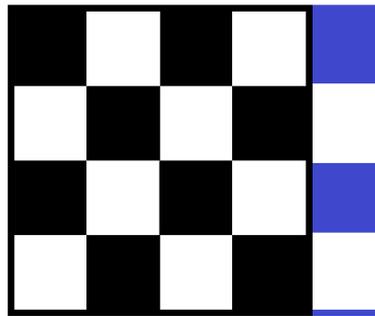


Figura 3.15: Representação da defasagem entre dois tabuleiros espelhados, um em preto por cima e outro em azul por baixo. Note que, ao defasar, perdem-se duas colunas de sobreposição dos capacitores, diminuindo o valor de capacitância máxima.

A (3.5) pode ser expandida para melhor visualizar os efeitos dos possíveis deslocamentos na sua composição:

$$C_{var} = \frac{\epsilon_0 b h}{2d} - \frac{\epsilon_0 h x_0}{2d} - \frac{\epsilon_0 b y_0}{2d} + \frac{\epsilon_0 x_0 y_0}{2d} \quad (3.6)$$

A (3.6) pode ser escrita em forma de integral e, em seguida, expandida para uma melhor análise:

$$C_{var} = \underbrace{\frac{\epsilon_0 b h}{2d}}_1 - \underbrace{\int_0^{x_0} \frac{\epsilon_0 h}{2d} dx}_2 - \underbrace{\int_0^{y_0} \frac{\epsilon_0 b}{2d} dy}_3 + \underbrace{\int_0^{x_0} \int_0^{y_0} \frac{\epsilon_0}{2d} dx dy}_4 \quad (3.7)$$

Essa expansão de C_{var} permite conjecturar relações do tipo de movimento com cada parcela presente na (3.7). A primeira parcela corresponde ao valor da capacitância total da placa, nota-se então que esta é igual a C_{max} . A segunda parcela corresponde ao

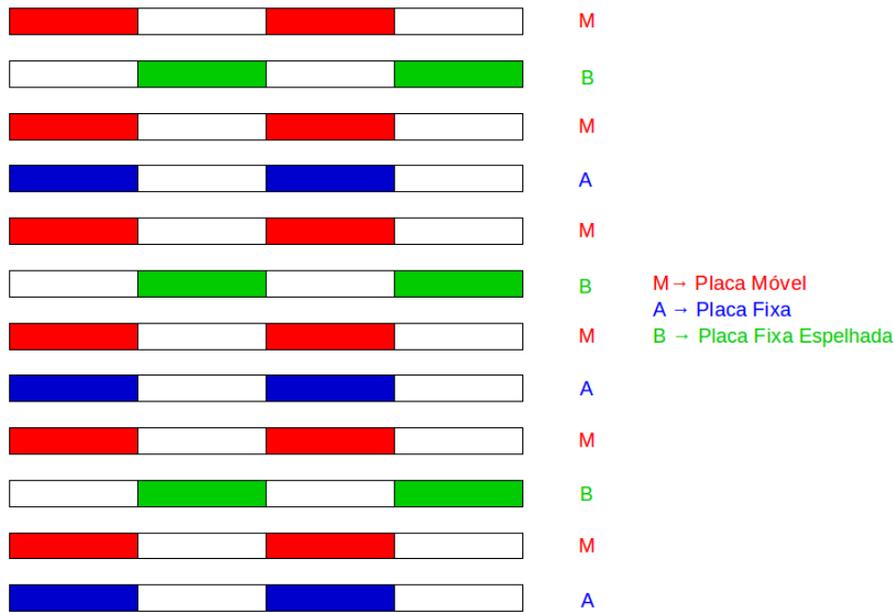


Figura 3.16: Padrão das placas dos capacitores. Este padrão é constituído por 6 placas móveis, 3 placas fixas de padrão igual à placa móvel e 3 placas fixas de padrão espelhado.

deslocamento somente no eixo X, tendo seu valor associado a x_o e subtraído do valor total de C_{max} , uma vez que representa uma defasagem entre os quadrados do tabuleiro de xadrez. A terceira parcela corresponde ao deslocamento no eixo Y, com seu valor associado a y_o e, também, subtraído do valor total de C_{max} , pois representa uma defasagem entre os quadrados do tabuleiro de xadrez. A quarta parcela mostra um fator interessante da geometria apresentada, apresenta uma soma que envolve um produto entre x_o e y_o , contribuindo para o aumento da capacitância à medida que ocorre deslocamento nos dois eixos (X e Y) simultaneamente. Este efeito relaciona-se a um movimento em diagonal, que compensa uma subtração extra de um pequeno quadrado no sentido do deslocamento diagonal, que seria diminuído duas vezes. Na (3.7) fica também evidente que os movimentos podem ser usados independentemente ou simultaneamente, conforme análise anterior. Com a movimentação somente no eixo X, a terceira e a quarta parcelas são zeradas, tendo também comportamento análogo para movimento somente no eixo Y. Percebe-se que, sempre que houver movimentação em apenas um eixo, a quarta parcela será sempre zerada, confirmando que se trata de um movimento em diagonal.

A partir das formulações anteriores para C_{var} , e tendo V_{cap} como a tensão entre as placas de um dos capacitores, é possível determinar a energia potencial ideal armazenada U_{var} entre as placas para o caso do padrão de xadrez, sendo esta uma relação já conhecida:

$$U_{var} = \frac{C_{var} V_{cap}^2}{2} \quad (3.8)$$

Assim, quando o valor de C_{var} for máximo, conforme representado por

$$U_{max} = \frac{C_{max}V_{max}^2}{2}, \quad (3.9)$$

U_{var} também assumirá seu valor máximo e, analogamente para mínimo, quando $C_{var} = C_{min}$

$$U_{min} = \frac{C_{min}V_{min}^2}{2}. \quad (3.10)$$

Pode-se expandir a (3.8) em termos dos deslocamentos x_o e y_o a partir de

$$U_{var} = \frac{\epsilon_o(b-x_o)(h-y_o)V_{cap}^2}{4d} \quad (3.11)$$

e, na forma integral, a partir de

$$U_{var} = \frac{V_{cap}^2}{2} \left[\frac{\epsilon_o b h}{2d} - \int_0^{x_o} \frac{\epsilon_o h}{2d} dx - \int_0^{y_o} \frac{\epsilon_o b}{2d} dy + \int_0^{x_o} \int_0^{y_o} \frac{\epsilon_o}{2d} dx dy \right]. \quad (3.12)$$

A análise de (3.7) pode ser feita também na (3.12) e, assim, notar as influências dos respectivos deslocamentos nos eixos X e Y influenciando os valores da energia que se extrai dessa estrutura.

3.2.2 Forças Envolvidas

Um estudo interessante e necessário para a melhor compreensão do funcionamento da estrutura em microeletrônica é o das forças envolvidas no movimento e como elas podem interferir no deslocamento do dispositivo. Em uma estrutura em escala macroscópica, como é o caso do protótipo, essa interação eletromecânica das forças fica mais nublada, pois o movimento ocorre de maneira forçada, com a utilização de motores ou uma excitação artificial das molas, uma vez que a motivação é o estudo conceitual da geometria. A atuação das forças pode ser denotada pelo campo elétrico crescente que, após alguns ciclos de funcionamento, promove descargas eletrostáticas entre os capacitores [2]. Porém, um estudo feito em relação às especificações físicas do MEMS, desenvolvido pelo professor Galayko e sua equipe [14], mostra a importância de se fazer tal análise. Isto será debatido mais a frente.

Tendo em vista a fabricação de MEMS, a análise do conjunto eletromecânico é de extrema importância, uma vez que, diferentemente dos experimentos macroscópicos até aqui feitos, não se tem a possibilidade de observar o mecanismo durante seu funcionamento, impossibilitando a visualização das forças agindo sobre a estrutura. Esse estudo é importante para definir o material a ser usado na fabricação, no qual não somente é necessário avaliar a sua condutividade e durabilidade, mas também a sua flexibilidade e elasticidade, porque a atuação de forças pode deformar o material ou a organização da

geometria proposta. Isto também vale para análise do material de que são feitas as molas de um MEMS acionado por vibração [26].

Um efeito possível da força elétrica sobre as placas de xadrez impressas em 3D é a atração entre elas, conforme ocorre o aumento da tensão entre os capacitores. Ao aumentar a tensão entre as placas, aumenta-se o campo elétrico e, conseqüentemente, a força elétrica entre as placas. A estrutura é impressa em ABS condutor e a placa será de espessura em torno de 1 mm , como será discutido na próxima seção. Em comparação à estrutura em metal, ou polisilício, que são feitos os MEMS, o ABS apresenta flexibilidade e elasticidade maiores, sendo suscetível a deformações, conforme a estrutura sofre estresses por qualquer agente externo, como é o caso da força elétrica que promove a atração entre as placas. Essa atração ficará mais pronunciada no centro da placa, porque é uma região menos rígida, por estar mais afastada das bordas e dos apoios para contato e alinhamento. A oscilação devido às forças pode dificultar o funcionamento, uma vez que se as placas se encostarem, fecham um curto-circuito que impossibilita a ativação do circuito multiplicador de tensão. Além disso, as forças podem mudar a posição das placas, tirando a estrutura do alinhamento proposto. Tudo isto pode contribuir para a danificar permanentemente a estrutura.

Para descobrir a força elétrica, F_{el} vertical entre duas placas paralelas, tem-se que derivar a energia potencial armazenada U entre as placas em relação à distância d . Indo ao encontro das (3.11) e (3.12), a força elétrica para as placas paralelas em padrão de xadrez pode ser escrita como:

$$F_{el} = \frac{dU}{dd} = \frac{d}{dd} \left[\frac{\epsilon_o(b-x_o)(h-y_o)V_{cap}^2}{4d} \right] = -\frac{\epsilon_o(b-x_o)(h-y_o)V_{cap}^2}{4d^2} \quad (3.13)$$

$$F_{el} = -\epsilon_o \frac{V_{cap}^2}{4d^2} [bh - hx_o - by_o + x_o y_o] \quad (3.14)$$

Com (3.14), também pode ser feita uma análise semelhante às anteriores quanto à contribuição dos deslocamentos em cada eixo para a força elétrica. Essa força tende a aproximar as placas dos capacitores, deformando-as. Estudos a respeito dessa relação podem ser feitos através de softwares de simulação multifísica. Porém, estes apresentam preços elevados de mercado. Uma alternativa a esses softwares é a utilização de circuitos análogos eletromecânicos, que consistem em simulações das equações diferenciais da mecânica através de circuitos equivalentes e as conexões com a parte elétrica do sistema de coleta de energia, integrando a parte mecânica do MEMS com a parte elétrica.

3.2.3 Construção no AutoCAD

O conceito do tabuleiro de xadrez não se mostra realístico para uma construção em MEMS ou para impressão 3D, devido aos pontos de contato entre as casas do xadrez serem apenas os vértices dos quadrados. Isto não é estruturalmente aplicável, uma vez que não é possível de ser realizado e, mesmo que fosse, não ofereceria resistência estrutural para a ação da força peso, e da atração elétrica entre as placas fazendo a estrutura colabar ao centro. Para tornar a estrutura factível, os quadrados terão que ter hastes de ligação entre seus vértices. A estrutura feita desta maneira se assemelha a um favo de mel (Fig. 3.17). Outra questão importante é pensar na largura da moldura do tabuleiro, pois ela também contribui para a estabilidade da estrutura.

Esses pontos são importantes na construção do modelo em CAD, uma vez que a estrutura apresentará vários níveis e a distância entre os níveis é de extrema importância para a construção do capacitor, representando a distância d entre as placas. Assim, caso haja algum afundamento em alguma parte da estrutura a distância será menor, podendo ocasionar contato entre placas de níveis diferentes, gerando curto-circuito e danificando toda a estrutura. Além disso, existe a possibilidade de as placas se atraírem pelo efeito da força elétrica entre elas. Portanto, ter diferença no valor de d estabelecido no projeto inicial pode acarretar diferentes problemas e a quebra de todo o dispositivo.

Uma primeira abordagem feita pode ser vista na Fig. 3.17, na qual oferece uma vista de cima de um modelo inicial que foi impresso para teste. Pela referida imagem, nota-se que a capacitância não terá realmente o valor escalado de $1/2$ da área total da placa mencionado anteriormente, pois não é um tabuleiro de xadrez propriamente dito, e terá um valor menor que esse fator. Isto pode ser facilmente descoberto através da ferramenta de CAD que for escolhida. No AutoCAD, o comando "area" permite selecionar áreas manualmente. O método escolhido para obter essa informação foi selecionar o quadrado delimitado pela moldura e subtrair os vazios, pois é mais fácil de realizar a seleção da área. O valor retornado é expresso em mm^2 , uma vez que foi escolhido o milímetro como unidade para modelar o projeto. Porém, isto pode ser configurado no programa.

A estrutura preliminar é composta por um tabuleiro com 28x28 linhas e colunas. A seleção foi feita, partindo-se das linhas separando-as em dois grupos: as duas linhas das bordas (primeira e última linha) e as linhas centrais (restante das 26 linhas). As linhas da borda podem ser separadas em duas geometrias diferentes: treze hexágonos irregulares nas partes centrais e um pentágono irregular em uma das quinas, conforme pode ser visto na Fig. 3.18a. As linhas centrais são separadas, também, em duas geometrias: treze octógonos irregulares ao centro e um hexágono irregular na extremidade, sendo este igual aos hexágonos irregulares presente nas linhas da borda, conforme pode ser visto na Fig. 3.18b. Note que tem-se catorze espaços vazios, conseqüentemente, o mesmo número de espaços preenchidos, respeitando o conceito do tabuleiro de xadrez. Todas as áreas foram

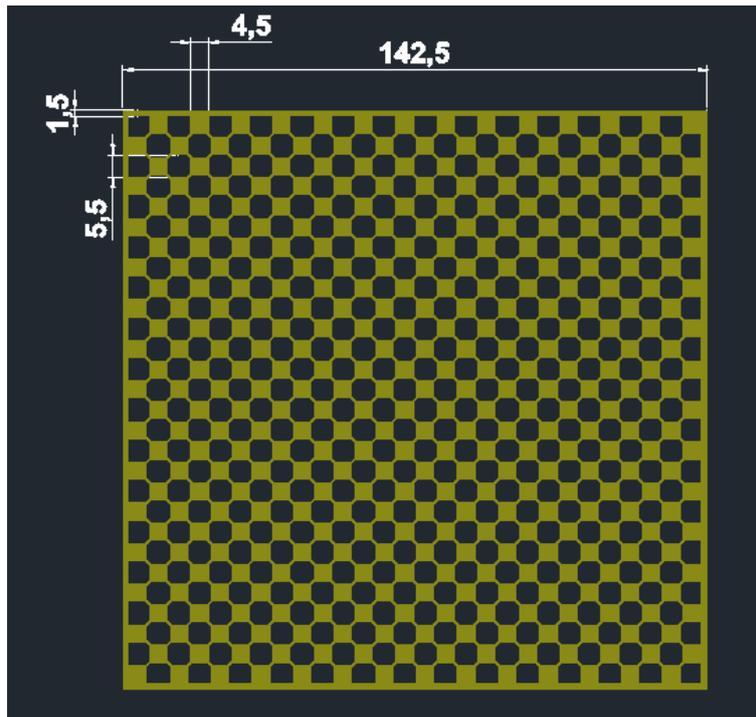


Figura 3.17: Vista de cima de um modelo preliminar, com cotas estimadas em milímetros. A estrutura parece um favo de mel nesta perspectiva.

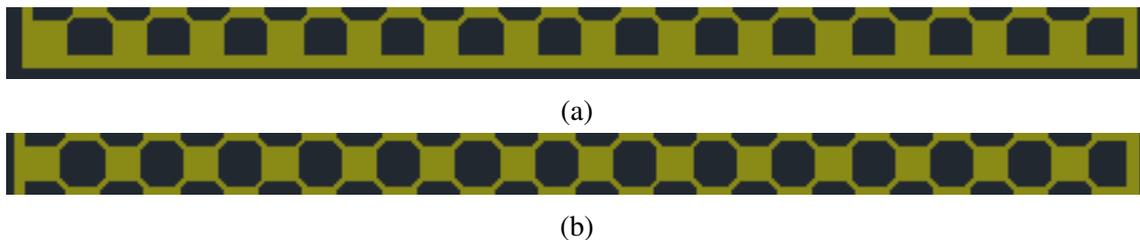


Figura 3.18: A figura (a) mostra a linha da borda inferior da placa e (b) mostra uma linha central da placa. Consegue-se notar a diferença da geometria com clareza fazendo essa separação.

calculadas usando o AutoCAD.

A área total compreendida pela moldura é de $20306,25 \text{ mm}^2$, ou $203,0625 \text{ cm}^2$. A Tabela 3.1 contém os valores para as linhas das bordas da placa. A Tabela 3.2 contém os valores para as demais linhas da placa. Ao somar os valores totais vazios apresentados, encontra-se 11060 mm^2 , ou $110,60 \text{ cm}^2$. Assim, a área efetiva (A_{max}) para capacitância máxima é provida pela subtração da área total, pelos valores apresentados nas tabelas, resultando em $9246,25 \text{ mm}^2$, ou $92,4625 \text{ cm}^2$. Esse valor será o utilizado para calcular a capacitância máxima.

Comparando os valores da área total e da área efetiva, fica perceptível que o fator de $1/2$ nas equações de capacitância definidas para o modelo de tabuleiro de xadrez tem que ser corrigido para o valor de $0,455$, aproximadamente, conforme visto na Tabela 3.3.

O projeto vai ser desenvolvido usando 1 mm de distância entre as placas (d). Com o

Áreas (borda)		
	mm ²	cm ²
1 Hexágono Irregular	26,5	0,265
13 Hexágonos Irregulares	344,5	3,445
Pentágono Irregular	24,5	0,245
Área Vazia de 1 Linha	369	3,690
Total (2 linhas)	738	7,380

Tabela 3.1: Tabela com os valores de área encontrados no AutoCAD para as duas linhas das bordas.

Áreas (borda)		
	mm ²	cm ²
1 Octógono Irregular	28,5	0,285
13 Octógonos Irregulares	370,5	3,705
Hexágono Irregular	26,5	0,265
Área Vazia de 1 Linha	397	3,970
Total (26 linhas)	10322	10,322

Tabela 3.2: Tabela com os valores de área encontrados no AutoCAD para demais linhas da placa (entre as linhas de bordas).

valor de d definido, o valor de capacitância máxima teórico encontrado para um par de placas paralelas é $C_{max} = 81,83 \text{ pF}$, aproximadamente. Assim, é necessário utilizar três pares de placas para alcançar um valor superior a 200 pF . Assim, o valor de capacitância máxima para três pares de placas é $C_{max} = 245,49 \text{ pF}$, aproximadamente.

Área		
	mm ²	cm ²
Total	20306,25	203,0625
Efetiva	9246,25	92,4625
Relação das Áreas	0,455	

Tabela 3.3: Relação entre a área total e a efetiva.

Para o valor mínimo de capacitância, leva-se em consideração a área das bordas e da sobreposição das hastes de ligação entre os quadrados do xadrez. A área correspondente A_{min} é de 1210 mm^2 , ou $12,10 \text{ cm}^2$. Por fim, o valor de capacitância mínima teórico é $C_{min} = 10,71 \text{ pF}$, aproximadamente. Sendo três pares de capacitores, o valor final é $32,13 \text{ pF}$.

A relação de capacitância, N , entre C_{max} e C_{min} é aproximadamente 7,64. Este é um valor teórico e, portanto, ideal, tendo várias nuances à serem vislumbradas após a fabricação desse modelo prévio. Porém, estes valores servem para guiar e basear a fabricação do modelo, podendo refletir em parte uma realidade. Isto será discutido no próximo capítulo.

Capítulo 4

Protótipo e Montagem

Este capítulo aborda a fabricação do protótipo, a análise do resultado da fabricação, a montagem da estrutura e como são conectados os circuitos multiplicadores de tensão aos capacitores.

4.1 Impressão 3D Em Análise

4.1.1 Idealização e Resultado da Fabricação da Estrutura

A impressão 3D foi realizada no Laboratório de Integração em Tecnologia Analítica (LabITan), no Instituto de Química (IQ) da UFRJ, com a supervisão e auxílio do Prof. Ricardo Michel. A impressora utilizada foi a GTMax3D Core A3 com filamento ABS condutivo. O software de fatiamento, que converte o arquivo no formato STL em formato GCODE lido pela impressora, foi o Simplify3D. As configurações utilizadas para o filamento ABS condutivo no Simplify3D e o necessário preparo da impressora podem ser verificados no Apêndice A.

Como foi mostrado na Fig. 3.17, no plano XY, o desenho base preliminar para a placa móvel, bem como da placa fixa, com as cotas em destaque. Uma vista em perspectiva isométrica do desenho base pode ser observada na Fig. 4.1. A espessura das placas foi fixada em 1 mm , igual à distância de separação entre elas. As placas fixa e móvel têm quatro abas de suporte e contatos com furos para parafusos de $1/8$ de polegada. Os parafusos fazem o contato elétrico entre as placas. O padrão das abas é diferente para cada tipo de placa. Na placa móvel, as abas estão situadas nos vértices da moldura, enquanto que na placa fixa estão perpendiculares à borda da moldura, próximos aos vértices. As abas da placa fixa apresentam um padrão alternado, como um “cata-vento”, e assim permite que o mesmo arquivo STL sirva para a placa fixa normal e a espelhada, pois basta virar a placa que o padrão será espelhado e as abas para os parafusos de contato não são sobrepostas. A Fig. 4.2 mostra uma perspectiva isométrica da placa móvel, na qual podem ser vistas em destaque as abas de suporte e contato na cor vinho. A Fig. 4.3 mostra uma perspec-

tiva isométrica da placa fixa, na qual podem ser vistas, em destaque, as abas de suporte e contato na cor verde.

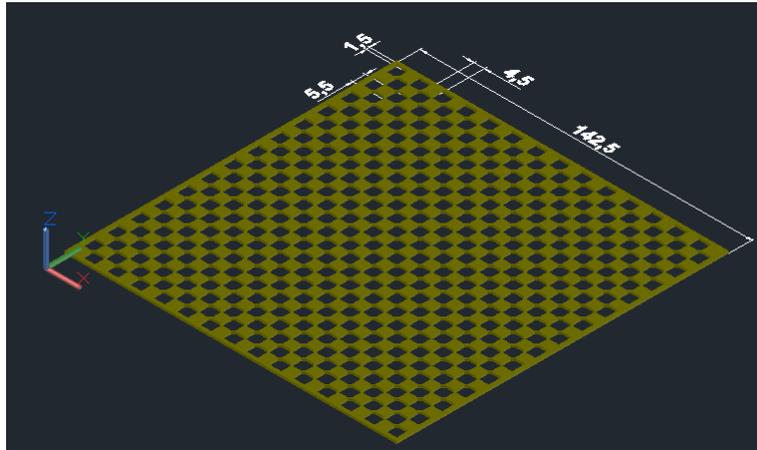


Figura 4.1: Perspectiva isométrica do modelo base preliminar das placas, com cotas estimadas em milímetros.

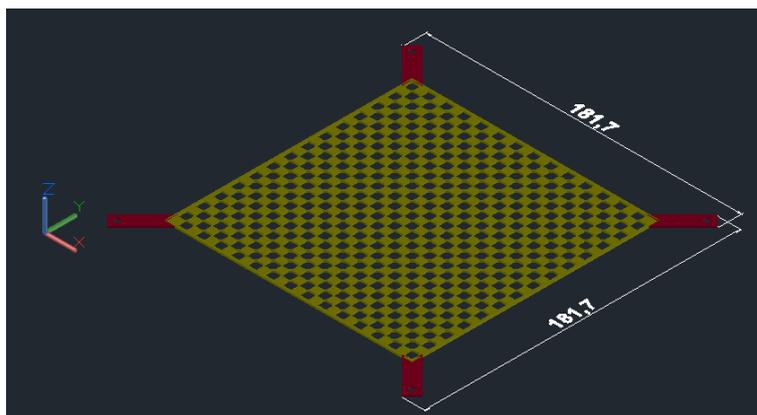


Figura 4.2: Perspectiva isométrica da placa móvel preliminar, com cotas estimadas em milímetros e abas em destaque.

Com a fabricação desse primeiro modelo para teste da estrutura e medição de capacitância, as seguintes conclusões foram tiradas e mostraram que essa estrutura não poderia ser implementada como resposta final. A estrutura mostrou pouca resistência mecânica no centro, colabando facilmente pela ação da força peso e proporcionando uma dificuldade em manter 1 mm de distância entre as placas testadas. Isto foi verificado em um simples teste de montagem da estrutura, sem a aplicação de nenhuma tensão elétrica entre as placas e, portanto, sem atração de força elétrica entre elas. Esta maleabilidade foi percebida em toda a extensão da estrutura, de maneira que, ao aplicar uma tensão mecânica de rosqueamento de um parafuso à estrutura, ela é facilmente retorcida. Este fator tende a dificultar o funcionamento da movimentação da placa, porque as ondulações da estrutura tensionada podem amplificar ainda mais essa diminuição da distância de 1 mm entre as placas e proporcionar o contato entre elas em diferentes pontos durante a movimentação.

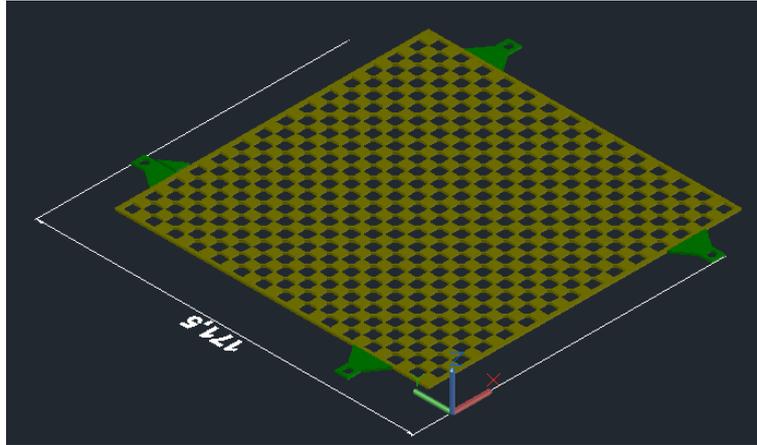


Figura 4.3: Perspectiva isométrica da placa fixa preliminar, com cotas estimadas em milímetros e abas em destaque.

Este contato gera o curto entre as placas e possíveis danos, dependendo da intensidade.

Este resultado pode ser creditado ao material ABS, que apresenta boa maleabilidade, e à espessura selecionada das placas, que oferece menor resistência mecânica. O ABS condutivo não pode ser substituído nesse processo e aumentar a espessura elevaria o peso da estrutura, tornando mais difícil gerar o movimento, diminuindo a frequência e aumentando a força peso no centro das placas, como também a altura de toda a estrutura que irá ser montada, algo indesejado. Portanto, este problema estrutural pode ser contornado mexendo no tamanho dos quadrados das casas do xadrez, nas hastes de suporte e na largura das bordas. Os quadrados maiores dariam mais resistência mecânica à estrutura, em conjunto com hastes mais longas também. A borda mais larga serviria para resistir mais à tensão de rosqueamento dos parafusos, reduzindo as ondulações e torções na placa.

Estas modificações alteraram o valor de capacitância entre as placas. Porém, outro efeito inesperado surgiu nos testes iniciais da primeira estrutura: a capacitância de borda apresentou um valor significativo.

4.1.2 Efeitos de Borda

O teste inicial com a primeira placa (Figs. 4.2 e 4.3) mostrou um valor considerável para capacitância de borda. Os valores de capacitância foram aferidos usando um medidor da Agilent modelo E4980A Precision LCR Meter de $20\text{ Hz} - 2\text{ MHz}$, presente no LPS. O valor de capacitância máxima e mínima quase não diferenciavam entre si, conseguindo uma relação de capacitância N menor que 1,3. Os valores de capacitância para apenas duas placas paralelas ficaram em torno de 450 pF , enquanto que o previsto teórico ideal para capacitância máxima era aproximadamente 80 pF . Isto demonstra um fator dominante de capacitância de borda sobre o efeito das áreas paralelas.

O problema central observado foi o valor da capacitância mínima, muito próximo do valor máximo. Fazendo, assim, a relação entre as capacitâncias ficar muito inferior ao

estimado, inclusive menor que o mínimo necessário para o funcionamento das máquinas eletrostáticas utilizadas. Este fato pode ser creditado a dois fatores centrais: aos quadrados das casas do tabuleiro de xadrez com dimensão de lado muito próxima ao valor da distância que separa as duas placas, e à pequena distância que separa casas adjacentes do tabuleiro de xadrez ser pequena.

A primeira parte do problema é justificada, porque tendo um valor de lado próximo à distância de separação, as placas passam a ter um efeito quase de uma placa preenchida, assim aumentando muito a capacitância. Aumentar o lado dos quadrados, aumenta também o espaço vazio e, com isso, o efeito de grade do tabuleiro de xadrez fica mais acentuado e tende a diminuir o efeito dominante da capacitância de borda. Esta alternativa vai ao encontro de uma das propostas para melhorar a resistência mecânica da estrutura, assim, evitando que ocorra abaloamento ao centro dela. Ao aplicar essa solução, dois problemas são superados.

A segunda parte do problema é algo mais clara que a primeira, pois a distância entre as bordas das casas preenchidas influencia diretamente na área das casas vazias do tabuleiro de xadrez. Aumentar a área vazia, aumenta a distância entre as bordas das casas preenchidas do tabuleiro. Assim, aumenta-se a distância das bordas entre as placas paralelas (bordas entre a placa superior e inferior). A visualização do que é dito pode ser visto na Fig. 4.4. Esta abordagem, além de reduzir as capacitâncias de bordas, aumenta o comprimento das hastes de ligação, outra ação que melhora, também, a resistência mecânica da estrutura perante a força peso.

A Fig. 4.4 permite visualizar o problema relacionado às bordas dos quadrados preenchidos, mencionados anteriormente. A Fig. 4.4b evidencia o distanciamento entre as bordas no eixo X, através do valor de x , deixando claro o efeito de borda entre as placas. O valor b denotado na Fig. 4.5 corresponde à distância mínima entre as bordas dos quadrados entre placas paralelas, para posição de capacitância mínima. Note que este valor é correspondente à um triângulo retângulo, conforme visto em

$$b = \sqrt{x^2 + d^2} \quad [mm]. \quad (4.1)$$

Outro valor que pode ser calculado é a distância a , que corresponde ao comprimento central das hastes de ligação entre os quadrados preenchidos, conforme visto em

$$a = \sqrt{x^2 + x^2} = x\sqrt{2} \quad [mm]. \quad (4.2)$$

Esse valor representa a separação entre os vértices os quadrados preenchidos de uma mesma placa. Outro valor a ser destacado é l , que corresponde ao lado do quadrado, e s , sendo este o espaçamento vazio entre quadrados:

$$s = 2x + l \quad [mm]. \quad (4.3)$$

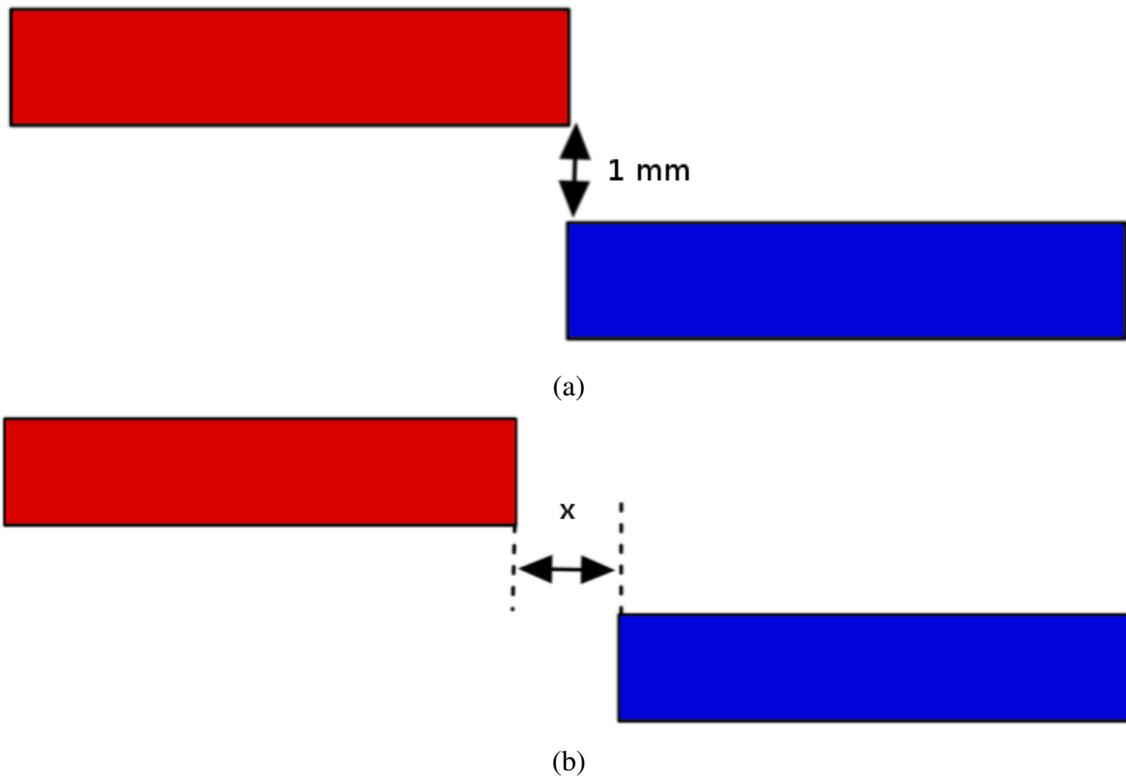


Figura 4.4: Cortes no plano XZ: (a) placas paralelas de maneira que os quadrados preenchidos fiquem com as bordas justapostas; (b) bordas afastadas por uma distância x , no eixo X.

As duas propostas para correção do efeito de borda dos capacitores são, também, soluções para os problemas de resistência mecânica e serão abordados na próxima seção da remodelagem das placas.

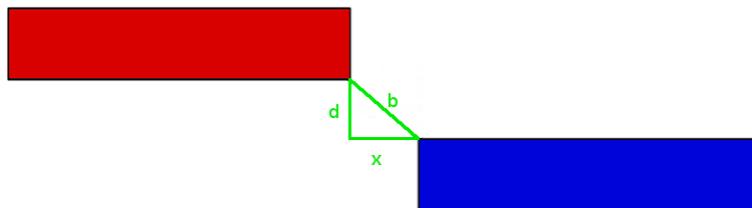


Figura 4.5: Vista em corte XZ da estrutura, evidenciando a distância b .

Este problema também mostra que realmente as fórmulas estabelecidas nos capítulos anteriores são ideais, servindo para compreensão de como atua o movimento e uma tendência para a variação de capacitância junto ao deslocamento. Porém, não podem ser tomadas como formas definitivas para a capacitância, como feito anteriormente [2], sendo necessária uma análise mais detalhada de como ocorre a distribuição de carga ao longo das placas, algo extremamente dependente da geometria escolhida. Assim, um software multifísico, como citado anteriormente, é interessante para estudos futuros desse comportamento, bem como conseguir analisar como funciona a variação de capacitância e as

influências do comportamento elétrico no funcionamento mecânico de toda a estrutura.

4.1.3 Remodelagem

Parte fundamental da remodelagem é conseguir estimar os valores de capacitância com o efeito de borda incluso. Faz-se necessário o uso de software de simulação com elementos finitos para determinar este efeito. Softwares poderosos e pagos, como COMSOL [47] e ANSYS [48], podem realizar essas operações. Estes softwares fatiam a estrutura em pequenos elementos através de uma malha de simulação (*mesh*) e calculam as influências, do efeito físico a ser estudado, de cada elemento, individualmente, em todos os outros elementos. Isto pode ser calculado de maneiras diferentes, determinando diferentes formatos para a malha (quadrados, trapézios, triângulos, etc), bem como o tamanho, e com isso, calculando o efeito para cada um desses formatos [49]. Uma alternativa de software gratuito é o Canton [50], que permite fazer uma estimativa da relação de capacitância máxima e mínima.

O Canton usa escala em centímetros e esferas como elementos para calcular as capacitâncias, podendo visualizar como se redistribuem as posições das bolinhas de acordo com as cargas presentes na simulação. Permite calcular a carga nos elementos e também a capacitância entre eles. Existem outras geometrias baseadas em bolinhas, como pode ser visto no Apêndice B, onde é explicado com mais detalhes o funcionamento do software e listadas as estruturas testadas. Os testes foram feitos usando quadrados e visando ter uma relação de capacitância máxima e mínima acima de três para dar margem a possíveis erros do processo de fabricação e montagem. Durante os testes, foi verificado um valor ótimo para o afastamento x , de maneira que, promovendo um afastamento além desse valor, a relação de capacitância começa a diminuir e o mesmo ocorre com um afastamento menor.

Por outro lado, o Canton tem uma limitação quanto à quantidade de elementos presentes na simulação, bem como a escala desses elementos. Assim, a simulação final vislumbra mais a relação de capacitâncias que os valores máximos e mínimos, porque essa limitação de escala e elemento não permite calcular toda a estrutura. Porém, com a mitigação do efeito da capacitância de borda, o valor tende a se aproximar mais do ideal usando as áreas calculadas no AutoCAD, ainda que o experimental seja maior que o esperado. Assim, com cálculos para capacitância máxima idealmente apontando 200 pF , o valor real será maior. Por fim, o principal objetivo desta simulação é estimar o valor do espaço vazio necessário para minimizar o efeito de borda nos capacitores, conseguindo, assim, estabelecer uma relação entre as medidas da distância entre as placas e dos tamanho dos quadrados preenchidos e vazios, assim, traduzindo na construção de um novo modelo.

Durante o processo de remodelagem, constatou-se o valor do lado do quadrado preenchido sendo 1 cm e o espaçamento entre as bordas desses quadrados no valor de $1,6\text{ cm}$.

Quando posicionado para menor capacitância, a distância x será de 3 mm . Assim, segundo a (4.1), a distância entre bordas de quadrados entre as placas paralelas vale $b = 3,2\text{ mm}$, aproximadamente. Em comparação com o modelo preliminar, o quadrado tinha lado $4,5\text{ mm}$ e espaçamento de $5,5\text{ mm}$. Quando posto na posição de capacitância mínima, tem-se $x = 1\text{ mm}$ e $b = 1\text{ mm}$. O novo modelo apresenta uma distância b $3,2$ vezes maior que no teste preliminar. Pelo teste análogo feito no Canton, a relação de capacitância para esta nova estrutura fica em torno de $3,46$, conferindo uma margem de erro considerável para o valor objetivo estabelecido igual a 2 .

Outro fator importante é pensar quantos quadrados preenchidos terá cada linha do tabuleiro de xadrez. O modelo preliminar mostrou que a estrutura poderia ter dimensões menores, tendo em vista o valor de capacitância máxima encontrada em seus testes. A estrutura do primeiro teste tinha moldura com lado de $14,25\text{ cm}$. Portanto, pode-se ter um valor menor e, conseqüentemente, menos quadrados. Assim, ficou definido que seriam postos quatro quadrados preenchidos por linha do tabuleiro de xadrez, totalizando oito casas por linha (coincidentemente, o mesmo número de casas que há em um tabuleiro de xadrez real). Esta alteração já atinge duas medidas para melhorar a resistência mecânica da placa: maior coesão mecânica na placa, dificultando colabar, e diminuir deformação da placa por tensões mecânicas. Outra, seria o aumento da largura da moldura, porém, os testes feitos na fabricação preliminar mostraram que não seria crítico à parte mecânica alterar esse valor. A estrutura menor em si também contribui para ter maior coesão mecânica, uma vez que encurta-se a distância entre a região central da estrutura, onde é mais intensa a força peso e atração da força elétrica, e os pontos fixos de apoio dos parafusos. Quadrados maiores e hastes de ligação maiores ajudam a tirar o fator de torção que pode ser aplicado ao rosquear os parafusos.

Com os valores de x , b e s , somando-se a definição do número de quadrados preenchidos, já é possível elaborar um novo projeto no AutoCAD. A Fig. 4.6 mostra o desenho base do tabuleiro, com as respectivas cotas. Para realizar o modelo de placa móvel e fixa, o mesmo preceito adotado para o modelo anterior será seguido. Porém, agora as abas de suporte são mais compridas, pois o movimento para variar a capacitância entre os valores máximo e mínimo é maior. Abas mais compridas tendem a promover maior abaloamento, por ter um ponto de apoio mais distante do ponto de aplicação da força peso. Para compensar esse efeito, novas abas de suporte foram feitas seguindo um formato trapezoidal e conferindo maior resistência mecânica. Essa modificação foi implementada nas placas fixas, já que a placa móvel tem as abas nas quinas e atenua esse efeito. Essas mudanças tendem a mitigar o efeito de atração da força elétrica e colabamento pela força peso, aumentando a resistência mecânica de toda a estrutura. Outro efeito dessa modificação é melhorar a resistência a possíveis torções pela ação do rosqueamento dos parafusos. A Fig. 4.7 traz em destaque na cor verde as abas trapezoidais na placa fixa e a Fig. 4.8 traz em destaque na cor roxa as abas na placa móvel.

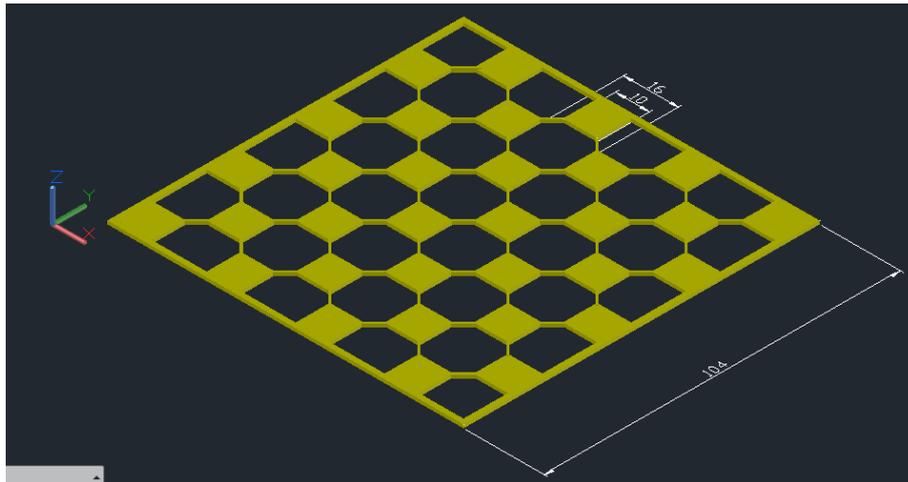


Figura 4.6: Novo modelo de capacitor baseado em um tabuleiro de xadrez. Cotas em milímetros.

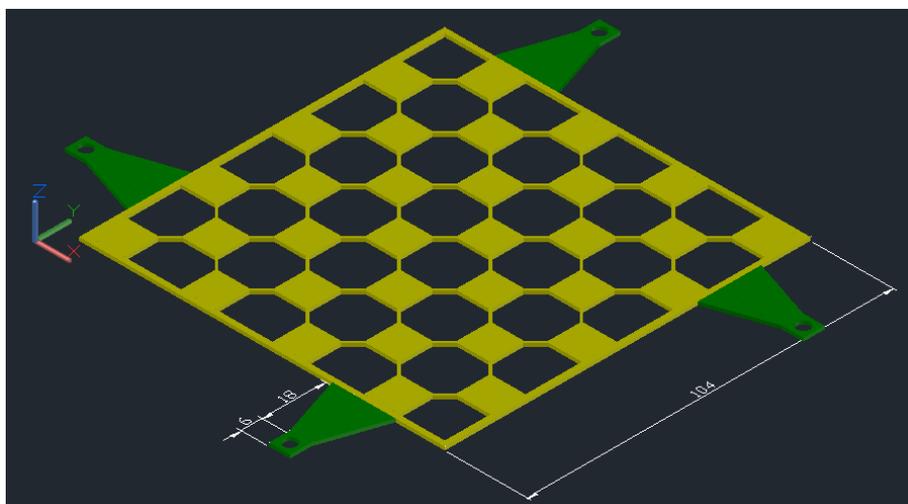


Figura 4.7: Nova placa fixa com novas abas e cotas em milímetros.

4.2 Montagem do Protótipo

4.2.1 Estrutura

A montagem dos capacitores foi ensaiada em um primeiro teste no AutoCAD, com os possíveis movimentos a serem feitos (Fig. 4.9). Os parafusos usados foram do tipo máquina com 1/8 de polegada, com comprimento de 4,2 cm. Porcas com espessura de 2 mm, aproximadamente, e arruelas com 1 mm, aproximadamente, foram usadas, sendo ambas de 1/8 de polegada. A separação entre cada placa é de 1 mm, como dito anteriormente. Porém, a distância entre cada conjunto é diferente. As placas móveis são separadas, entre si, por 3 mm. Cada grupo de placas fixas é separado por 7 mm. Para criar um padrão no espaçamento, separadores com 3 mm de espessura foram impressos com ABS condutivo. Com isso, para separar as placas móveis, um separador basta e, para separar as placas fixas, usam-se dois separadores e uma ruela. As abas foram pensadas

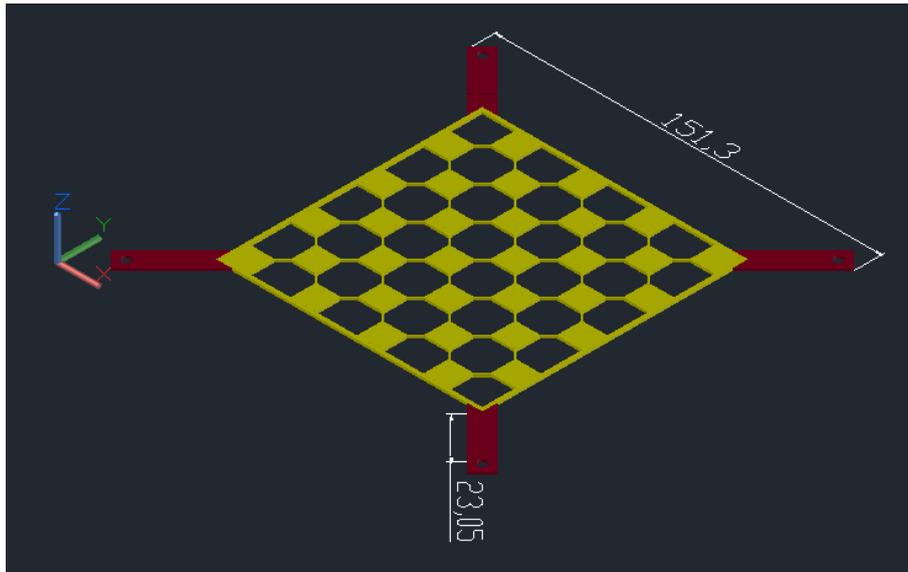


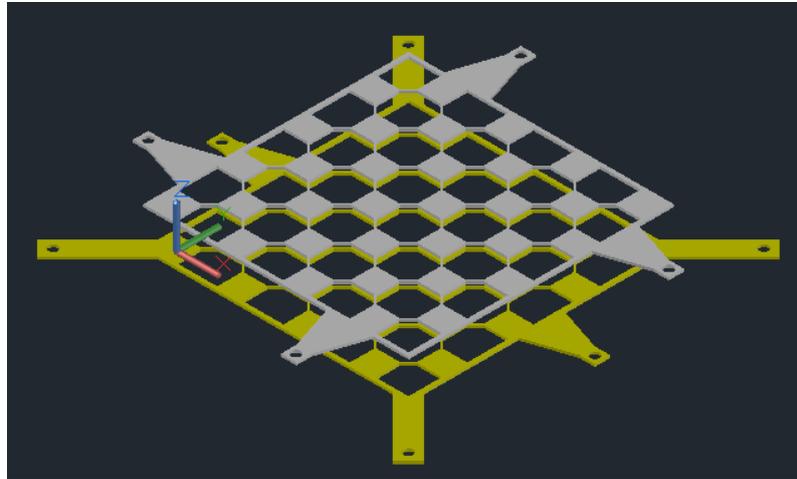
Figura 4.8: Nova placa móvel com cotas em milímetros.

para dar folga durante o movimento diagonal e lateral, para que não ocorra o contato entre os parafusos e as placas deslocadas (Fig. 4.9).

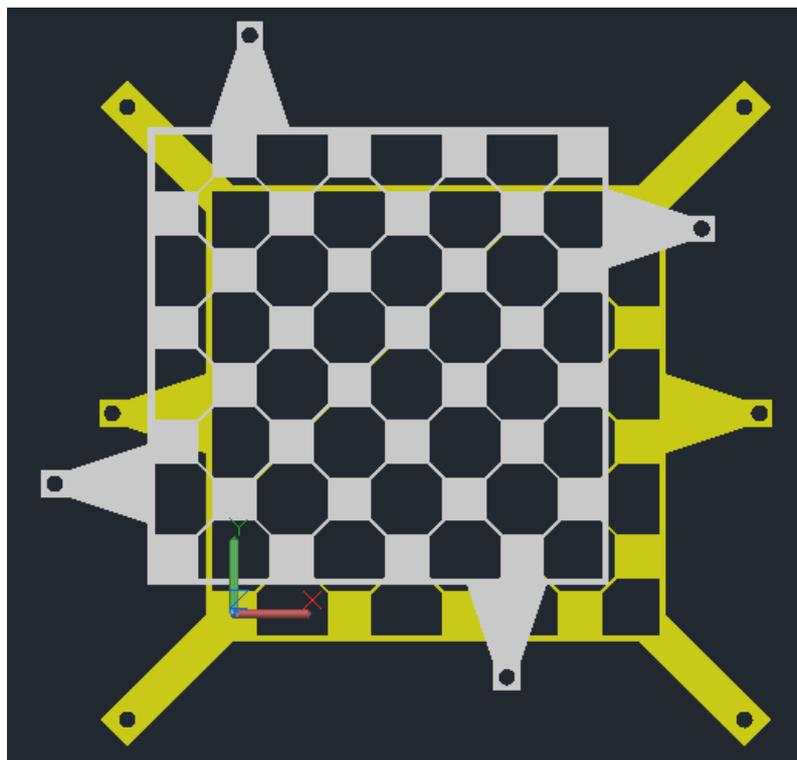
A estrutura onde será feita a montagem é formada por um conjunto de acrílico e madeira. As placas são montadas suspensas em bases de acrílico. O movimento será realizado de maneira forçada por dois motores, que irão aplicar forças nos eixos X e Y, podendo ser aplicadas de maneira simultânea. Os motores DC de pequeno porte tem um acionamento elétrico simples, bastando serem conectados à fonte elétrica. Nos eixos dos motores, são acopladas polias. Estas polias são ligadas a hastes que movimentam a base da estrutura.

Uma base de acrílico foi cortada no formato da placa móvel. Foram acoplados quatro apoios de náilon, para ter menos atrito no deslocamento, e há dois encaixes para serem conectados aos motores. Estes encaixes ficam logo em baixo da primeira placa fixa do capacitor. Esta placa de acrílico desloca-se acima de uma placa de acrílico maior, onde são parafusadas as placas fixas dos capacitores. Todo esse conjunto é parafusado por quatro cilindros de madeira a uma base de madeira maior, onde são parafusados os suportes para os motores. A conexão com os motores não pode ser feita de maneira simples. Em um dos eixos, o acionamento é feito através de uma polia dupla e com hastes de conexão com formato em C acoplados ao conjunto móvel. Caso contrário, o deslocamento fará uma trajetória pendular ao ser feito o acionamento simples. O acionamento duplo traz uma característica mais caótica à variação de capacitância, podendo aplicar tensões diferente nos motores para variar a velocidade e realizar movimentos diferentes. Toda a montagem pode ser vista na Fig. 4.10.

O experimento consiste em três diferentes posições do capacitor. Os experimentos realizados exploraram deslocamentos de uma casa em um eixo por vez, em dois eixos

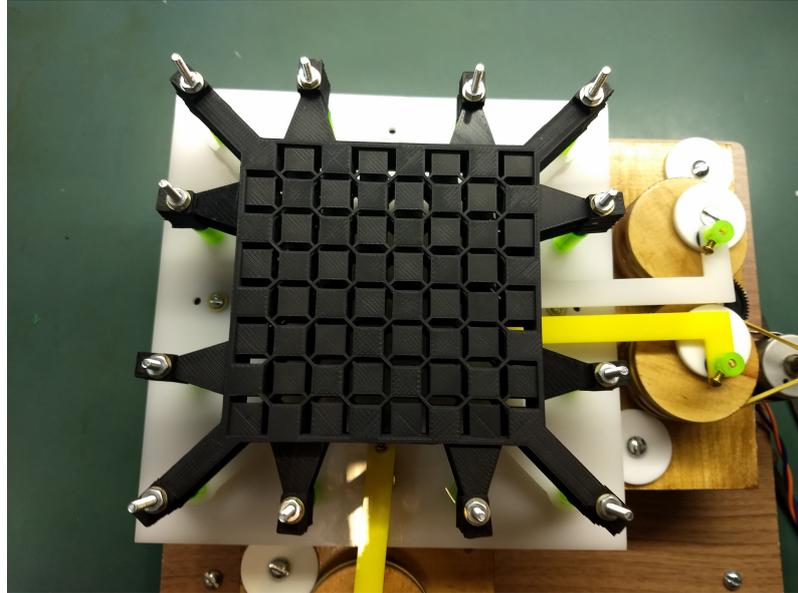


(a)

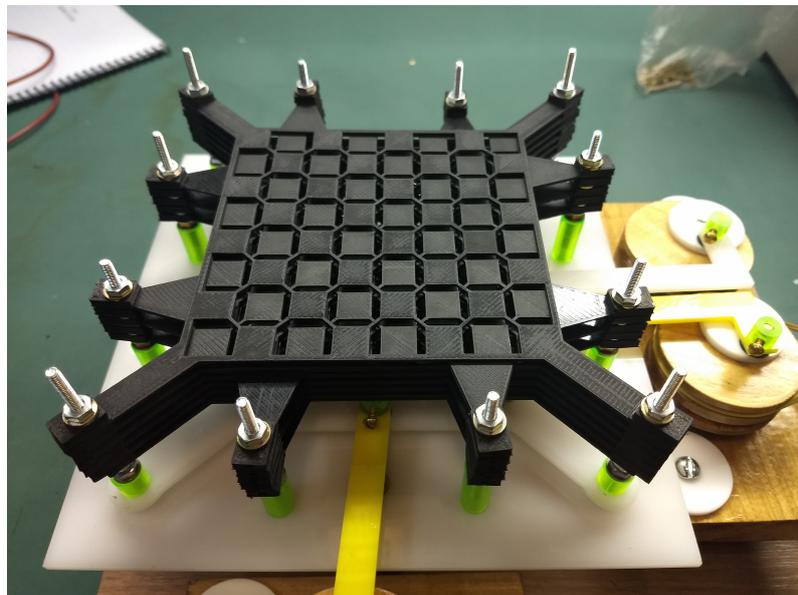


(b)

Figura 4.9: Descrição do deslocamento na diagonal (uma casa para esquerda e uma para cima): (a) vista com perspectiva isométrica; (b) vista no plano XY, explicitando a folga denotada em (a).



(a)



(b)

Figura 4.10: Montagem final: (a) posição inicial vista por cima; (b) níveis da estrutura e detalhes da montagem, seguindo, também, a posição inicial.

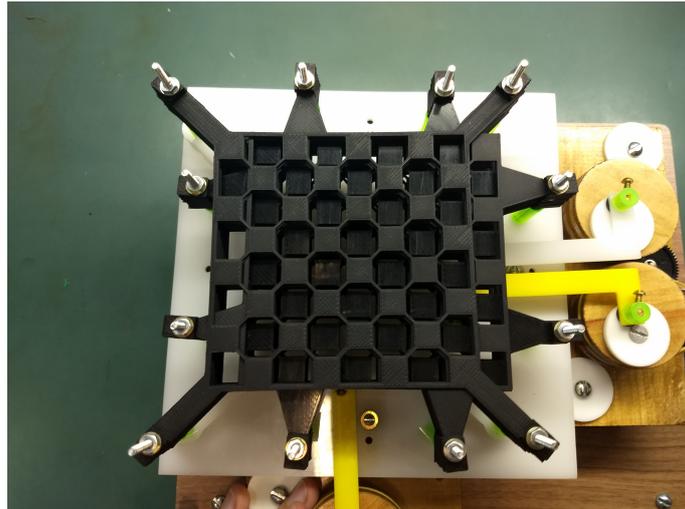
simultaneamente de maneira aleatória e movimento de uma casa nos dois sentidos do eixo. As Figs. 4.11 mostram as placas deslocadas para cada caso, podendo ser comparadas com a Fig 4.10a, que apresenta a estrutura em repouso na posição inicial. Os dois motores acionados ao mesmo tempo produzirão movimentos além do deslocamento na diagonal, podendo ter configurações aleatórias de movimentação que conjuguem simultaneamente os dois eixos.

As porcas servem também para regular a distância entre as placas. Como o ABS é um material maleável, à medida que muda-se o tensionamento das porcas, as placas podem esticar ou abaloar para cima e para baixo. Assim, durante a montagem, é necessário sempre verificar se as placas de grupos diferentes estão em contato elétrico entre si. Esse fator pode ser usado como vantagem de maneira cuidadosa, servindo para regular a distância entre as placas, mesmo depois de terminada a montagem, ou caso uma das deformações do ABS exposto ao ambiente mude determinadas especificações da estrutura.

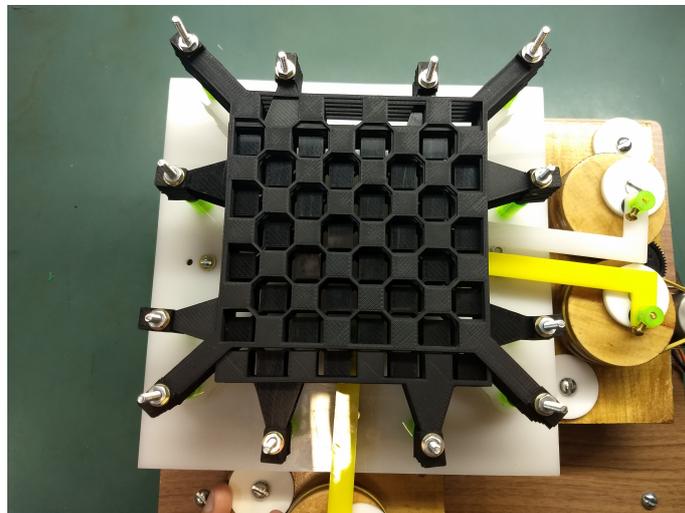
4.2.2 Montagem dos Circuitos Multiplicadores de Tensão

Como dito anteriormente, os parafusos presentes nas abas também servem como contatos elétricos. Os circuitos usados e mencionados no Capítulo 3 têm seus contatos atarraxados aos parafusos e apertados com uma porca por cima, sendo postos logo acima da placa superior de cada capacitor. Os capacitores para montagem dos circuitos foram de cerâmica de 470 pF , com tensão máxima de 3000 V . As montagens seguirão os esquemáticos presentes no Capítulo 3 e podem ser observadas na Fig. 4.12.

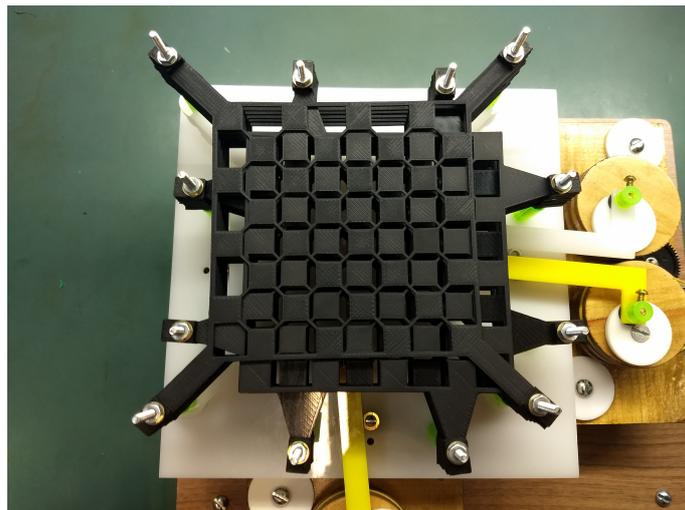
A Fig. 4.12a está para o esquemático presente na Fig. 3.1. A Fig. 4.12b está para o esquemático da Fig.3.4. A Fig. 4.12c está para o esquemático da Fig. 3.7. Em todas essas representações, os nós estão em destaque e correspondendo aos esquemáticos do Capítulo 3, mencionados na descrição da Fig. 4.12.



(a)

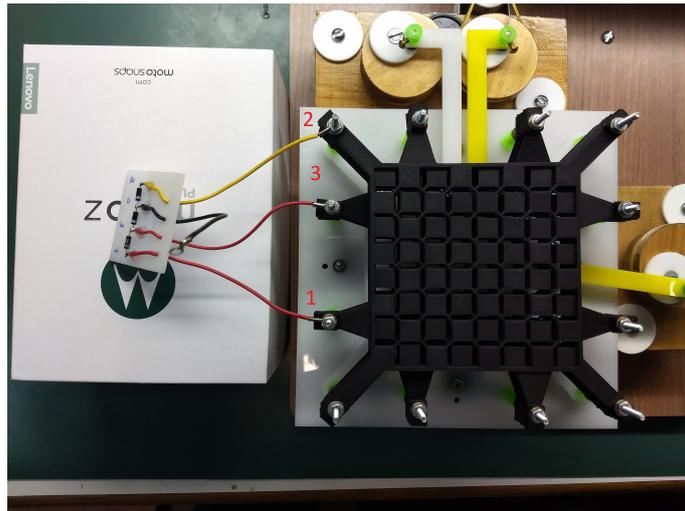


(b)

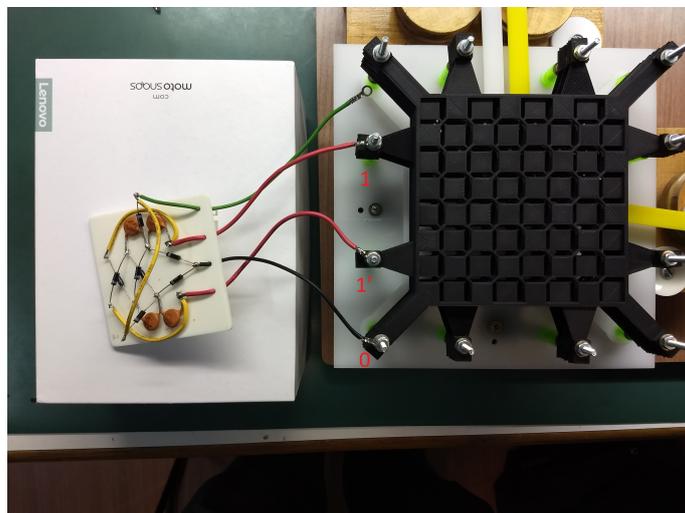


(c)

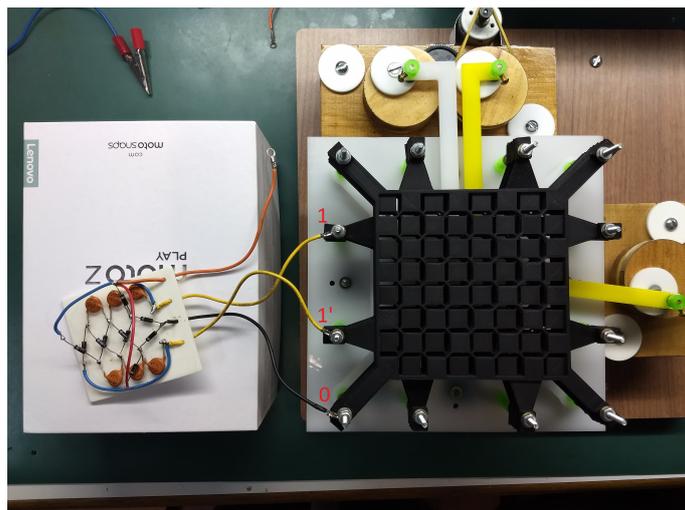
Figura 4.11: Deslocamento da estrutura: (a) no Eixo X (direção do motor com polia dupla); (b) mostra no Eixo Y (direção do motor com polia simples); (c) na diagonal, combinando movimentação dos dois motores.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.12: Deslocamento da estrutura: (a) montagem do Dobrador de Bennet; (b) imagem do Unipolar de Dois Estágios; (c) imagem do Unipolar de Três Estágios. Todas as imagens apresentam os nós numerados. Os circuitos presentes são os mesmos das Figs. 3.2 ,3.5 e 3.8. Os nós 4 e 4' dos circuitos das Figs. 3.4 e 3.7 são representados pelos conectores soltos em (b) e (a).

Capítulo 5

Resultados

Este capítulo expõe os resultados práticos do capacitor desenvolvido. Traz comparações experimentais de seu funcionamento com cada máquina eletrostática e as simulações.

5.1 O Capacitor

O capacitor impresso apresentou resultados muito bons quanto ao acabamento da impressão. Em trabalhos anteriores, a superfície da impressão apresentava muita rugosidade e tamanhos diferentes dos especificados no arquivo STL [2]. O software de fatiamento usado anteriormente foi o da MakerBot, enquanto que neste trabalho foi o Simplify3D, que contém mais opções de refino da impressão, algo que melhora a qualidade final da impressão. A impressora usada também é melhor que a anterior (Impressora 3D Makerbot Replicator 2x), contribuindo para melhor um resultado. Além disso, o acabamento da impressão melhorou também devido à técnica usada para fixar a peça na cama da impressora, descrita no Apêndice B. Com essas melhorias, a qualidade da impressão melhorou significativamente, tendo menor dispersão das dimensões ao longo do eixo Z, melhor acabamento na superfície que fica em face à base de vidro da impressora, menor variação do tamanho da peça em comparação ao STL. Este último ponto pode ser sentido vendo a altura dos espaçadores, que no STL foi selecionado 3 mm e no prático ficou em torno de $2,95\text{ mm}$ à $3,02\text{ mm}$, um desvio em torno de 1% do valor, para mais e para menos.

Diferente da face virada para o vidro da impressora, a outra superfície apresentou rugosidades leves, porém indesejadas. Para corrigir esse problema poderiam ser feitos dois procedimentos: lixar e limar a superfície, ou desgastá-las com acetona. Foi escolhida a primeira para ter melhor controle, apesar de não ter um resultado tão bom quanto o desgaste com acetona. Pequenas limas, lixas e estilete foram usados para limpar a superfície, as laterais da borda e das casas do tabuleiro de xadrez. É importante fazer a limpeza e tornar a superfície mais lisa para retirar qualquer fiapo e imperfeição que possam encos-

tar em outra placa. Por mais ínfimos que sejam, estes propiciam curtos e fugas entre as placas, assim alterando significativamente os valores de capacitância e impossibilitando o funcionamento das máquinas eletrostáticas.

Os valores de capacitância foram aferidos usando um medidor da Agilent, modelo E4980A Precision LCR Meter de $20\text{ Hz} - 2\text{ MHz}$, presente no LPS. A medição é feita escolhendo o método “Cp-Rp” e frequência de 20 Hz . Durante este processo, foi verificado o fator de perda de capacitância do conjunto de placas espelhadas mencionado no Capítulo 3. A montagem foi feita de maneira metódica e lenta para assegurar que nenhuma placa estava tendo o mínimo de contato ao serem deslocadas. A cada nova placa colocada no conjunto, novos testes de movimento e medidas de capacitância eram tomadas para verificar possíveis curtos-circuitos. Um efeito interessante apareceu, a cada novo nível de estrutura que era adicionado a capacitância subia de maneira não-linear. Ao adicionar mais níveis, cada placa do capacitor passa a “enxergar” mais área de sobreposição e, assim, fazendo aumentar a capacitância de modo não-linear. Isto é causado, pois as placas adicionadas nos níveis superiores se relacionam com as placas dos níveis inferiores. Este efeito é interessante de ser explorado, porque a capacitância máxima aumenta numa taxa maior que a capacitância mínima e, portanto, aumentando a relação de capacitâncias.

Com cinco placas móveis postas, a capacitância máxima do conjunto de placas fixas espelhadas fica bem inferior ao valor do conjunto de placas fixas padrão, bem como o valor da relação de capacitâncias máxima e mínima fica próximo de $1,5$, sendo este um limite de operação para algumas das máquinas eletrostáticas. Em seguida, foi colocada a placa móvel extra, conforme proposto na Fig. 3.16, e o resultado ficou de acordo com o esperado teórico. O valor de capacitância máxima do conjunto de placas espelhadas subiu numa proporção maior que o seu valor de capacitância mínima. Isto confere aumento na relação entre capacitâncias máxima e mínima, ao ponto de ficar muito próximo ao valor encontrado para o conjunto de placas fixas padrão. Isto é muito importante para o funcionamento das máquinas eletrostáticas, que tem seu funcionamento ótimo para relações de capacitância mais próximas e também mais simétricas.

Cada capacitor terá dois valores para capacitância “máxima” e outros dois para “mínima”, no caso dois picos e dois vales para os valores aferidos. Isto decorre das possibilidades de movimento: posição de repouso, movimento na direção do motor com uma polia, movimento na direção do motor com duas polias e movimento na diagonal. Idealmente, os valores de capacitância com movimentação em direção aos motores deveriam ser iguais, porém devido a diferenças sutis que decorrem da fabricação, montagem e movimentação, estes valores são ligeiramente diferentes. Essas configurações da estrutura são as mesmas presentes anteriormente na Seção 4.2.1. O capacitor com placas padrão tem o valor de capacitância máxima quando em repouso ($C_{p_{max1}}$), apresenta outro valor de pico de capacitância quando deslocado na diagonal ($C_{p_{max2}}$), apresenta o valor de capacitância mínima quando deslocado na direção do motor com polia dupla ($C_{p_{min1}}$) e

apresenta outro vale para capacitância na direção do motor com uma polia ($C_{p_{min2}}$). O capacitor com placas espelhadas tem o valor de capacitância máxima quando deslocado na direção do motor com uma polia ($C_{e_{max1}}$), apresenta outro valor de pico de capacitância quando deslocado em direção ao motor com duas polias ($C_{e_{max2}}$), apresenta o valor de capacitância mínima quando deslocado na diagonal ($C_{e_{min1}}$) e apresenta outro valor para capacitância quando em repouso ($C_{e_{min2}}$). Os valores aproximados estão listados nas Tabelas 5.1 e 5.6.

Capacitor com Placas Padrão	
$C_{p_{max1}}$	313 pF
$C_{p_{max2}}$	261 pF
$C_{p_{min1}}$	145 pF
$C_{p_{min2}}$	144 pF

Tabela 5.1: Tabela com os valores do capacitor com placas padrão.

Capacitor com Placas Espelhadas	
$C_{e_{max1}}$	302 pF
$C_{e_{max2}}$	297 pF
$C_{e_{min1}}$	168 pF
$C_{e_{min2}}$	146 pF

Tabela 5.2: Tabela com os valores do capacitor com placas espelhadas.

Note que os valores de $C_{p_{min1}}$ e $C_{p_{min2}}$ são muito próximos, apresentando um desvio aproximado de 0,69 %. O mesmo ocorre com os valores de $C_{e_{max1}}$ e $C_{e_{max2}}$, apresentando um desvio aproximado de 1,65 %. Isto corrobora com o que foi dito anteriormente, em que idealmente esses valores deveriam ser iguais e, na prática, são ligeiramente diferentes. Assim, para calcular os valores das relações de capacitância, foram usados os valores $C_{p_{min2}}$ e $C_{e_{max1}}$. Os valores das relações de capacitância serão sempre partindo do repouso para direção de um dos motores (N), ou para diagonal (Nd). Os valores aproximados são listados nas Tabelas 5.3 e 5.4.

Relação de Capacitância - Placa Padrão	
N_{Padrao}	2,2
Nd_{Padrao}	1,8

Tabela 5.3: Tabela com as relações de capacitância para o capacitor com placas padrão.

Os valores apresentados nas Tabelas 5.3 e 5.4 superam a condição mínima para o funcionamento das três máquinas eletrostáticas testadas. Outro movimento implementado é o deslocamento com uma casa para esquerda e outra para direita, que será chamado de "movimento duplo". Esse movimento foi implementado na direção do motor com polia simples. A expectativa de realizar esse movimento é conseguir extrair mais energia e

Relação de Capacitância - Placas Espelhadas	
$N_{Espelhadas}$	2,0
$Nd_{Espelhadas}$	1,8

Tabela 5.4: Tabela com as relações de capacitância para o capacitor com placas espelhadas.

também aumentar a frequência dos ciclos de coleta de energia, uma vez que serão feitas mais transições de capacitância máxima para mínima por ciclo: mínima \rightarrow máxima \rightarrow mínima \rightarrow máxima (exemplo para placa espelhada). O capacitor com placa padrão tem um valor para capacitância máxima no repouso e dois mínimos para deslocamento em cada sentido, lembrando que idealmente teria que ser o mesmo valor. O capacitor com placa espelhada tem um valor mínimo em repouso e dois valores máximos, assim como mencionado para o caso do outro capacitor. Os valores aproximados experimentais são listados nas Tabelas 5.5 e 5.6.

Capacitor com Placas Padrão	
$C_{PDuploMax1}$	302 pF
$C_{PDuploMin1}$	143 pF
$C_{PDuploMin2}$	147 pF

Tabela 5.5: Tabela com os valores para movimento duplo do capacitor com placas padrão.

Capacitor com Placas Espelhadas	
$C_{eDuploMax1}$	290 pF
$C_{eDuploMax2}$	275 pF
$C_{eDuploMin1}$	162 pF

Tabela 5.6: Tabela com os valores para movimento duplo do capacitor com placas espelhadas.

Os valores presentes nas Tabelas 5.1 e 5.2 diferem dos exibidos nas Tabelas 5.5 e 5.6, mesmo para as posições em comum. As Tabelas 5.7 e 5.8 comparam os valores, exibindo os desvios aproximados dos valores do movimento simples para o duplo.

Os valores para o movimento simples na diagonal não foram levados em conta para comparação, pois o movimento duplo foi feito apenas em um eixo, pois, o movimento, ao tentar ser realizado simultaneamente, apresentou um comportamento pendular indesejado. Na Tabela 5.7, o valor "Mínimo 1" é obtido indo no sentido contrário ao motor, consequentemente, o "Mínimo 2" no sentido do motor. Na Tabela 5.8, o valor "Máximo 1" é obtido indo no sentido contrário ao motor, consequentemente o "Máximo 2" no sentido do motor. Os valores teriam que ser muito próximos, porém, para implementar o movimento duplo, a base teve que ser deslocada, podendo alterar a organização da estrutura. O movimento duplo também tem mais acentuada a característica pendular do deslocamento

Capacitor de Placas Padrão			
	Movimento Simples	Movimento Duplo	Desvio
Máximo 1	313 pF	302 pF	3,5%
Mínimo 1	145 pF	147 pF	1,4%
Mínimo 2	145 pF	143 pF	1,4%

Tabela 5.7: Tabela de comparação com os resultados para movimento simples e duplo para o capacitor de placas padrão. Os valores mínimos 1 e 2 para o movimento simples são retirados de $C_{p_{min1}}$, uma vez que o movimento duplo só foi executado no eixo do motor com uma polia.

Capacitor de Placas Espelhadas			
	Movimento Simples	Movimento Duplo	Desvio
Máximo 1	302 pF	290 pF	4%
Máximo 2	302 pF	275 pF	8,9%
Mínimo 2	168 pF	162 pF	3,6%

Tabela 5.8: Tabela de comparação com os resultados para movimento simples e duplo para o capacitor de placas espelhadas. Os valores mínimos 1 e 2 para o movimento simples são retirados de $C_{e_{max1}}$, uma vez que o movimento duplo só foi executado no eixo do motor com uma polia.

mencionado anteriormente. O experimento com movimento duplo teve que ser feito em dia diferente. Percebeu-se que a madeira e o ABS perdiam rosqueamento com passar do tempo. Devido a variações de umidade e temperatura do ambiente a estrutura dilata e contrai. Assim, é necessário apertar as roscas e parafusos, o que muda o tensionamento mecânico da estrutura. As relações de capacitância aproximadas para o movimento duplo estão listadas nas Tabelas 5.9 e 5.10.

Relação de Capacitâncias Movimento Duplo - Placas Padrão	
$N1_{Padrao}$	2
$N2_{Padrao}$	2,1

Tabela 5.9: Relação de capacitâncias para movimento duplo com placas padrão.

Os valores encontrados nas Tabelas 5.9 e 5.10 ficam acima de 1,5, valor mínimo para operação das máquinas eletrostáticas. Os valores de $N1_{Padrao}$ e $N2_{Padrao}$ ficaram próximos de N_{Padrao} , bem como $N1_{Espelhadas}$ e $N2_{Espelhadas}$ próximos de $N_{Espelhadas}$. Isto demonstra consistência nas relações de capacitâncias, apesar das alterações dos valores absolutos devido aos problemas relatados anteriormente, quanto às variações físicas do experimento. As relações apresentadas ficaram distantes do esperado segundo o Canton, justificando fazer o projeto com uma margem de erro maior para a relação. Assim, todas as relações de capacitâncias apresentadas indicam que a geometria do capacitor é viável para operar máquinas eletrostáticas para coleta de energia vibracional.

Relação de Capacitâncias Movimento Duplo - Placas Espelhadas	
$N1_{Espelhadas}$	1,8
$N2_{Espelhadas}$	1,7

Tabela 5.10: Relação de capacitâncias para movimento duplo com placas espelhadas.

5.2 Resultados das Máquinas Eletrostáticas

Partindo das constatações e exposições feitas na seção anterior, esta seção aborda agora o desempenho do capacitor com as máquinas eletrostáticas selecionadas para o projeto. As imagens contendo os resultados experimentais foram retiradas direto do osciloscópio. O sinal em amarelo representa a tensão na saída das máquinas eletrostáticas e em verde o sinal de saída do circuito amostrador de tensão.

5.2.1 Dobrador de Bennet

Este circuito foi selecionado por ser o mais convencionalmente usado na literatura e por estar em uso nos experimentos do laboratório há alguns anos. Serve, assim, como parâmetro de comparação para a evolução dos projetos de pesquisa desenvolvidos. Apresenta um funcionamento mais simples, com partida mais rápida e com menos componentes, como visto no Capítulo 4, porém retorna menor energia. O circuito simulado foi feito no Editor Edfil [50] conforme a Fig. 5.1. O conversor usado para essa simulação é uma modificação do implementado na bancada. As modificações dessa versão são para dar ganho de tempo na simulação, sem ter perdas na saída do sinal.

A simulação foi feita usando o MNAV [50], simulador com passo variável, com método dos Trapézios. Para alguns casos, quando a simulação não convergia, foi usado o MNAE [50] com passo menor de integração e método de Gear. Com isso, a simulação leva alguns segundos a mais para ser realizada. O perfil de simulação foi ajustado para uma saída de tensão em torno de 160 V e frequência de $0,5$ a $2,25\text{ Hz}$, variando para cada tipo de movimento e ficando de acordo com as frequências obtidas no experimento. Os resultados demonstrados nas figuras, que virão a seguir, foram retirados depois de um longo tempo de funcionamento do dispositivo, para que o regime permanente fosse atingido e para que efeitos eletromecânicos não previstos pudessem ser notados.

Movimento Simples

Para o movimento simples obter um ciclo estável de funcionamento, a frequência observada experimentalmente foi de 2 Hz e, assim, a simulação foi ajustada para este valor. A Fig. 5.2 apresenta o gráfico obtido. É possível notar a presença de três patamares para cada ciclo. As Figs. 5.3 apresentam os valores experimentais. Em específico, a Fig. 5.3a mostra três ou quatro patamares, sendo algo similar ao esperado pelas simulações e

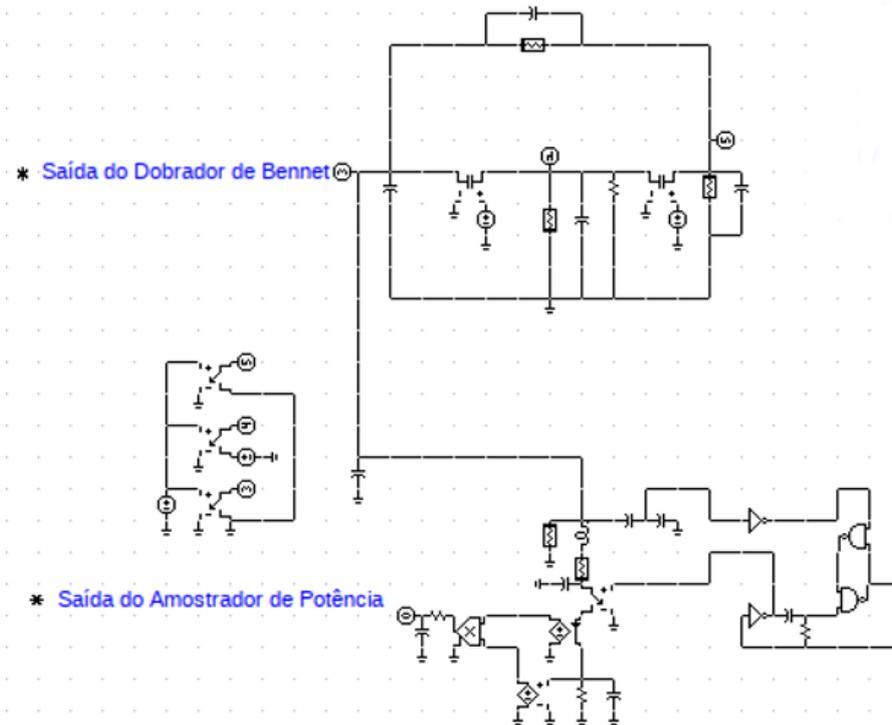
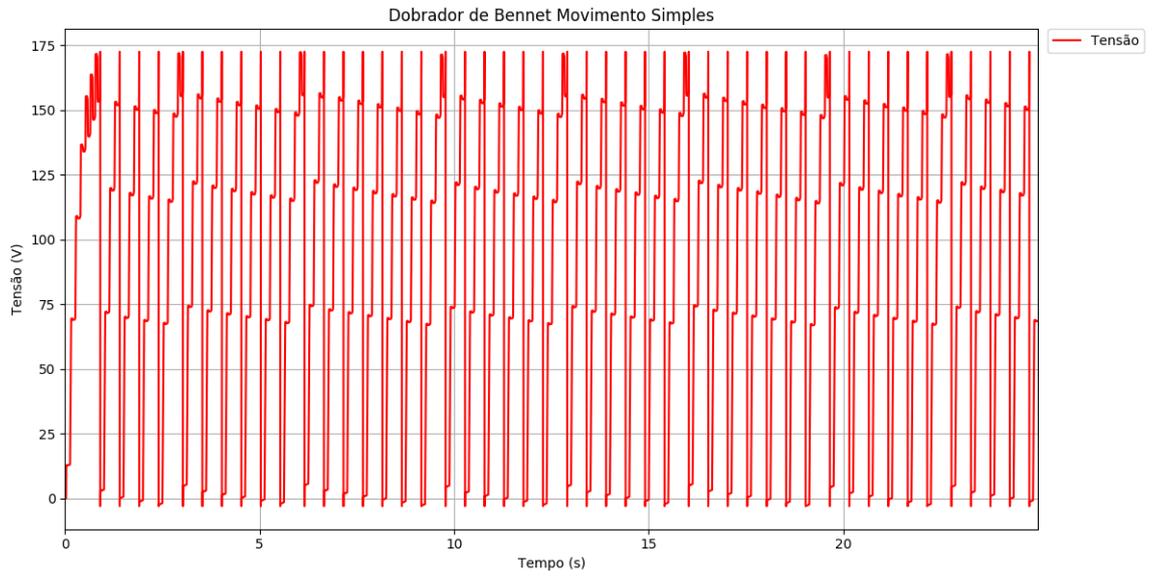


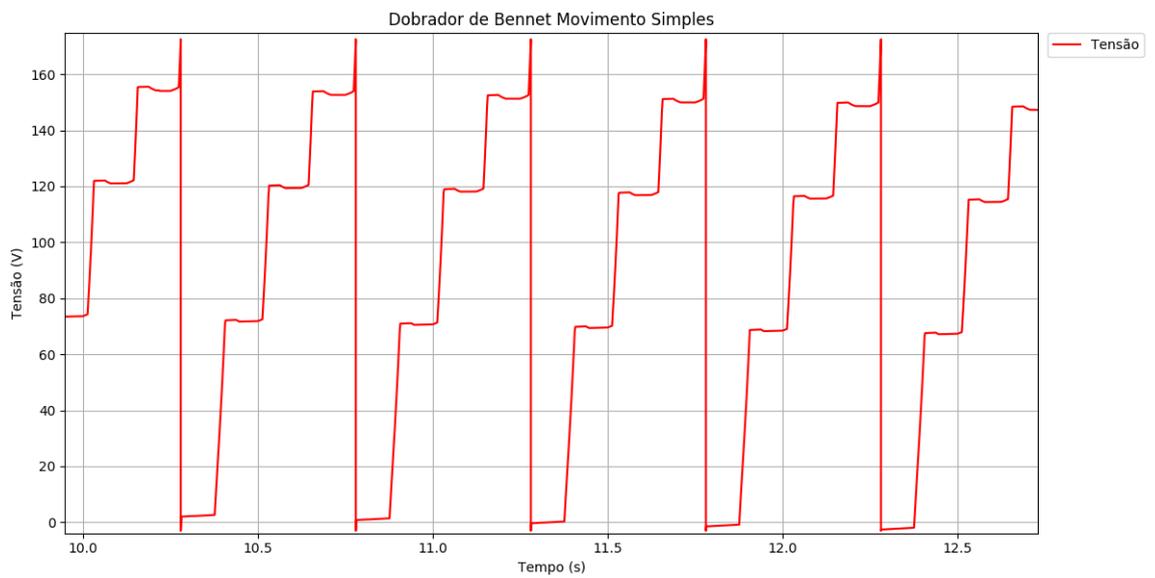
Figura 5.1: Circuito simulado para o Dobrador de Bennet.

com a expectativa de recuperação do sistema apresentada na simulação sendo corroborada. Através do resultado presente na Fig. 5.3b e as afirmações feitas na Seção 3.1.4 sobre o circuito de amostragem, pode-se estimar que a potência obtida desse ciclo foi de aproximadamente $8,5 \mu W$. A potência apontada como objetivo em uma aplicação em microeletrônica no estado da arte para criação de marca-passo sem bateria fica compreendida na faixa de $6 \mu W$ até $14 \mu W$ [26]. Essa constatação levanta um bom indício de uma possível fabricação em MEMS da estrutura, pois a mesma referida para o marca-passo também é feita com uma montagem multinível. Possivelmente para uma escala micrométrica, mais níveis teriam que ser postos e simulações mais robustas deveriam ser realizadas para determinar os efeitos eletromagnéticos na estrutura como um todo e não mais entre apenas um nível de placa, tendo em vista que a seção anterior mostrou que os níveis interagem entre si. Uma rápida conta usando o modelo ideal de placas paralelas da (3.2), com $d = 10 \mu m$ e capacitância de $200 pF$, revela uma $A = 21 mm^2$, aproximadamente. Esta área poderia ser seccionada em diversos andares que poderiam ter uma área somada menor que a ideal, uma vez que foi concluído anteriormente neste trabalho a influência do efeito das capacitâncias de borda, podendo utilizar esse problema, agora, como uma vantagem.

Partindo desse resultado positivo para $160 V$ entre as placas, outros testes experimentais foram feitos para testar tensões mais altas aplicadas sobre os capacitores, tendo em vista que a energia extraída é proporcional ao quadrado desta tensão (3.9). A Fig. 5.4 mostra dois cenários para tensão aplicada de $200 V$. Na Fig. 5.4a a frequência está posta em

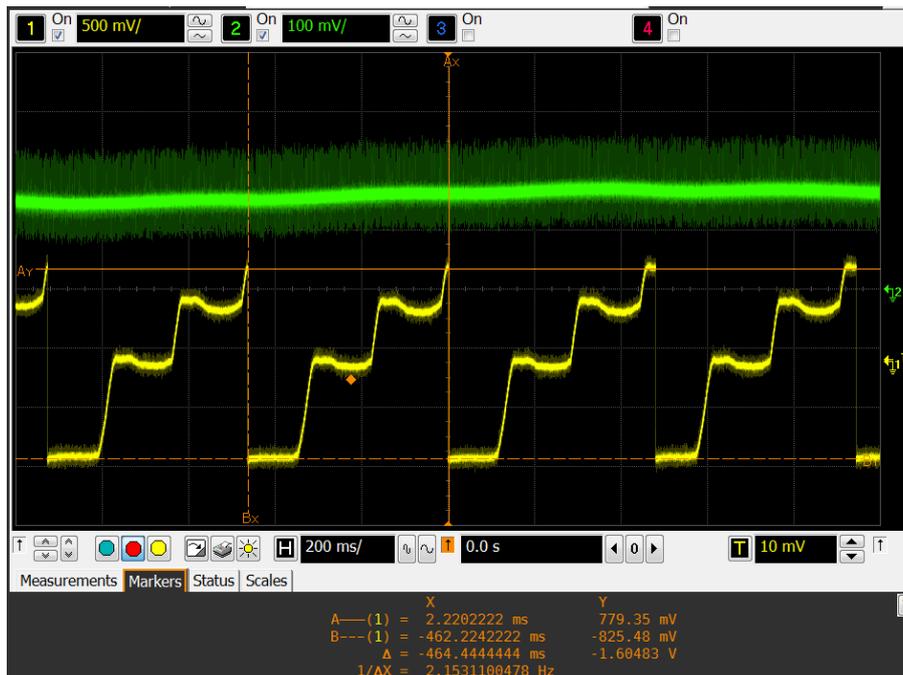


(a)

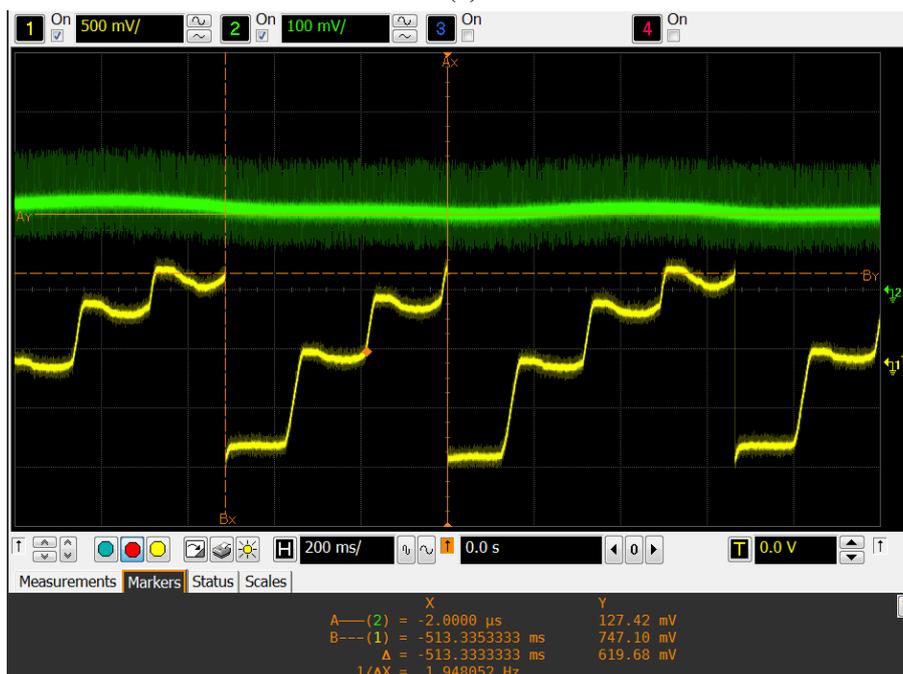


(b)

Figura 5.2: Simulações do Dobrador de Bennet: (a) simulação para o Movimento Simples, enquanto; (b) ampliação na imagem, para que possa-se visualizar melhor a forma de onda e seus patamares.



(a)



(b)

Figura 5.3: Medidas experimentais do Dobrador de Bennet: (a) tensão entre as placas do Dobrador de Bennet para 2 Hz de frequência de ciclo, destacando a tensão de pico a pico da onda em amarelo; (b) destaca o sinal de saída na marcação de tensão do canal 2, em verde. Para o sinal em amarelo, cada 500 mV exibido correspondem à 50 V de tensão real medida.

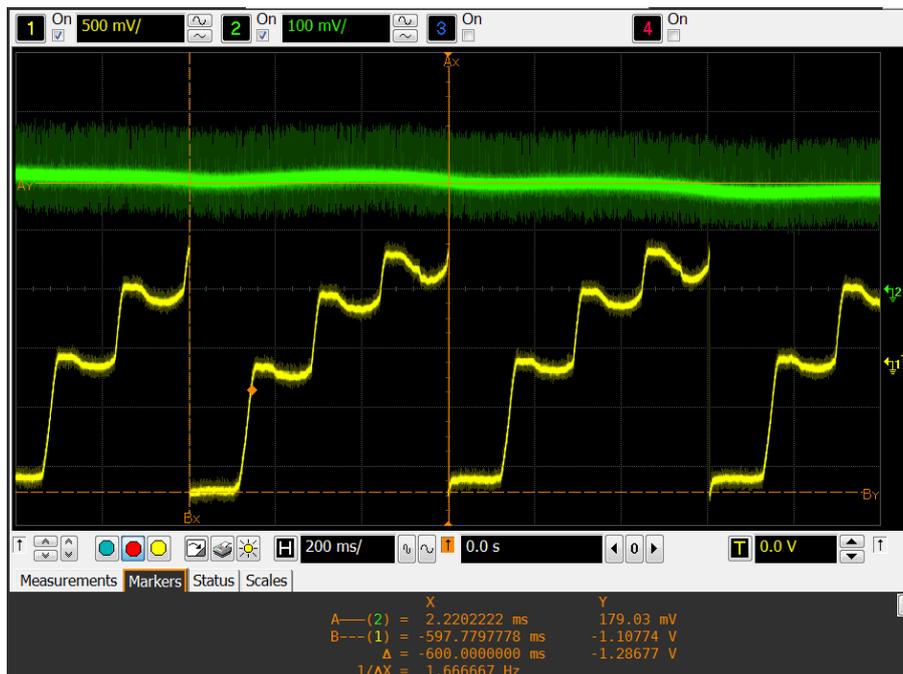
1,6 Hz, aproximadamente, e consta uma tensão de saída de 179,03 mV, correspondendo a 11,94 μW , aproximadamente. Na Fig. 5.4a a frequência está posta em 2 Hz, aproximadamente, e consta um tensão de saída de 188,71 mV, correspondendo a 12,58 μW , aproximadamente. Ambos resultados denotam uma maior obtenção de energia ao aplicar tensão maior entre os capacitores, como era esperado. Similarmente, como aumentar a frequência também influi no aumento dessa energia, uma vez que aumenta a velocidade de execução dos ciclos.

A tensão não pode ser aumentada muito além disso, pois começa a haver problemas de descarga entre as placas. Isto reforça ainda mais a necessidade de um estudo aprofundado com softwares de simulação multifísico, específicos para determinar o limite de tensão que pode ser aplicado e o campo elétrico aplicado entre as placas. A frequência não pode ser elevada, pois aumenta a trepidação da estrutura e deteriora a forma de onda, mostrando uma maior dificuldade de recuperação do sistema. Para os testes do sistema a uma tensão de 200 V, foram cumpridos os requisitos de energia extraída e também de frequência do sistema citados anteriormente, assim, corroborando novamente para uma possível aplicação da solução em MEMS.

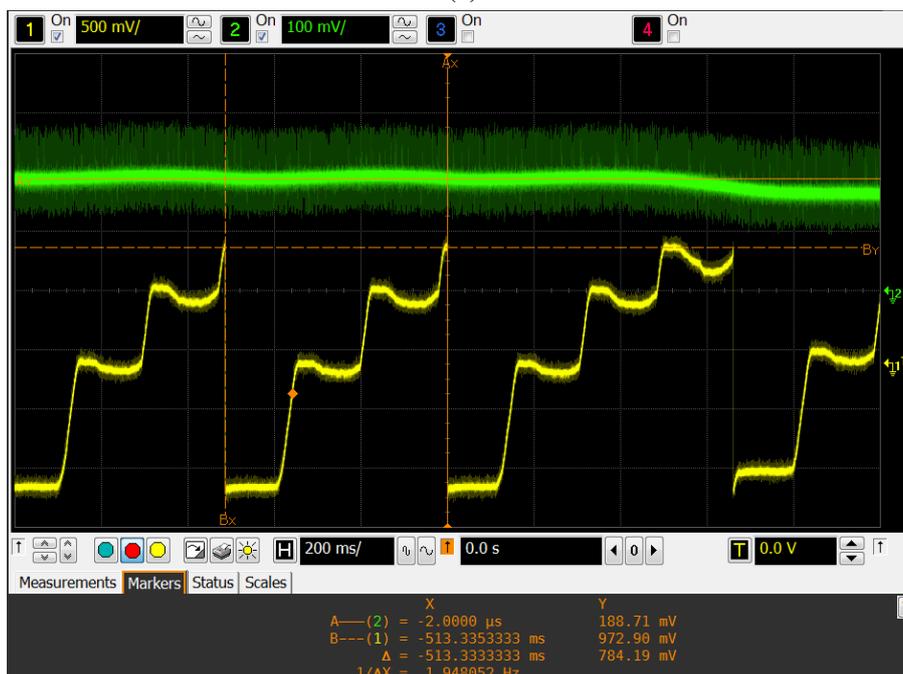
Movimento Duplo

Durante o experimento para o movimento duplo, a frequência máxima obtida foi de pouco mais de 2 Hz, com tensão de 160 V aplicada entre as placas dos capacitores. Assim, a simulação foi ajustada para ser comparada com os valores experimentais, utilizando os valores de capacitância aferidos em laboratório. A Fig. 5.5 mostra a simulação para o primeiro caso testado na bancada do laboratório, podendo ser observado três patamares, entre os pontos de máximo e de mínimo.

A intenção prática de utilizar o movimento duplo é conseguir aumentar a frequência do movimento. Isto foi constatado no ensaio experimental em comparação ao visto na seção anterior. A Fig. 5.6 exibe os resultados experimentais, podendo ser notado o aumento da frequência para pouco acima de 2 Hz para tensão de 200 V, conseguindo gerar mais potência. A Fig. 5.6a mostra o resultado para comparação com a simulação apresentada na Fig. 5.5. A onda apresenta quatro patamares, algo similar ao simulado. Comparando os resultados experimentais para o movimento simples e duplo, ambos em 160 V e frequência próxima de 2 Hz, temos que o movimento duplo extrai mais energia, conseguindo a faixa de 154,84 mV, o que corresponde a 10,32 μW , aproximadamente. Para provar que o movimento possibilitaria atingir frequências mais altas em tensões maiores, o experimento foi ajustado para 200 V e o motor foi acelerado, atingindo a marca de 2,25 Hz sem interferir no movimento com as prováveis descargas eletrostáticas que limitaram a 1,6 Hz o movimento simples. Para essa frequência e tensão mais elevada, a tensão obtida na saída do circuito de amostragem é 209,68 mV e, assim, a potência obtida é, aproximadamente, 13,98 μW , ficando próxima do limiar superior para a expectativa de



(a)



(b)

Figura 5.4: Resultado experimental com 200 V sobre os capacitores: (a) tensão pico a pico do Dobrador de Bennet para 1,6 Hz de frequência de ciclo, em amarelo; (b) sinal de saída para um frequência de 2 Hz, em amarelo. Para o sinal em amarelo, cada 500 mV exibido correspondem à 50 V de tensão real medida.

implementação em marca-passo dita anteriormente.

Movimento Diagonal

O movimento diagonal apresenta menor variação de capacitância e maior possibilidade de contato entre as placas com o decorrer do movimento, devido a possíveis trepidações da estrutura. Isto contribui para os resultados serem piores que os anteriores, com frequência de ciclo mais baixa e energia extraída menor. No ensaio experimental, a frequência ficou em torno de $0,5\text{ Hz}$ e, assim, foi ajustada a simulação para fins de comparação, conforme pode ser visto na Fig. 5.7, que apresenta cinco patamares, corroborando com a afirmação anterior de que a menor variação de capacitância deterioraria a forma de onda.

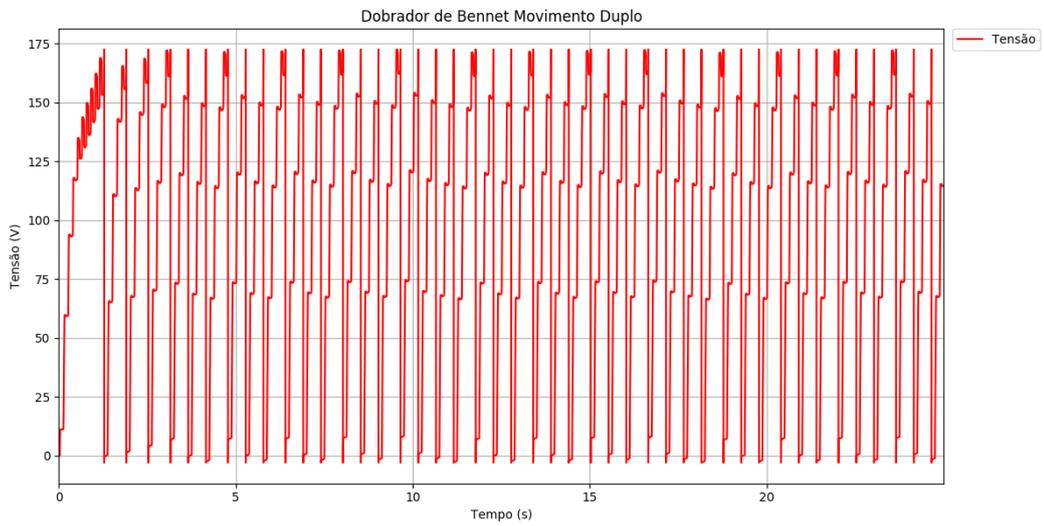
Os experimentos foram feitos, novamente, para tensões de 160 V e 200 V e o movimento foi executado formando um "X", para que pudesse haver deslocamentos em todas as direções possíveis e que não fossem bem comportados, testando algo mais inusitado. A Fig. 5.8 mostra os resultados experimentais para os casos citados. Na Fig. 5.8a, tem-se o caso para 160 V , com frequência de aproximada de 460 mHz e saída do circuito de amostragem em $51,61\text{ mV}$, o que representa aproximadamente $3,44\text{ }\mu\text{W}$, o que é inferior ao obtido nos dois casos anteriores para o Dobrador de Bennet. Para o caso de tensão em 200 V , a Fig. 5.8b mostra uma frequência aproximada de 532 mHz e tensão na saída do circuito de amostragem em $45,16\text{ mV}$, o que representa aproximadamente $3,01\text{ }\mu\text{W}$. Nota-se que, mesmo com frequência maior e tensão maior sobre as placas, a energia extraída para o segundo caso é menor. Isto ocorre devido às trepidações e às descargas entre as placas que elas provocam, podendo ser notado observando as trepidações dos patamares do sinal de tensão, ao comparar os formatos das ondas entre as Figs. 5.8a e 5.8b.

Ambos os casos experimentais ficaram longe do estipulado para uma aplicação em estado da arte para um marca-passo. Mesmo assim, energia foi extraída nesses casos e para frequências bem baixas, ainda mais próximas da frequência do coração, podendo ser válidos estudos para que a estrutura funcione em frequências bem baixas e consiga extrair energia.

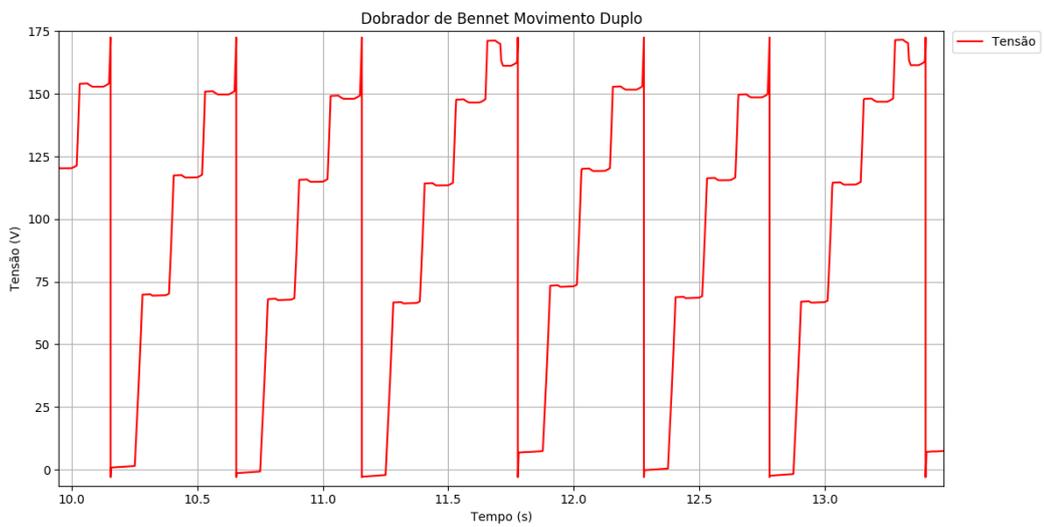
5.2.2 Multiplicador Unipolar de Dois Estágios

O circuito do Dobrador de Bennet serviu como prévia para as expectativas dos Multiplicadores Unipolares, sendo esperado uma maior energia extraída, com frequências maiores de operação. O circuito simulado foi feito no Edfil conforme a Fig. 5.9.

A simulação foi feita usando o MNAV [50], simulador com passo variável, com método dos trapézios. Para alguns casos, quando a simulação não convergia, foi usado o MNAE [50] com passo menor e método de Gear. Com isso, a simulação leva alguns segundos a mais para ser realizada. O perfil de simulação foi ajustado para uma saída de

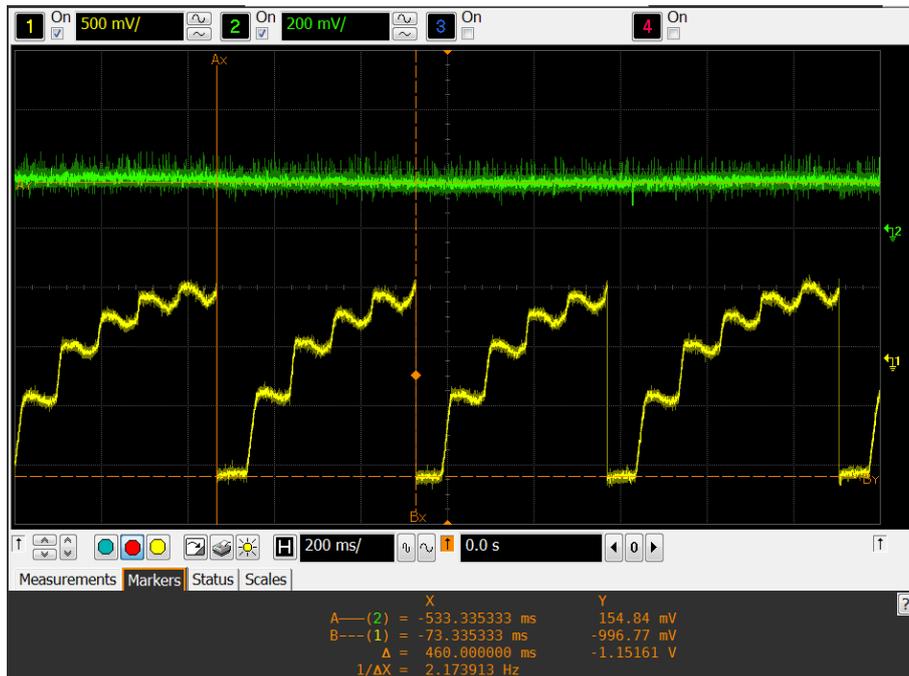


(a)

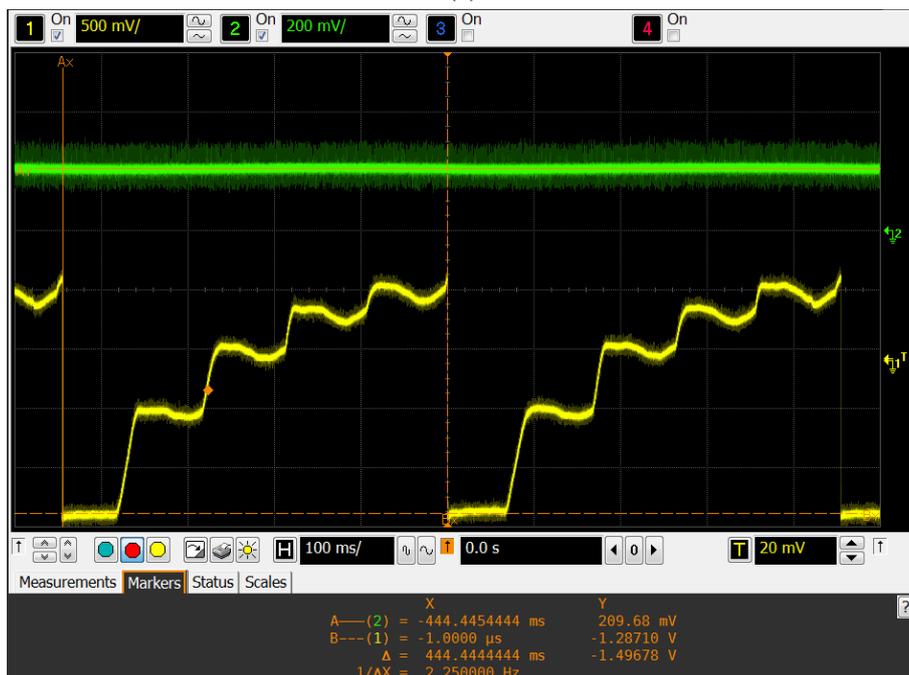


(b)

Figura 5.5: Simulação do Movimento Duplo: (a) simulação completa para o Movimento Duplo; (b) uma ampliação na imagem, para que possa-se visualizar melhor a forma de onda e seus patamares.

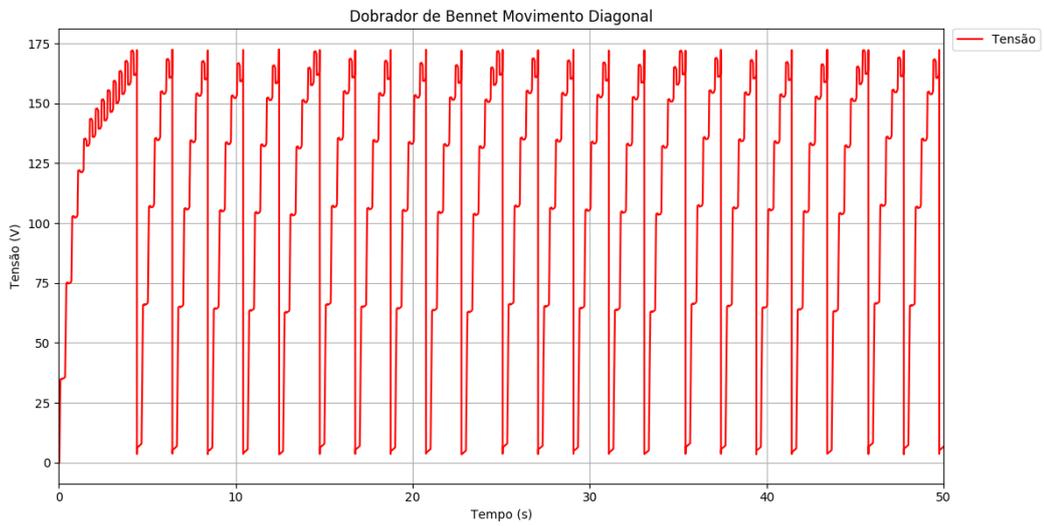


(a)

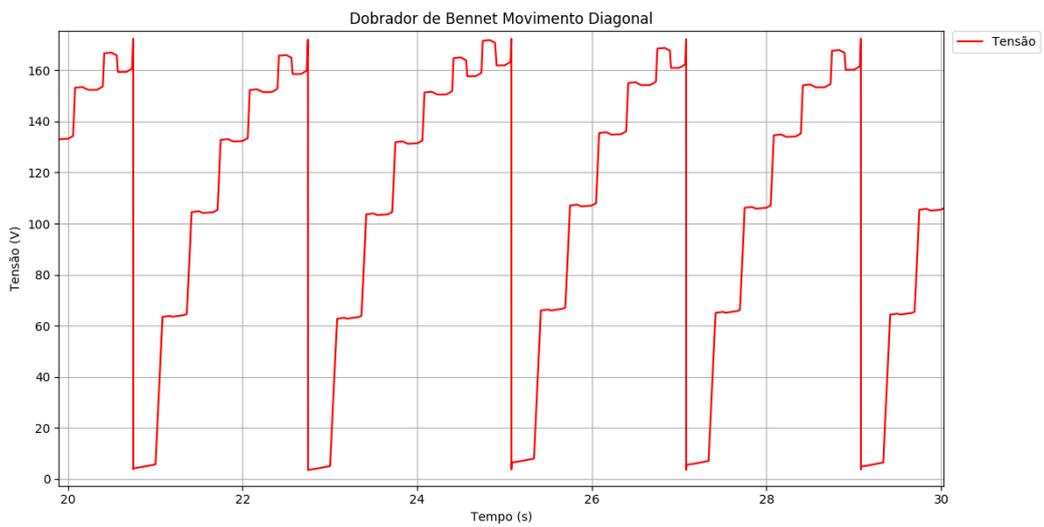


(b)

Figura 5.6: Resultados experimentais para o Movimento Duplo com Dobrador de Bennet: (a) para uma tensão entre as placas dos capacitores de 160 V, em amarelo; (b) para uma tensão de 200 V, em amarelo. Para o sinal em amarelo, cada 500 mV exibido correspondem à 50 V de tensão real medida.



(a)

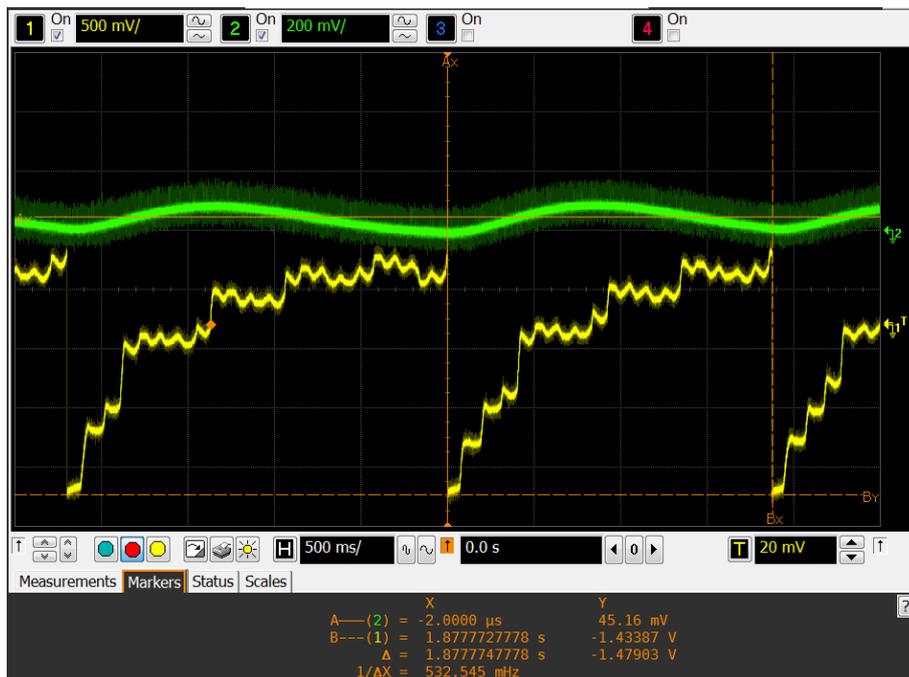


(b)

Figura 5.7: Simulação para o Movimento Diagonal: (a) simulação completa para o Movimento Diagonal; (b) ampliação na imagem, para que possa-se visualizar melhor a forma de onda e seus patamares.



(a)



(b)

Figura 5.8: Resultado experimental do Movimento Diagonal para o Dobrador de Bennet: (a) 160 V entre as placas, sinal amarelo; (b) 200 V entre as placas, sinal amarelo. Nas duas imagens o marcador Y está sobre o sinal de saída do circuito amostrador. Para o sinal em amarelo, cada 500 mV exibido correspondem à 50 V de tensão real medida.

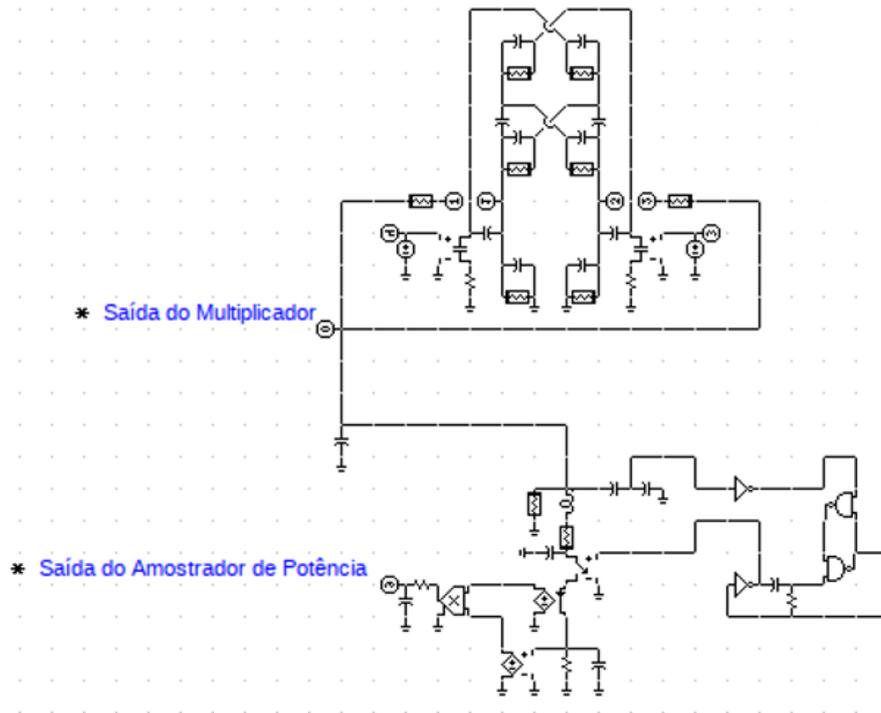


Figura 5.9: Circuito simulado para Multiplicador Unipolar de Dois Estágios.

tensão em torno de 160 V e frequência de 2 a 11 Hz , variando para cada tipo de movimento e ficando de acordo com as frequências obtidas no ensaio experimental. Os resultados demonstrados nas figuras que virão a seguir foram retirados depois de um longo tempo de funcionamento do dispositivo, para que o regime permanente fosse atingido e para que efeitos eletromecânico não previstos pudessem ser notados.

Movimento Simples

Para o movimento simples obter um ciclo estável de funcionamento e sem ter muitas trepidações na estrutura, a frequência máxima observada experimentalmente foi de 6 Hz e, assim, a simulação foi ajustada para este valor. A Fig. 5.10 apresenta o gráfico obtido. É possível notar a presença de apenas seis patamares para cada ciclo, mostrando uma superioridade na recuperação do sistema em comparação com o Dobrador de Bennet. A Fig. 5.11 apresenta os valores experimentais. Em específico, a Fig. 5.11a representa as mesmas condições da simulação e apresenta o mesmo número de patamares. Também, pode ser feita aferição da potência extraída. A tensão de saída do circuito de amostragem é $480,65\text{ mV}$, o que corresponde, aproximadamente, a $32,04\text{ }\mu\text{W}$, sendo mais que o dobro presenciado para o Dobrador de Bennet em qualquer um dos casos que este foi testado. Agora, para o caso com tensão em 200 V e frequência em $5,96\text{ Hz}$, presenciado na Fig. 5.11b, pode-se notar que a onda continua apresentando o mesmo número de patamares e uma estabilidade similar ao teste experimental com 160 V . Ainda para este caso, tem-se $629,03\text{ mV}$ na saída do circuito d amostragem, o que corresponde a, aproximadamente,

$41,94 \mu W$, sendo isto mais que o triplo que qualquer potência extraída pelo Dobrador de Bennet.

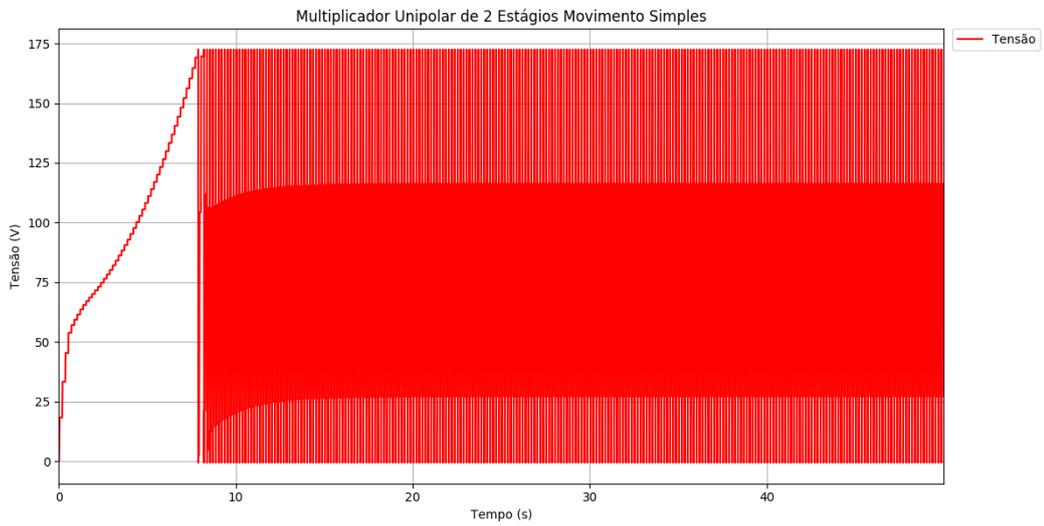
A tensão pode ser aumentada pouco além de $200 V$, pois começa ter problemas de descarga entre as placas. Isto reforça ainda mais a necessidade de um estudo aprofundado com softwares de simulação multifísico específicos para determinar o limite de tensão que pode ser aplicado e o campo elétrico aplicado entre as placas. A frequência não pode ser elevada, pois aumenta a trepidação da estrutura e deteriora a forma de onda, mostrando uma maior dificuldade de recuperação do sistema. Para os testes do sistema foram cumpridos os requisitos de energia extraída citados anteriormente, assim corroborando novamente para uma possível aplicação da solução em MEMS.

Movimento Duplo

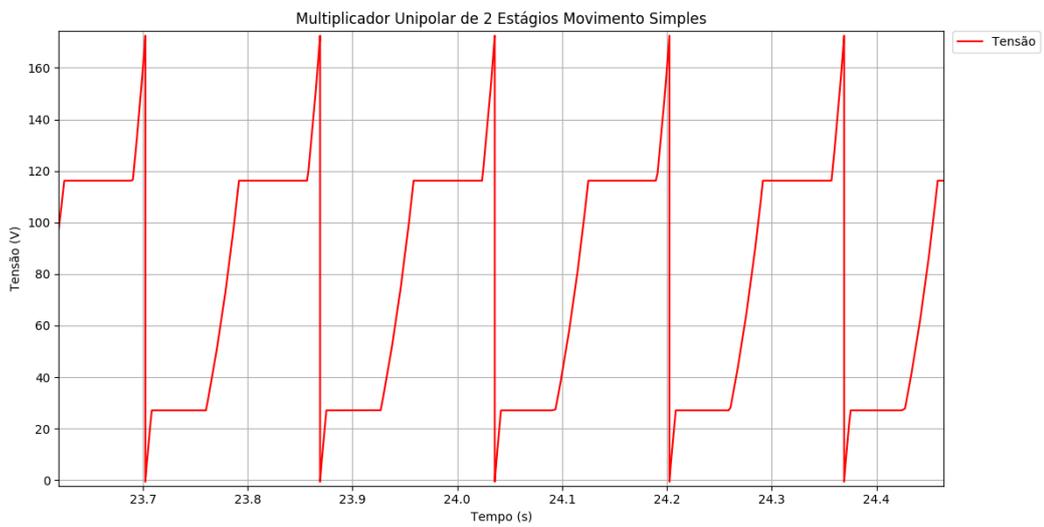
Durante o experimento para o movimento duplo, a frequência máxima obtida foi de pouco mais de $11 Hz$ para tensões de $160 V$ e $200 V$ entre as placas dos capacitores. Assim, a simulação foi ajustada para comparar com o resultado experimental, utilizando os valores de capacitância aferidos em laboratório. A Fig. 5.12 mostra a simulação para o primeiro caso testado na bancada do laboratório. Mesmo com a restrição de tensão em $160 V$, como foi feita para o caso do Dobrador de Bennet, a tensão ficou $10 V$ acima. Podem ser observados dois patamares, com o primeiro próximo ao valor mínimo de tensão.

O aumento de frequência foi constatado no ensaio experimental em comparação ao visto na seção anterior, indo de $6 Hz$ para $11 Hz$ sem deformações no formato da onda. A Fig. 5.13 exibe os resultados experimentais, podendo ser notado o aumento na frequência, conseguindo extrair mais energia. A Fig. 5.13a mostra o resultado para comparação com a simulação apresentada na Fig. 5.12. A onda apresenta um patamar, enquanto que na simulação seriam dois. Comparando os resultados experimentais para o movimento simples e duplo, ambos em $160 V$, temos que o movimento duplo extrai mais energia, justamente pelo aumento de frequência, conseguindo a faixa de $864,52 mV$, o que corresponde a $57,63 \mu W$, aproximadamente. Para provar que o movimento possibilitaria atingir frequências mais altas em tensões maiores, o experimento foi ajustado para $200 V$ e o motor foi acelerado, atingindo a marca de $11 Hz$ sem interferir no movimento com as prováveis descargas eletrostáticas que limitaram o movimento simples. Para essa frequência e tensão mais elevada, a tensão obtida na saída do circuito de amostragem é $1,12258 V$ e, assim, a potência obtida é, aproximadamente, $74,84 \mu W$, sendo mais que cinco vezes o limiar superior almejado para uma implementação em marca-passo no estado da arte.

Como este movimento apresentou resultados muito estáveis para $11 Hz$ com $200 V$, a tensão do sinal da máquina eletrostática foi elevada até seu limite máximo, no qual a onda apresentava grandes deformações e, antes de parar de funcionar, conforme visto na Fig. 5.14, chegando a aproximadamente $250 V$. Nesta faixa, a frequência atingida

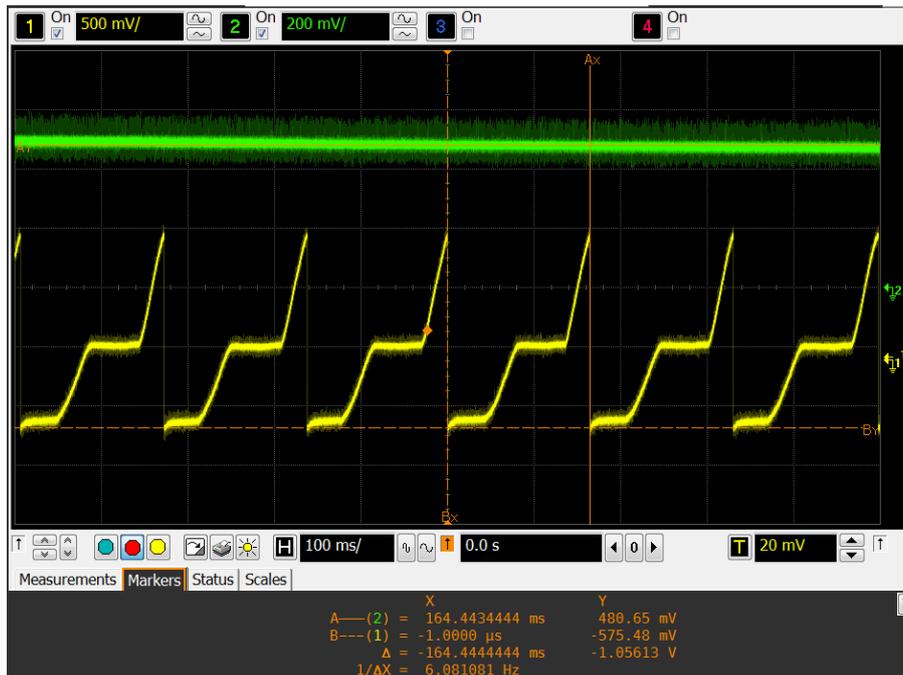


(a)

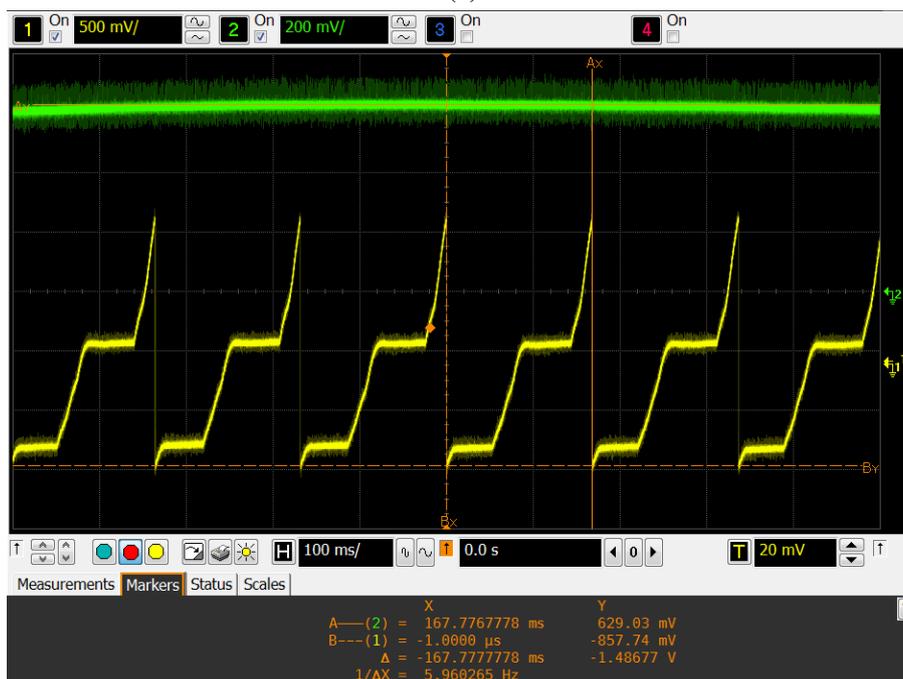


(b)

Figura 5.10: Simulação para o Movimento Simples: (a) simulação completa;(b) ampliação na imagem, para que possa-se visualizar melhor a forma de onda e seus patamares.

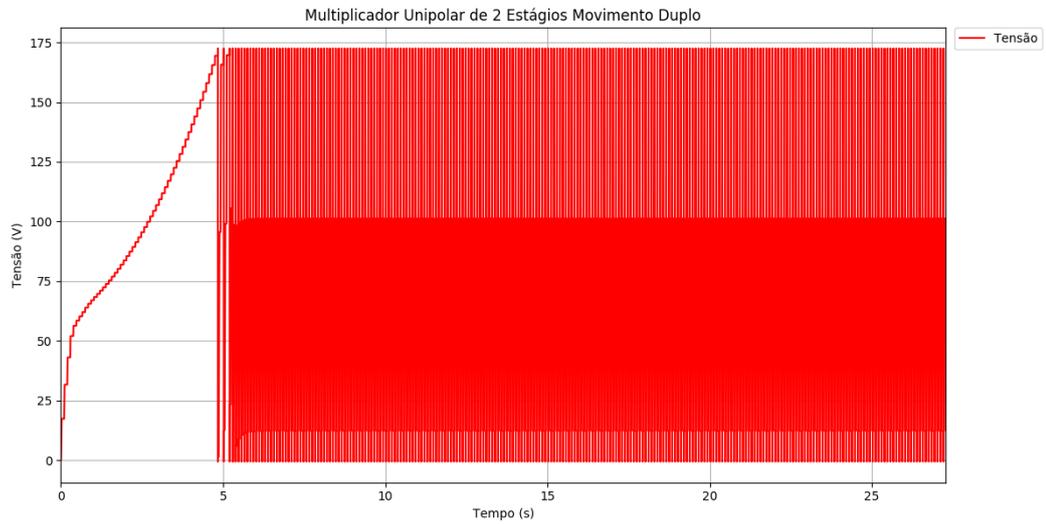


(a)

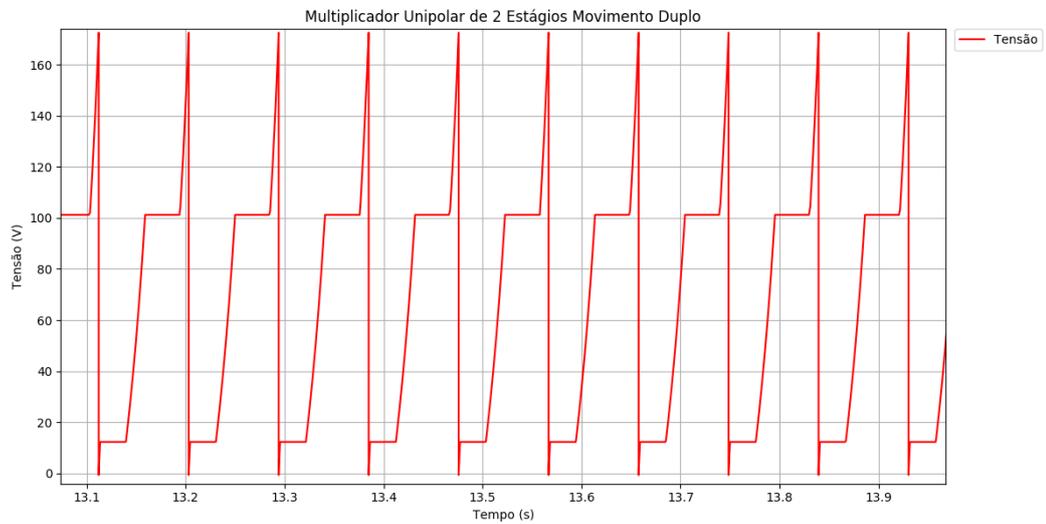


(b)

Figura 5.11: Resultado experimental do Multiplicador de 2 Estágios: (a) resultado para 6 Hz de frequência de ciclo e tensão de 160 V, em amarelo; (b) resultado experimental para 6 Hz de frequência de ciclo e tensão de 200 V. Em ambos os casos o sinal destacado em verde no canal 2 é a saída do circuito amostrador de tensão, em verde. Para o sinal em amarelo, cada 500 mV exibido correspondem à 50 V de tensão real medida.

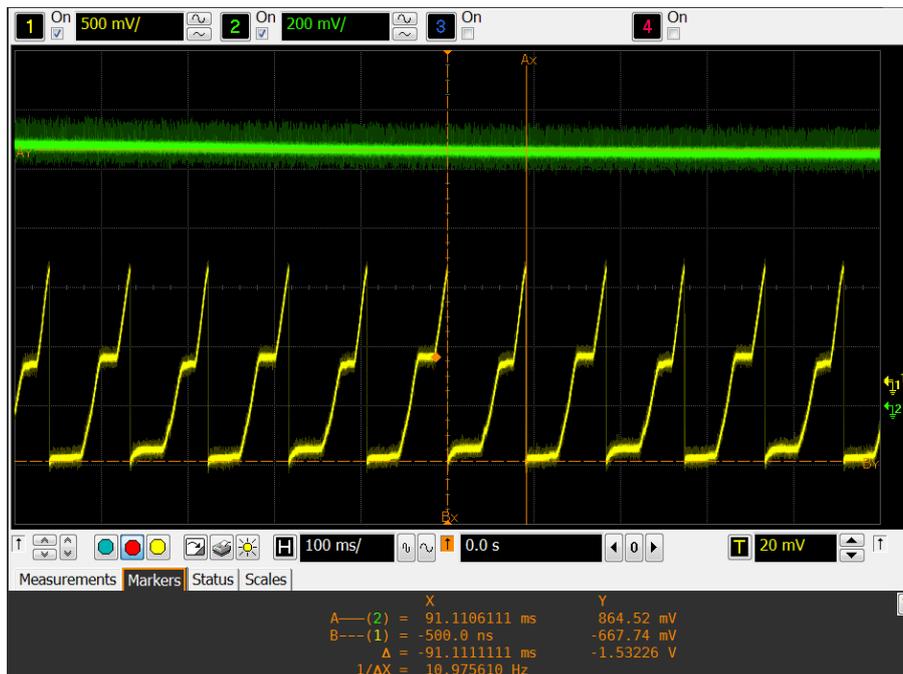


(a)



(b)

Figura 5.12: Simulação para o Movimento Duplo: (a) simulação completa; (b) ampliação na imagem, para que possa-se visualizar melhor a forma de onda e seus patamares.



(a)



(b)

Figura 5.13: Resultados experimentais para o Movimento Duplo com Unipolar de Dois Estágios: (a) tensão entre as placas dos capacitores de 160 V, em amarelo; (b) para uma tensão de 200 V, em amarelo. Para o sinal em amarelo, cada 500 mV exibido correspondem à 50 V de tensão real medida.

foi de aproximadamente $5,5 \text{ Hz}$ e apresentou descargas eletrostáticas, ou saturação das placas, caracterizadas pela formação de um patamar no pico da onda. A tensão na saída do circuito de amostragem é $691,87 \text{ mV}$ e com potência extraída de $46,12 \text{ }\mu\text{W}$. Mesmo com a deformidade da onda, é obtida mais energia que todos os casos analisados pelo movimento simples.

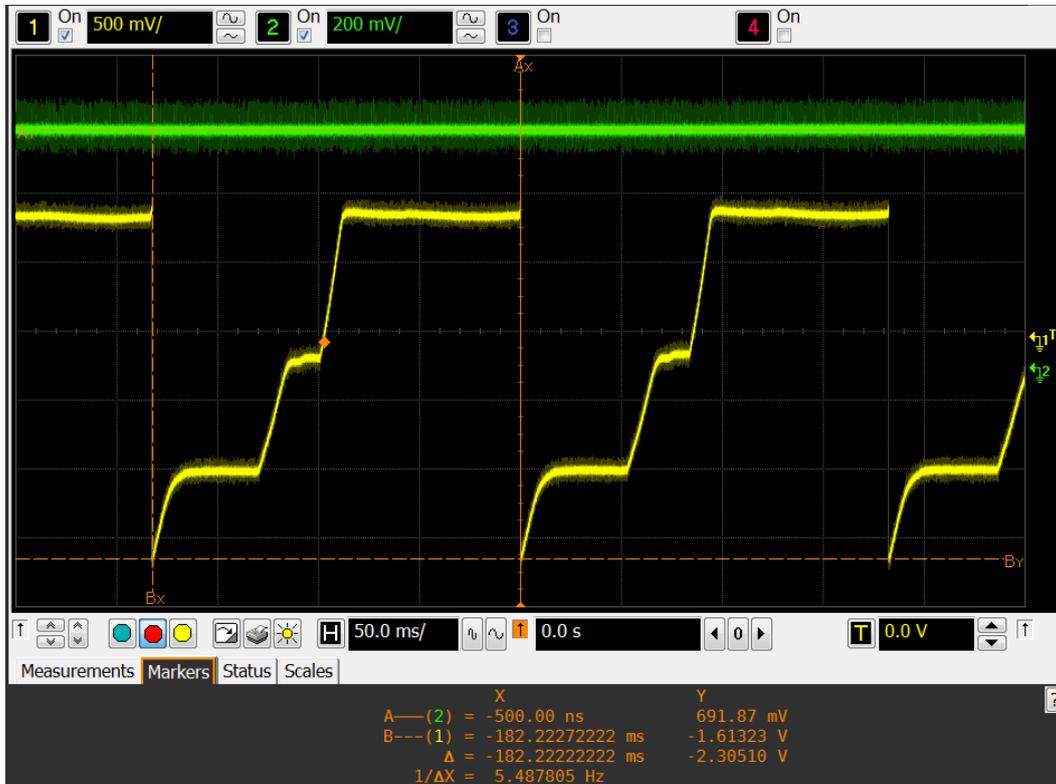


Figura 5.14: Resultado experimental com $5,5 \text{ Hz}$ e 250 V de tensão aplicada entre as placas dos capacitores variáveis, em amarelo. Para o sinal em amarelo, cada 500 mV exibido correspondem à 50 V de tensão real medida.

Movimento Diagonal

Como anteriormente, a menor variação de capacitância gera uma expectativa de que os resultados sejam piores que os anteriores, com frequência de ciclo mais baixa e energia extraída menor. No ensaio experimental, a frequência ficou entre 2 e $2,9 \text{ Hz}$ e, assim, foi ajustada a simulação para fins de comparação, conforme pode ser visto na Fig. 5.15.

Os experimentos foram feitos, novamente, para tensões de 160 V e 200 V e o movimento foi executado formando um "X" para que pudesse ter um deslocamento em todas as direções possíveis e que não fosse comportado, testando algo mais inusitado. As Figs. 5.16 mostram os resultados experimentais para os casos citados. Na Fig. 5.16a, tem-se o caso para 160 V , com frequência aproximada de $2,9 \text{ Hz}$ e saída do circuito de amostragem em $203,23 \text{ mV}$, o que representa aproximadamente $13,55 \text{ }\mu\text{W}$, bem inferior ao obtido nos dois casos anteriores para mesma máquina eletrostática. Para o caso da tensão em 200 V ,

a Fig. 5.16b mostra uma frequência aproximada de 2 Hz e tensão na saída do circuito de amostragem em $145,16\text{ mV}$, o que representa aproximadamente $9,68\ \mu\text{W}$. Em ambos os casos é alcançada maior frequência e maior potência que o Dobrador de Bennet, porém ambas muito inferiores aos dois testes anteriores. Nota-se que as ondas presentes nas Figs. 5.16 são bem deformadas e não apresentam uniformidades em sua repetição, podendo ser creditadas às descargas eletrostáticas entre as placas. Estas podem ser geradas por deformidades na montagem que só podem ser alcançadas dentro de um movimento mais caótico.

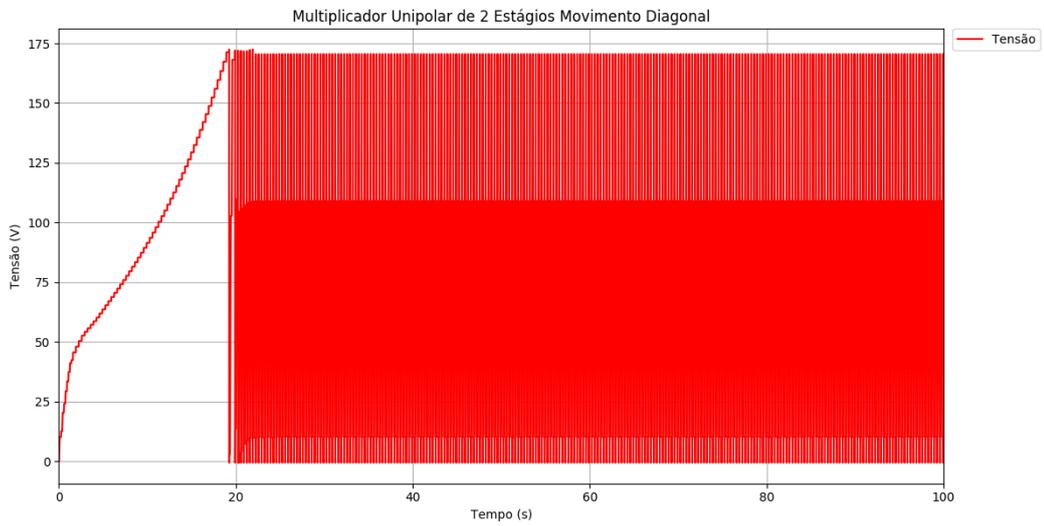
5.2.3 Multiplicador Unipolar de Três Estágios

O circuito do Dobrador de Bennet serviu como prévia para as expectativas dos Multiplicadores Unipolares, sendo esperada uma maior potência extraída, com frequências maiores de operação. O circuito simulado foi feito no Edfil conforme a Fig. 5.17.

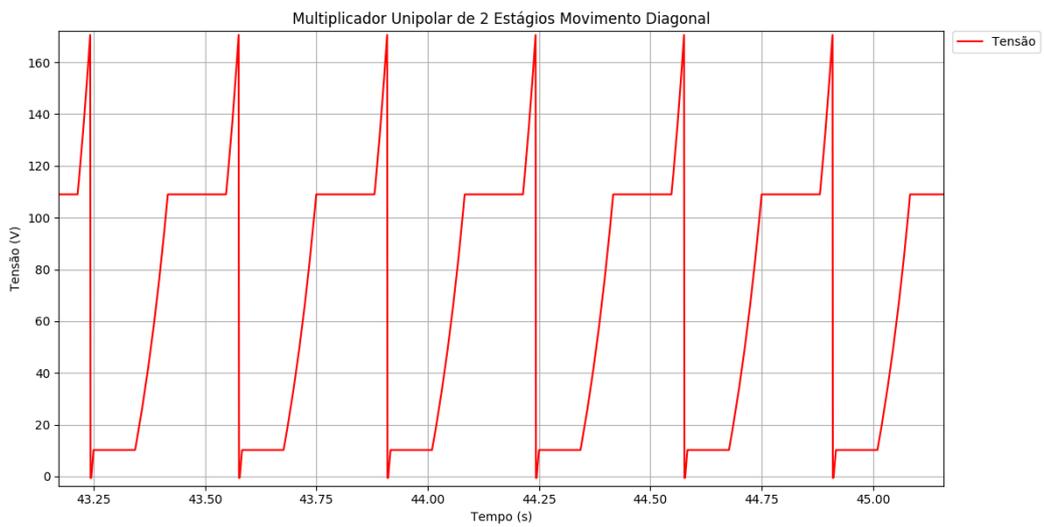
A simulação foi feita usando o MNAV, simulador com passo variável, com método dos Trapézios. Para alguns casos quando a simulação não convergia, foi usado o MNAE com passo menor e método de integração de Gear. Com isso, a simulação leva alguns segundos a mais para ser realizada. O perfil de simulação foi ajustado para uma saída de tensão em torno de 160 V e frequência de $6\text{ a }11\text{ Hz}$, variando para cada tipo de movimento e ficando de acordo com as frequências obtidas no experimental. Os resultados demonstrados nas figuras que virão a seguir foram retirados depois de um longo tempo de funcionamento do dispositivo, para que o regime permanente fosse atingido e para que efeitos eletromecânicos não previstos pudessem ser notados.

Movimento Simples

Para o movimento simples obter um ciclo estável de funcionamento e sem ter muitas trepidações na estrutura, a frequência máxima observada foi de 6 Hz e, assim, a simulação foi ajustada para este valor. A Fig. 5.18 apresenta o gráfico obtido. É possível notar a presença de apenas um patamar, no qual, entre os ciclos, os patamares variam entre dois valores de tensão: $29,0088\text{ V}$ e $72,1158\text{ V}$. A Fig. 5.19 apresenta os valores experimentais. Em específico, a Fig. 5.19a representa as mesmas condições da simulação. Também, pode ser feita a aferição da potência extraída. A tensão de saída do circuito de amostragem é de $512,9\text{ mV}$, o que corresponde aproximadamente a $34,19\ \mu\text{W}$, sendo levemente superior que o Unipolar de Dois Estágios. Agora, para o caso com tensão em 200 V e frequência aproximada de $5,9\text{ Hz}$, presenciado na Fig. 5.19b, pode-se notar que a onda continua apresentando o mesmo número de patamares e uma estabilidade similar ao teste experimental com 160 V . Ainda para este caso, tem-se $619,35\text{ mV}$ na saída do circuito de amostragem, o que corresponde a aproximadamente $41,29\ \mu\text{W}$, sendo levemente inferior ao caso para dois estágios.

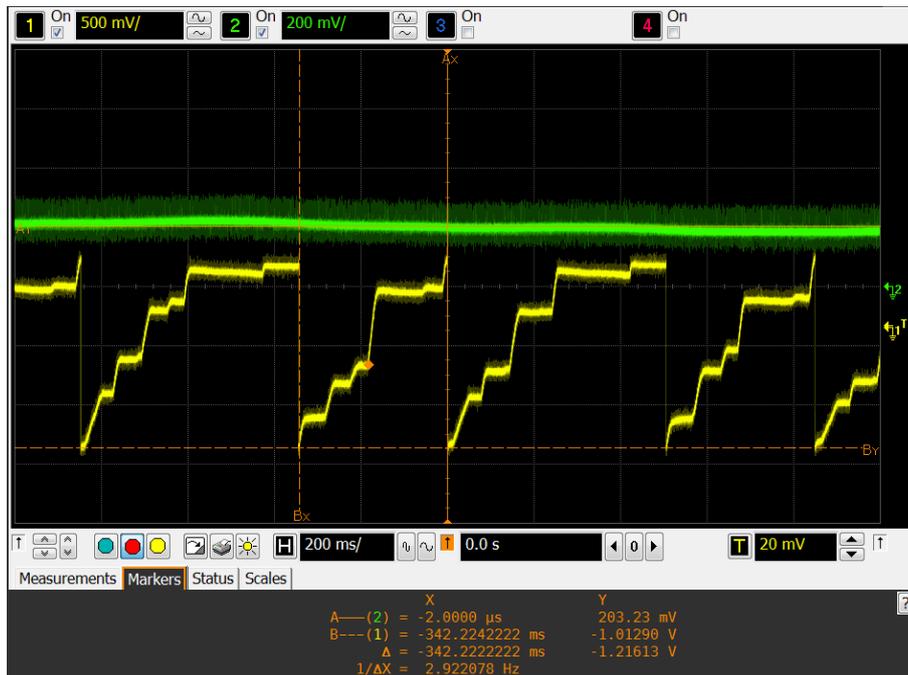


(a)

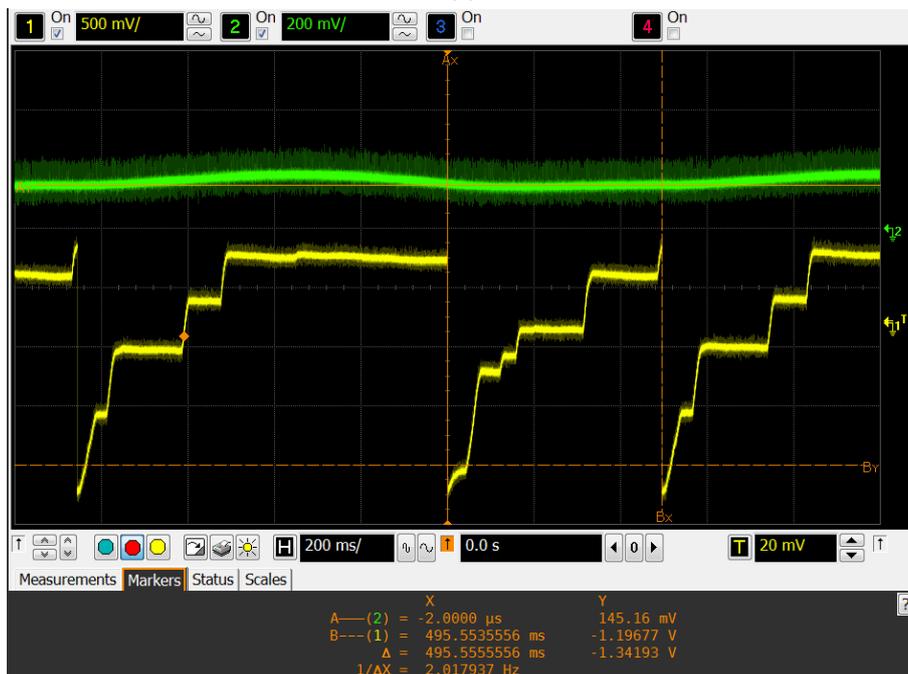


(b)

Figura 5.15: Simulação para o Movimento Diagonal: (a) simulação completa ;(b) ampliação na imagem, para que possa-se visualizar melhor a forma de onda e seus patamares.



(a)



(b)

Figura 5.16: Resultados experimentais para o Movimento Diagonal com Unipolar de Dois Estágios: (a) tensão entre as placas dos capacitores de 160 V, em amarelo; (b) para uma tensão de 200 V, em amarelo. Para o sinal em amarelo, cada 500 mV exibido correspondem à 50 V de tensão real medida.

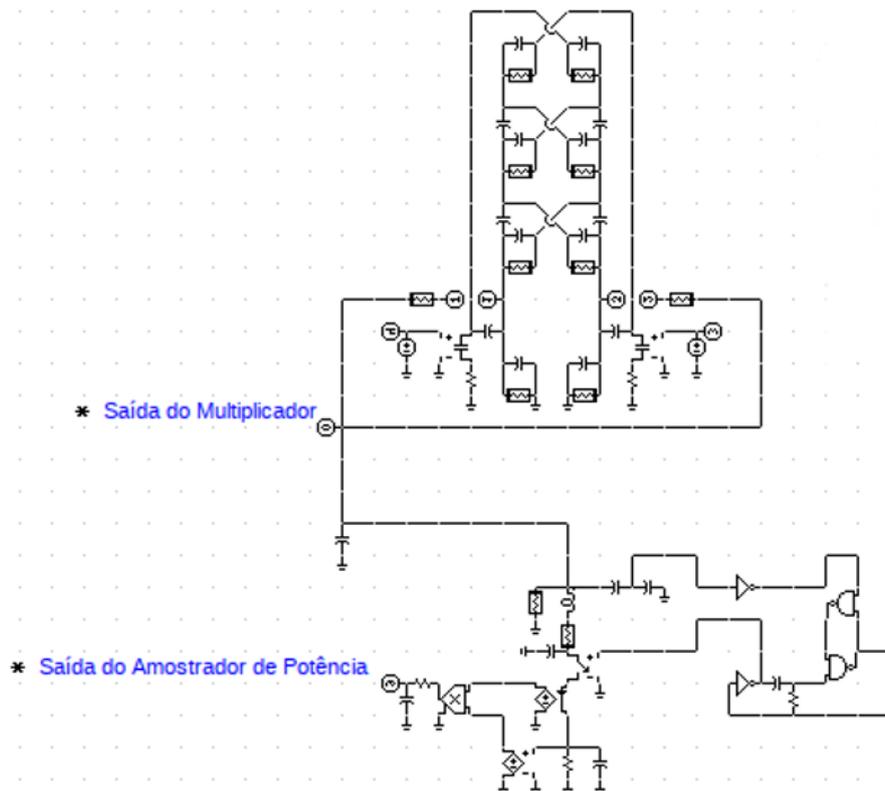


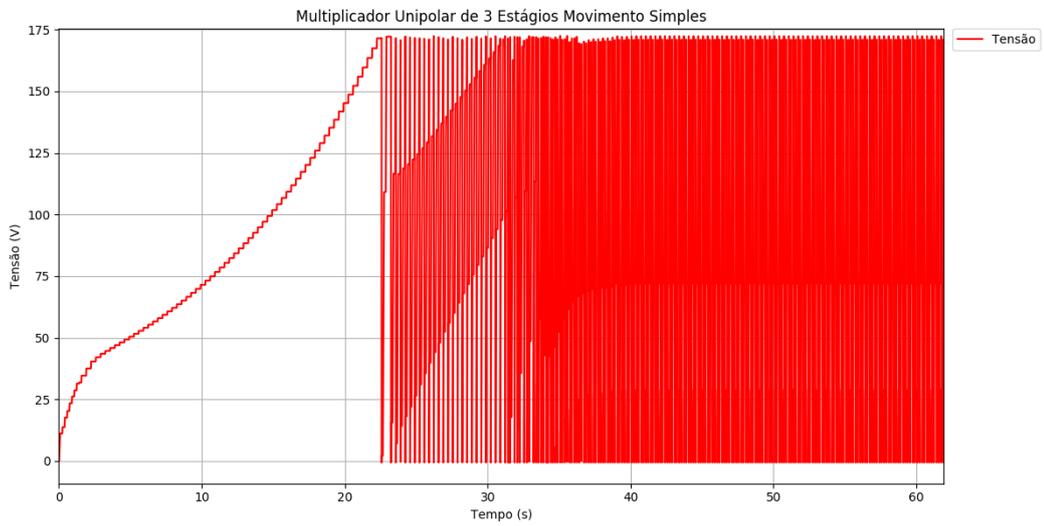
Figura 5.17: Circuito simulado para Multiplicador Unipolar de Três Estágios.

A tensão pode ser aumentada além de 200 V , atingindo em torno de 260 V e tendo deformações do sinal de onda poucos significativas, melhor do que era esperado, como pode ser visto na Fig. 5.20. A tensão na saída do circuito de amostragem é de $854,84\text{ mV}$ e potência aproximada de $56,99\text{ }\mu\text{W}$.

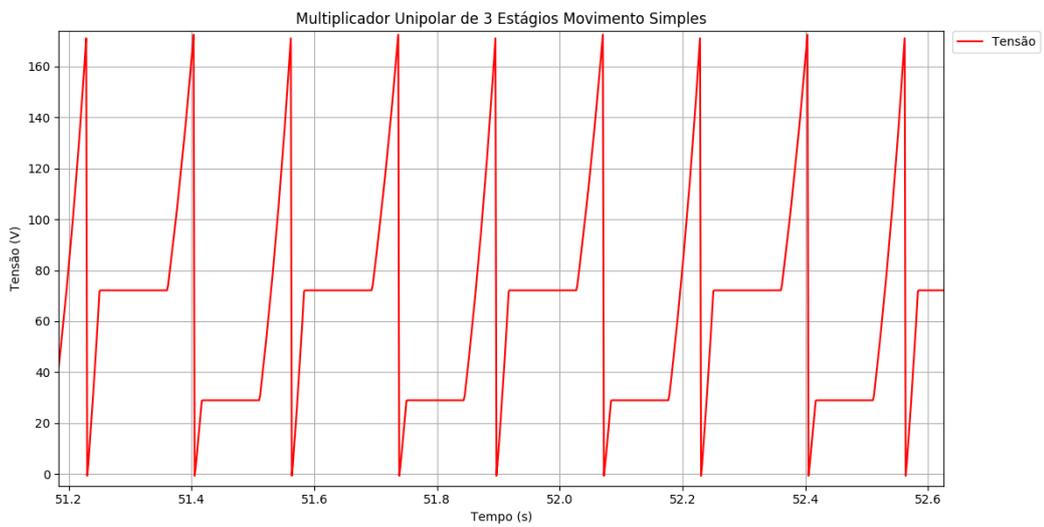
Movimento Duplo

Durante o experimento para o movimento duplo, a frequência máxima obtida foi de pouco mais de 11 Hz para tensões de 160 V e 200 V entre as placas dos capacitores. Assim, a simulação foi ajustada para comparar com o ensaio experimental, utilizando os valores de capacitância aferidos em laboratório. A Fig. 5.21 mostra a simulação para o primeiro caso testado na bancada do laboratório. Mesmo com a restrição de tensão em 160 V , como foi feita para o caso do Dobrador de Bennet, a tensão ficou 10 V acima. Podem ser observados dois patamares, com o primeiro próximo ao valor mínimo de tensão.

O aumento de frequência foi constatado no ensaio experimental em comparação ao visto para o caso da seção anterior, indo de 6 Hz para 11 Hz sem deformações no formato de onda. A Fig. 5.22 exibe os resultados experimentais, podendo ser notado o aumento da frequência, conseguindo extrair mais potência. A Fig. 5.22a mostra o resultado para comparação com a simulação apresentada na Fig. 5.21. Comparando os resultados experimentais para o movimento simples e duplo, ambos em 160 V , temos que o movimento

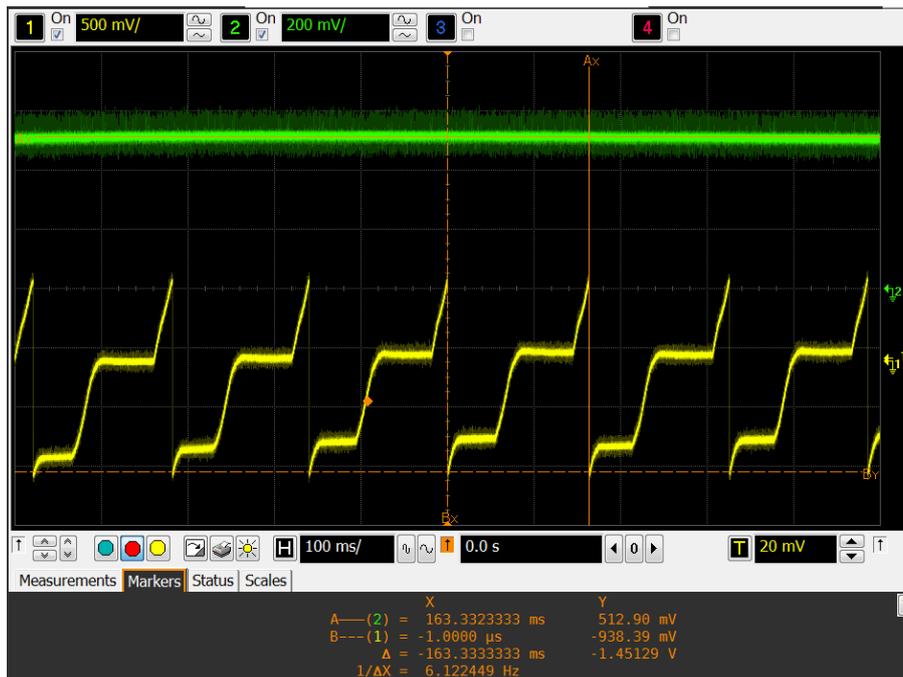


(a)

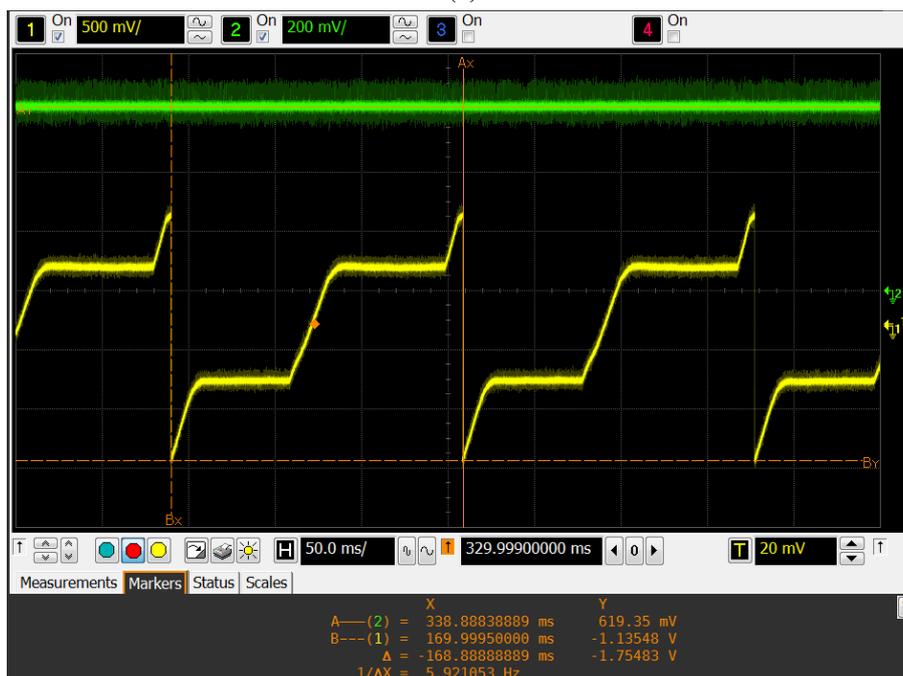


(b)

Figura 5.18: Simulação para o Movimento Simples do Multiplicador de 3 Estágios: (a) simulação completa; (b) ampliação na imagem, para que possa-se visualizar melhor a forma de onda e seus patamares.



(a)



(b)

Figura 5.19: Resultado experimental do Multiplicador de 3 Estágios: (a) 6 Hz de frequência de ciclo e tensão de 160 V entre as placas dos capacitores, em amarelo; (b) 6 Hz de frequência de ciclo e tensão de 200 V entre as placas dos capacitores, em amarelo. Em ambos os casos o sinal destacado em verde no canal 2 é a saída do circuito de amostragem. Para o sinal em amarelo, cada 500 mV exibido correspondem à 50 V de tensão real medida.

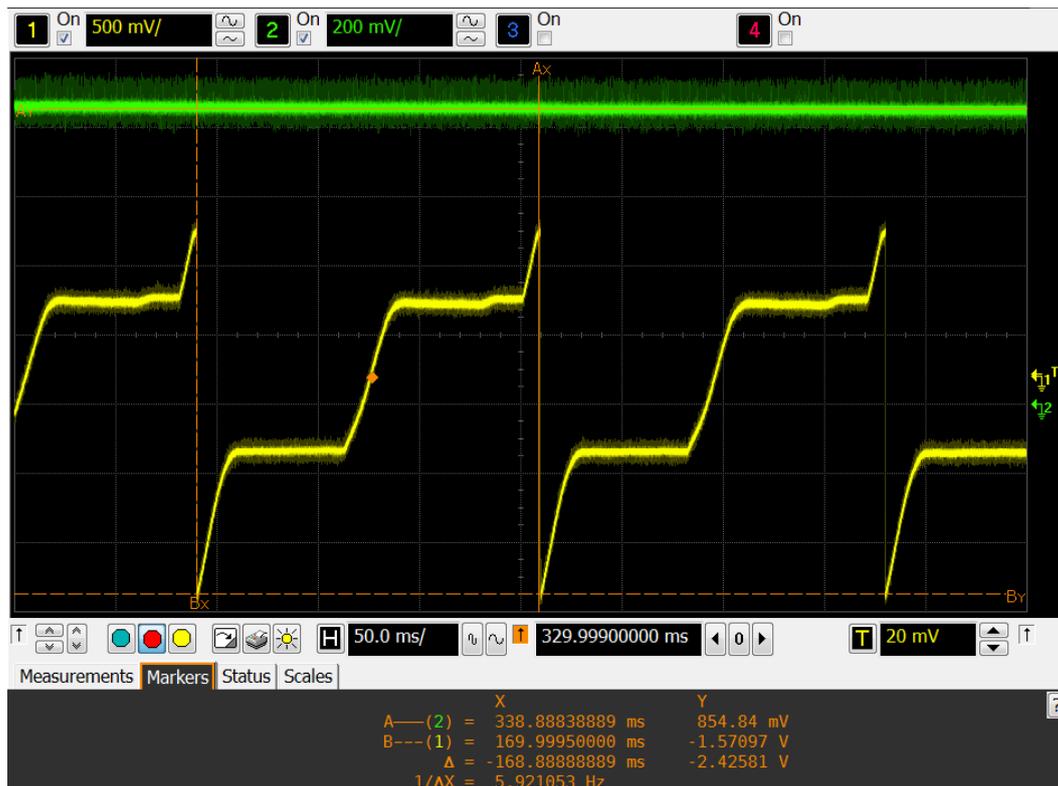
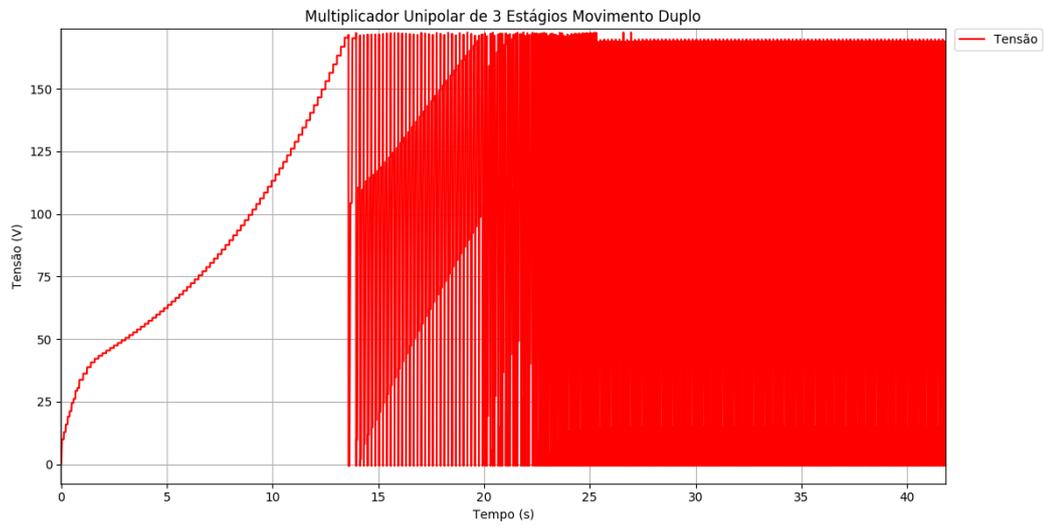


Figura 5.20: Resultado experimental para tensão de 260 V entre as placas para o Unipolar de 3 Estágios. Para o sinal em amarelo, cada 500 mV exibido correspondem à 50 V de tensão real medida.

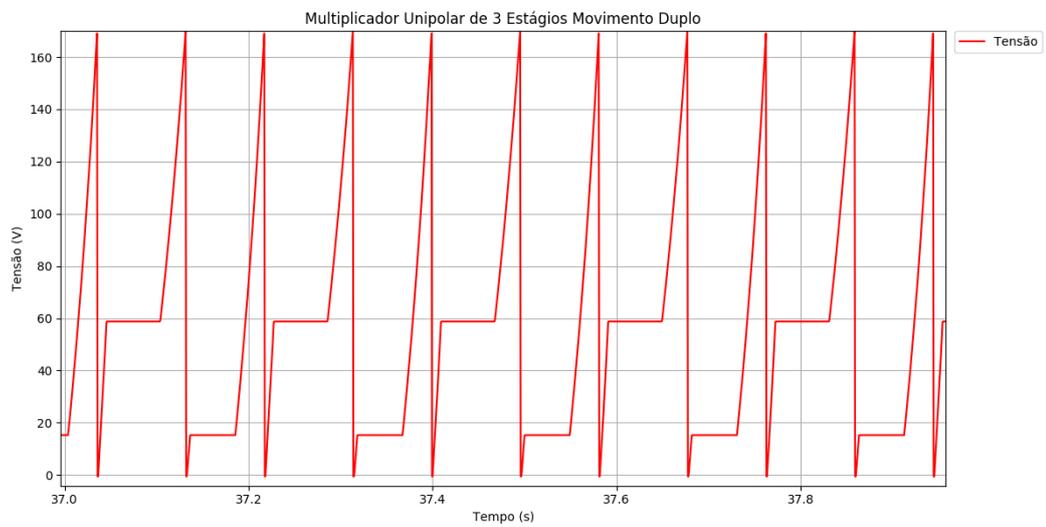
duplo extrai mais energia, justamente pelo aumento de frequência, conseguindo a faixa de 964,52 mV, o que corresponde a 64,3 μW, aproximadamente. Para provar que o movimento possibilitaria atingir frequências mais altas em tensões maiores, o experimento foi ajustado para 200 V e o motor foi acelerado gradativamente, atingindo a marca de 11 Hz, sem interferir no movimento com as prováveis descargas eletrostáticas que limitaram o movimento simples. Para essa frequência e tensão mais elevada, a tensão obtida na saída do circuito de amostragem é 1,26129 V e, assim, a potência obtida é, aproximadamente, 84,09 μW, sendo, aproximadamente, seis vezes o limiar superior almejado para uma implementação em marca-passo no estado da arte. A tensão não pode ser elevada muito além de 200 V para frequência de 11 Hz, pois o sinal de saída se deteriora com as descargas eletrostáticas, que impedem a recuperação do sinal do circuito entre os ciclos de operação.

Movimento Diagonal

Como anteriormente, a menor variação de capacitância gera uma expectativa de que os resultados sejam piores que os anteriores, com frequência de ciclo mais baixa e energia extraída menor. No ensaio experimental, a frequência ficou entre 6 e 6,16 Hz e, assim, foi ajustada a simulação para fins de comparação, conforme pode ser visto na Fig. 5.23 para

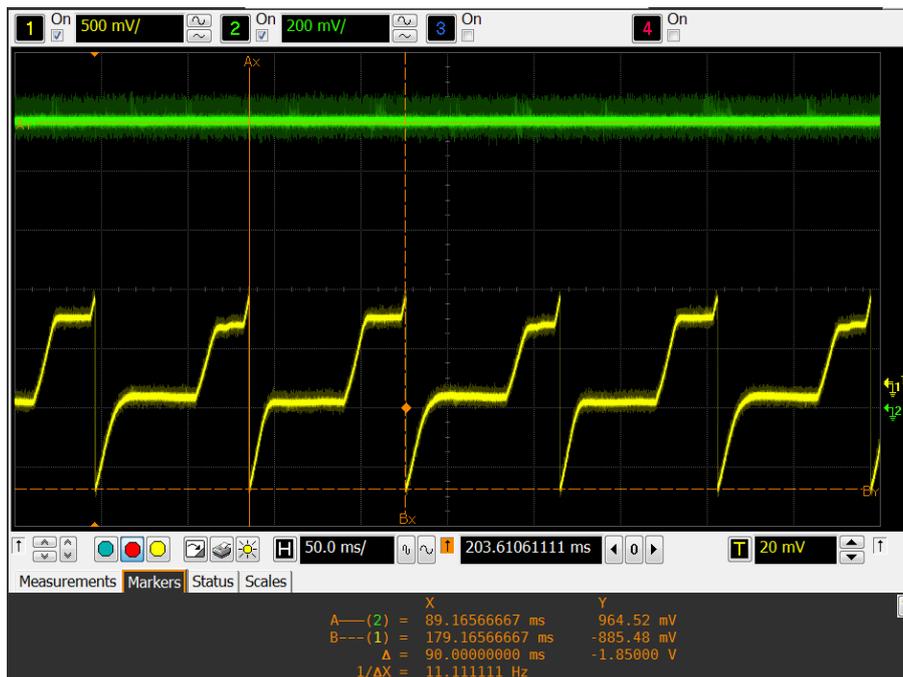


(a)



(b)

Figura 5.21: Simulação para o Movimento Duplo do Unipolar de 3 Estágios: (a) simulação completa; (b) ampliação na imagem, para que possa-se visualizar melhor a forma de onda e seus patamares.



(a)



(b)

Figura 5.22: Resultados experimentais para o Movimento Duplo com o Multiplicador Unipolar de Três Estágios: (a) tensão entre as placas dos capacitores de 160 V, em amarelo; (b) para uma tensão de 200 V, em amarelo. Para o sinal em amarelo, cada 500 mV exibido correspondem à 50 V de tensão real medida.

o caso de 160 V .

Os experimentos foram feitos, novamente, para tensões de 160 V e 200 V e o movimento foi executado formando um "X" para que pudesse ter um deslocamento em todas as direções possíveis e que não fosse comportado, testando algo mais inusitado. A Fig. 5.24 mostra os resultados experimentais para os casos citados. Na Fig. 5.24a, tem-se o caso para 160 V , com frequência aproximada de 6 Hz e saída do circuito de amostragem em $506,45\text{ mV}$, o que representa aproximadamente $33,76\ \mu\text{W}$, inferior ao obtido nos dois casos anteriores para mesma máquina eletrostática e tensão. Para o caso da tensão em 200 V , a Fig. 5.24b mostra uma frequência aproximada de $6,16\text{ Hz}$ e tensão na saída do circuito de amostragem em $693,55\text{ mV}$, o que representa aproximadamente $46,24\ \mu\text{W}$, apresentando maior energia que o movimento simples e menor que o movimento duplo. Em ambos os casos, é alcançada maior frequência e maior potência que o Dobrador de Bennet e o Unipolar de Dois Estágios. Nota-se que as ondas presentes na Fig. 5.16 são bem deformadas e não apresentam uniformidade em sua repetição, podendo ser essas deformações creditadas às descargas eletrostáticas entre as placas. Estas podem ser geradas por deformidades na montagem que só podem ser alcançadas dentro de um movimento mais caótico. Ainda assim, para o Unipolar de Três Estágios as ondas apresentaram uma uniformidade maior que o Unipolar de Dois Estágios, obtendo, também, maior frequência e energia.

5.2.4 Comparação Entre os Circuitos

Os resultados dos experimentos para o circuito Dobrador de Bennet estão reunidos na Tabela 5.11.

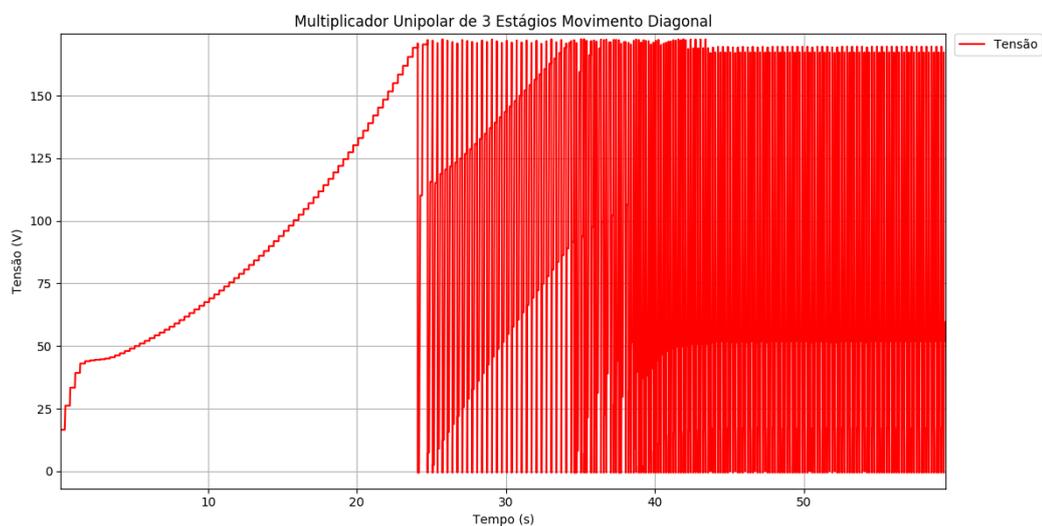
	Resultados Experimentais para o Dobrador de Bennet			
	160 V		200 V	
	Frequência (Hz)	Potência (μW)	Frequência (Hz)	Potência (μW)
Movimento Simples	2	8,5	1,6	11,94
Movimento Duplo	2	10,32	2,25	13,98
Movimento Diagonal	0,46	3,44	0,532	3,01

Tabela 5.11: Resultados para o Dobrador de Bennet de potência e frequência para cada movimento dos capacitores, com tensões de 160 V aplicadas entre as placas.

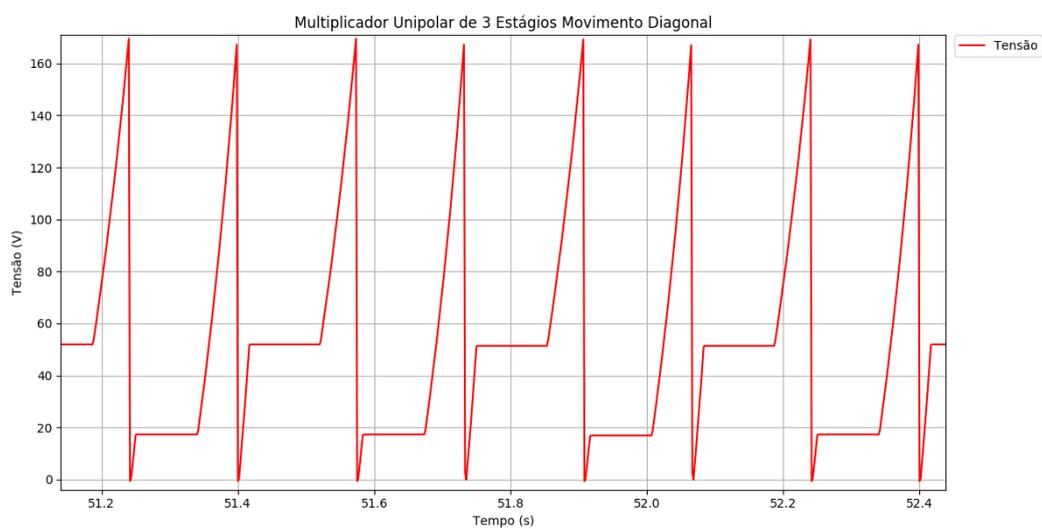
Os resultados dos experimentos para o circuito Unipolar de 2 Estágios estão reunidos na Tabela 5.12.

Os resultados para o circuito Unipolar de 3 Estágios estão reunidos na Tabela 5.13.

As Tabelas 5.11, 5.12 e 5.13 organizam os valores encontrados nos experimentos. Com elas é possível ver a diferença de potência obtida entre cada uma das máquinas eletrostáticas estudadas. Uma comparação é feita entre estes valores e expostos nas Tabelas 5.14, 5.15 e 5.16. Em todos os casos os Unipolares conseguem mais potência e frequência



(a)

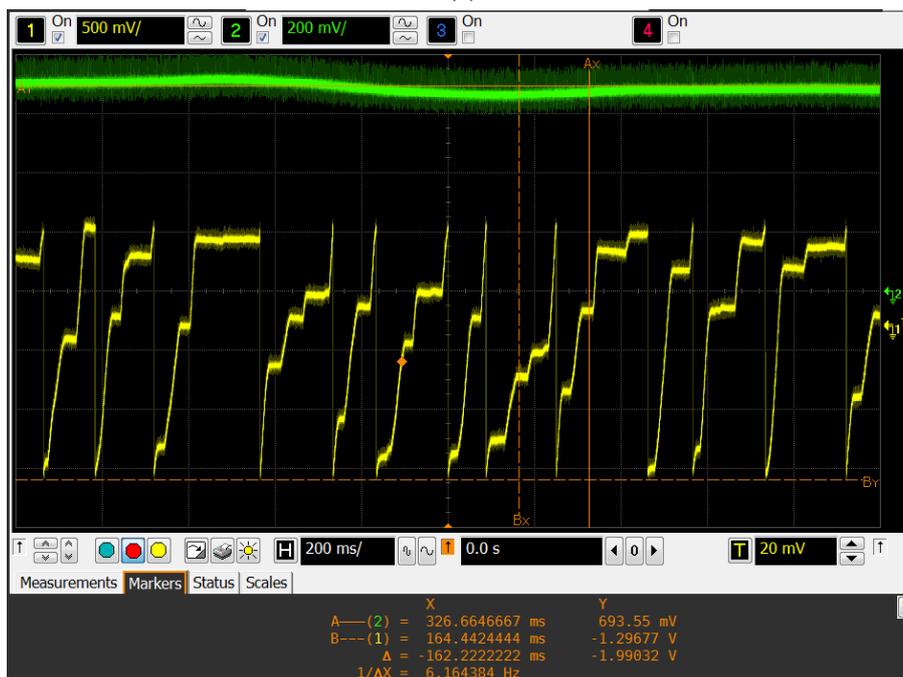


(b)

Figura 5.23: Simulação para o Movimento Diagonal Unipolar de 3 Estágios: (a) simulação completa; (b) ampliação na imagem, para que possa-se visualizar melhor a forma de onda e seus patamares.



(a)



(b)

Figura 5.24: Resultados experimentais para o Movimento Diagonal com Unipolar de Três Estágios: (a) tensão entre as placas dos capacitores de 160 V, em amarelo; (b) para uma tensão de 200 V, em amarelo. Para o sinal em amarelo, cada 500 mV exibido correspondem à 50 V de tensão real medida.

	Resultados Experimentais para o Unipolar de 2 Estágios			
	160 V		200 V	
	Frequência (Hz)	Potência (μ W)	Frequência (Hz)	Potência (μ W)
Movimento Simples	6	32,04	5,96	41,94
Movimento Duplo	11	57,63	11	74,84
Movimento Diagonal	2,9	13,55	2	9,68

Tabela 5.12: Resultados para o Unipolar de 2 Estágios de potência e frequência para cada movimento dos capacitores, com tensões de 160 V aplicadas entre as placas.

	Resultados Experimentais para o Unipolar de 3 Estágios			
	160 V		200 V	
	Frequência (Hz)	Potência (μ W)	Frequência (Hz)	Potência (μ W)
Movimento Simples	6	34,19	5,9	41,29
Movimento Duplo	11	64,30	11	84,90
Movimento Diagonal	6	33,76	6,16	46,24

Tabela 5.13: Resultados para o Unipolar de 3 Estágios de potência e frequência para cada movimento dos capacitores, com tensões de 160 V aplicadas entre as placas.

que o Dobrador de Bennet. Na comparação entre os Unipolares, o Unipolar de 2 Estágios tem desempenho parecido com o de 3 Estágios para o Movimento Simples e Movimento Duplo, com o de 3 Estágios sendo sutilmente melhor para o Movimento Duplo. Quanto ao Movimento Diagonal, o Unipolar de 3 Estágios mostra resultados superiores relevantes em relação ao de 2 Estágios. Isto ocorre, porque o Unipolar de 3 Estágios precisa de 1,3 de relação de capacitância máxima e mínima, enquanto que o 2 Estágios precisa de 1,5. Como o Movimento Diagonal é bem caótico, os valores de para a relação de capacitância não serão o ideal apresentado nas Tabelas 5.1 e 5.2, pois o movimento não irá somente deslocar uma casa para o Eixo X e Y, tendo valores menores para a relação de capacitância em diversos momentos do ciclo do movimento.

	Comparação entre o Dobrador de Bennet e o Unipolar de 2 Estágios			
	160 V		200 V	
	Frequência	Potência	Frequência	Potência
Movimento Simples	3	3,77	3,72	3,51
Movimento Duplo	5,5	5,58	4,89	5,35
Movimento Diagonal	6,3	3,94	3,76	3,21

Tabela 5.14: Comparação de quantas vezes as medidas do Unipolar de 2 Estágios se relaciona para o Bennet.

	Comparação entre o Dobrador de Bennet e o Unipolar de 3 Estágios			
	160 V		200 V	
	Frequência	Potência	Frequência	Potência
Movimento Simples	3	4,02	3,68	3,46
Movimento Duplo	5,5	6,23	4,89	6,07
Movimento Diagonal	13	9,81	11,58	15,36

Tabela 5.15: Comparação de quantas vezes as medidas do Unipolar de 3 Estágios se relaciona para o Bennet.

	Comparação entre o Unipolar de 2 Estágios e o Unipolar de 3 Estágios			
	160 V		200 V	
	Frequência	Potência	Frequência	Potência
Movimento Simples	1	1,07	0,99	0,98
Movimento Duplo	1	1,11	1	1,13
Movimento Diagonal	2,07	2,49	6,16	4,78

Tabela 5.16: Comparação de quantas vezes as medidas do Unipolar de 3 Estágios se relaciona para o Unipolar de 2 Estágios.

Capítulo 6

Conclusões

Este capítulo traz comparações de desempenho entre os resultados apresentados no capítulo anterior, conclusões sobre o processo de impressão e sua possível tradução para uma fabricação em MEMS, possíveis desafios a serem encontrados em MEMS com base nesses resultados e perspectivas futuras.

6.1 Comparação entre os Circuitos

Como antedito, o Dobrador de Bennet apresenta o pior resultado entre as três máquinas eletrostáticas. Porém, é funcional e, dependendo das limitações de espaço para montagem do circuito, é uma alternativa interessante. Os dois Multiplicadores apresentaram resultados superiores ao Dobrador de Bennet, como pode ser visto nas Tabelas 5.14 e tab:CompBennetUnip3, e com características interessantes entre eles. O Multiplicador de Dois Estágios apresentou a possibilidade de atingir tensões de operação mais elevadas entre as placas (Fig. 5.14) e uma longa sequência de ciclos bem comportados, porém, com menor energia extraída que o caso com um estágio a mais (Tabela 5.16). O Multiplicador de Três Estágios apresentou maior energia extraída e frequências de operação mais elevadas, porém, sem poder ultrapassar muito a marca de 200 V entre as placas e com sequências de ciclos menos comportados do que com um estágio a menos. Entre os três circuitos testados, o Dobrador de Bennet apresentou a partida mais rápida, seguido pelo Multiplicador de Dois Estágios e o de Três Estágios. Todos necessitaram de uma excitação para dar partida. Esta necessidade se deve à má condutividade do ABS Condutor, pois, diferentemente do experimento anterior[2], que tinha uma estrutura de maior espessura, as placas são bem finas e os testes feitos com multímetro mostraram condutividade inferior. Como a aplicação em MEMS é feita com materiais melhores condutores (níquel e polissilício, por exemplo), esse efeito é extirpado, sendo necessário fazer simulações mais complexas quanto às características eletrostáticas da estrutura.

6.2 Efeito Eletromecânico

Como o modelo não fez uso de mola e o movimento foi totalmente controlado e forçado, não pôde ser vista a resistência mecânica ao movimento. Porém, pode ser notado o efeito de atração entre as placas durante o experimento, no qual, em certas condições, as placas vibravam como membranas e impossibilitava o funcionamento das máquinas eletrostáticas. Quando no limiar da vibração, a forma de onda no experimental fica desfigurada, ao se comparar com o esperado ideal (Fig. 3.3), mostrando que está havendo perda de carga por descarga entre as placas, mesmo que não seja visível. O uso de materiais com resistência mecânica superior ao ABS numa fabricação em MEMS poderia contornar esse problema de vibração de membrana. Algumas fabricações usam polisilício, que já é mecanicamente mais forte que o ABS, e outras usam ainda metais e ligas metálicas, sendo ainda mais fortes. Além disso, esses materiais citados para fabricação de MEMS também apresentam condutividade muito superior ao ABS condutor, podendo melhorar ainda mais a troca de carga e funcionamento do sistema, fazendo-os ser mais espontâneos.

Outro efeito interessante observado e testado é a influência da distância entre as placas no funcionamento, parecendo ter um limite para a aproximação, como mencionado anteriormente. Para testar isto mais a fundo, a distância entre as placas foi encurtada, porém, agora com um plástico dielétrico (polipropileno) entre elas para aumentar a capacitância e evitar contato entre as placas. O teste consistia em observar se era possível aproximar mais ainda as placas para aumentar a capacitância e, assim, usar menos placas para gerar energia. Uma expectativa era de que o atrito das placas com o plástico pudesse, depois de um certo tempo do experimento, saturar de carga e a coleta de energia cessar. Porém, foi observado efeito semelhante ao obtido sem o plástico, apresentando uma leve melhora na relação entre as capacitâncias máxima e mínima, mas ainda insuficiente. O efeito de grade observado ainda foi dominante, talvez descartando essa teoria para futuras simulações de materiais para esse método aplicado em microeletrônica. Assim, a variação de capacitância observada era praticamente nula, não possibilitando o funcionamento do sistema.

6.3 Possível Implementação em MEMS

Para uma implementação dessas em multinível, é necessário um estudo bem completo sobre a resistência mecânica quanto à gravidade, desgastes e funcionamento de molas, entre outras estimativas[26]. Isto pode servir de um ponto inicial para a tradução da estrutura conceito aqui testada para MEMS e direcionamento dos estudos em softwares multifísicos. Os padrões de mola para esta estrutura teriam que ser planejados para uma montagem semelhante ao estudo citado, ou uma outra possível abordagem de montagem

e fabricação.

Quanto às molas e à frequência de vibração da estrutura, uma outra possibilidade que pode ser estudada e implementada é uma possibilidade de se ter um espectro amplo de frequências de vibração, podendo abarcar todo, ou uma boa parte, o espectro de frequência de uma determinada aplicação, como no caso para o marca-passo citado para comparação neste capítulo. Isto seria interessante para outras aplicações também, que possam ter frequências mais elevadas. Isto liberaria uma segunda amarra desse tipo de dispositivo (sendo a primeira ter apenas um eixo de movimento, algo abordado nessa dissertação) que é operar em uma frequência específica para ter melhor rendimento, pois, ao operar levemente fora deste valor, os dispositivos têm pior desempenhos, com as molas resistindo muito ao movimento.

Capítulo 7

Discussões e Aplicações Futuras

Este capítulo traz uma discussão sobre a possível tradução para uma fabricação em MEMS, possíveis desafios a serem encontrados em MEMS com base nos resultados encontrados neste trabalho e perspectivas futuras.

7.1 Possível Implementação em MEMS

Para uma implementação dessas em multinível, é necessário um estudo bem completo sobre a resistência mecânica quanto à gravidade, desgastes e funcionamento de molas, entre outras estimativas[26]. Isto pode servir de um ponto inicial para a tradução da estrutura conceito aqui testada para MEMS e direcionamento dos estudos em softwares multifísicos. Os padrões de mola para esta estrutura teriam que ser planejados para uma montagem semelhante ao estudo citado, ou uma outra possível abordagem de montagem e fabricação.

Quanto às molas e à frequência de vibração da estrutura, uma outra possibilidade que pode ser estudada e implementada é uma possibilidade de se ter um espectro amplo de frequências de vibração, podendo abarcar todo, ou uma boa parte, o espectro de frequência de uma determinada aplicação, como no caso para o marca-passo citado para comparação neste capítulo. Isto seria interessante para outras aplicações também, que possam ter frequências mais elevadas. Isto liberaria uma segunda amarra desse tipo de dispositivo (sendo a primeira ter apenas um eixo de movimento, algo abordado nessa dissertação) que é operar em uma frequência específica para ter melhor rendimento, pois, ao operar levemente fora deste valor, os dispositivos têm pior desempenhos, com as molas resistindo muito ao movimento.

7.2 Perspectivas Futuras

Como dito anteriormente, estudos mais aprofundados e uma possível faixa de frequência de vibração mais ampla para o dispositivo tornarão essa tecnologia mais próxima de uma aplicação real e cotidiana. A especificação para operação da aplicação desejada é importante para determinar a quantidade de potência necessária, a tensão que o dispositivo tem que apresentar na saída, o tamanho máximo que o dispositivo pode apresentar para ser inserido no ambiente vibrante alvo, possíveis limitações eletromagnéticas para aplicação. Com estas definições, todo o conjunto do dispositivo pode ser fabricado (MEMS, circuito multiplicador de tensão e conversor de tensão). Assim, a estrutura desenvolvida nesse projeto poderá ser fabricada e microeletrônica e aplicada em um contexto factível para uso da população em geral.

Referências Bibliográficas

- [1] Disponível em: <<http://www.coe.ufrj.br/~acmq/bennet.gif>>.
- [2] DE OLIVEIRA FILHO, L. C. M. *COLETA DE ENERGIA DO AMBIENTE COM CAPACITORES VARIÁVEIS IMPRESSOS EM 3D*. Projeto de graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2017.
- [3] Disponível em: <https://cdn.pixabay.com/photo/2013/07/13/10/24/board-157165_960_720.png>.
- [4] S. BOISSEAU, G. D., SEDDIK, B. A. *Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting, Small-Scale Energy Harvesting*. Dr. mickaël lallart (ed.) ed. <http://www.intechopen.com/books/small-scale-energy-harvesting/electrostatic-conversion-for-vibration-energy-harvesting>, Intech, 2012.
- [5] SMALSER, P. “Power transfer of piezoelectric generated energy”, dez. 1997.
- [6] JG.K. OTTMAN, H. H., LESIEUTRE, G. “Optimized piezoelectric energy harvesting circuit using step-down converter in discontinuous conduction mode”, *2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings*, nov. 2002.
- [7] STERKEN, J., FIORINI, P., BAERT, K., et al. “An electret-based electrostatic spl mu-generator”, *TRANSDUCERS 03 12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, ago. 2003.
- [8] QUEIROZ, A. C. M. “Electrostatic Vibrational Energy Harvesting Using a Variation of Bennet’s Doubler”, *2010 53rd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, maio 2014.
- [9] QUEIROZ, A. C. M. “Electrostatic Generators for Vibrational Energy Harvesting”, *2013 IEEE 4th Latin American Symposium on Circuits and Systems (LAS-CAS)*, 2013.

- [10] DORZHIEV1, V., KARAMI, A., BASSET, P., et al. “MEMS electrostatic vibration energy harvester without switches and inductive elements”, *Journal of Physics: Conference Series. PowerMEMS*, v. 557, 2014.
- [11] DORZHIEV1, V., KARAMI, A., BASSET, P., et al. “Electret-Free Micromachined Silicon Electrostatic Vibration Energy Harvester With the Bennet’s Doubler as Conditioning Circuit”, *IEEE Electron Device Letters*, v. 36, n. 2, pp. 183–185, fev. 2015.
- [12] DE QUEIROZ, A. C. M., DOMINGUES, M. “Ultra-low-power control systems for electrostatic energy harvesters”, *Circuits and Systems (ISCAS), 2013 IEEE International Symposium*, ago. 2013.
- [13] DE QUEIROZ, A. C. M. “Electrostatic energy harvesting without active control circuits”, *Circuits and Systems (LASCAS), 2014 IEEE 5th Latin American Symposium on*, maio 2014.
- [14] KARAMI, A., DUDKA, A., GALAYKO, D., et al. “The limiting effect of electromechanical coupling in self-biased electrostatic Vibration Energy Harvester”, *Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), 2015 Symposium*, jul. 2015.
- [15] BLOKHINA, E., FOURNIER-PRUNARET, D., HARTE, P., et al. “Combined mechanical and circuit nonlinearities in electrostatic vibration energy harvesters”, *2013 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS2013)*, ago. 2013.
- [16] WEI, J., RISQUEZ, S., MATHIAS, H., et al. “Simple and efficient interface circuit for vibration electrostatic energy harvesters”, *2015 IEEE SENSORS*, jan. 2016.
- [17] RISQUEZ, S., WOYTASIK, M., WEI, J., et al. “Design of a 3D multilayer out-of-plane overlap electrostatic energy harvesting MEMS for medical implant applications”, *Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), 2015 Symposium*, jul. 2015.
- [18] DE SOUZA, M. S. *REDE DE SENSORES ALIMENTADA POR UM SISTEMA DE COLETA DE ENERGIA DO AMBIENTE*. Projeto de graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2016.
- [19] BRYZEK, J., ROUNDY, S., BIRCUMSHAW, B., et al. “Marvelous MEMS, Advanced IC Sensors and Microstructures for High Volume Applications”, *IEEE Circuits & Devices Magazines*, v. 22, n. 2, pp. 8–28, mar. 2006.

- [20] KUBBY, J. A. *A Guide to Hands-on MEMS Design and Prototyping*. 1st edition ed. <https://www.cambridge.org/core/books/a-guide-to-hands-on-mems-design-and-prototyping/21D6823D820A3157DA21B89628BDD4AB>, Cambridge University Press, fev. 2011.
- [21] R.S.DHARIWAL, J.-M., DESMULLIEZ, M. “Electric field breakdown at micro-metre separations in air and nitrogen at atmospheric pressure”, *IEE Proc.-Sci. Mcus. Twliriol.*, v. 147, n. 5, pp. 261–265, set. 2000.
- [22] QUEIROZ, A. C. M., DE OLIVEIRA FILHO, L. C. M. “Simulation of MEMS Energy Harvesting Generators Based on Bennet’s Doubler”, *VI Latin American Symposium on Circuits and Systems (LASCAS) 2015*, fev. 2015.
- [23] QUEIROZ, A. C. M., DE OLIVEIRA FILHO, L. C. M. “Energy Harvesting with 3D-printed Electrostatic Generators”, *VII Latin American Symposium on Circuits and Systems (LASCAS) 2016*, mar. 2016.
- [24] QUEIROZ, A. C. M., DE OLIVEIRA FILHO, L. C. M. “Live demonstration: Unipolar symmetrical variable-capacitance generators for energy harvesting”, *Circuits and Systems (ISCAS), 2017 IEEE International Symposium*, set. 2017.
- [25] QUEIROZ, A. C. M., DE OLIVEIRA FILHO, L. C. M. “Unipolar symmetrical variable-capacitance generators for energy harvesting”, *Circuits and Systems (MWSCAS), 2017 IEEE 60th International Midwest Symposium*, out. 2017.
- [26] RISQUEZ, S. *Microsystème électrostatique tridimensionnel de récupération d’énergie pour alimenter un stimulateur cardiaque sans sonde*. Tese de D.Sc., Université Paris-Saclay, UPS, Saclay, Île-de-France, França, 2017.
- [27] DE QUEIROZ, A. C. M., DOMINGUES, M. “The Doubler of Electricity Used as Battery Charger”, *IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS—II: EXPRESS BRIEFS*, v. 58, n. 12, pp. 797–801, dez. 2011.
- [28] COTTONE, F., BASSET, P., MARTY, F., et al. “Electrostatic generator with free micro-ball and elastic stoppers for low-frequency vibration harvesting”, *IEEE 27th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, jan. 2014.
- [29] KASHIF RIAZ, SHAFAT A. BAZAZ, M. M. S., SHAKOOR, R. I. “Design, damping estimation and experimental characterization of decoupled 3-DoF robust MEMS gyroscope”, *Sensors & Actuators: A. Physical*, v. 172, n. 2, pp. 523–532, 2011.

- [30] W.C. TANG, T.-C. N., HOWE, R. “Laterally driven polysilicon resonant microstructures”, *IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, , *Proceedings, 'An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots'*, fev. 1989.
- [31] KOPPELMAN, G. “OYSTER, a 3D structural simulator for microelectromechanical design”, *IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, , *Proceedings, 'An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots'*, fev. 1989.
- [32] BENECKE, W., RIETHMULLER, W. “Applications of silicon microactuators based on bimorph structures”, *IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, , *Proceedings, 'An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots'*, fev. 1989.
- [33] MALVAR, O., RUZ, J. J., KOSAKA, P. M., et al. “Mass and stiffness spectrometry of nanoparticles and whole intact bacteria by multimode nanomechanical resonators”, *Nature Communications*, v. 7, nov. 2016.
- [34] MAROUFI, M., RUPPERT, M. G., FOWLER, A. G., et al. “Design and control of a single-chip SOI-MEMS atomic force microscope”, *American Control Conference (ACC), 2017*, jul. 2017.
- [35] SANYAL, K., BISWAS, K. “Structural design and optimization of MEMS based capacitive accelerometer”, *Devices for Integrated Circuit (DevIC), 2017*, out. 2017.
- [36] BISWAS, S., GOGOI, A. K. “Design and simulation of piezoresistive MEMS accelerometer for the detection of pathological tremor”, *MSOUTHEASTCON 2014, IEEE*, nov. 2014.
- [37] FELL. “Development of a Second Generation Low Cost MEMS Gyroscope: Design for Manufacture”, *MEMS Sensors and Actuators, 2006. The Institution of Engineering and Technology Seminar on*, abr. 2006.
- [38] KHANNA, G., ASTHANA, P. “A comparative study of circuit for Piezo-electric energy harvesting”, *Computing for Sustainable Global Development (INDIA-Com), 2016 3rd International Conference on*, out. 2016.
- [39] Disponível em: <<http://www-bsac.eecs.berkeley.edu/cadtools/sugar/>>.
- [40] JUSTYNA SKOWYRAAB, K. P., A.ALHNANA, M. “Fabrication of extended-release patient-tailored prednisolone tablets via fused deposition modelling

(FDM) 3D printing”, *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, v. 68, pp. 11–17, fev. 2015.

- [41] Disponível em: <https://news.lockheedmartin.com/2017-04-04-Design-Evolution-Lockheed-Martin-is-using-3-D-Printed-Parts-for>
- [42] Disponível em: <https://www.nasa.gov/content/open-for-business-3-d-printer-creates-first-object-in-space-on-international>
- [43] Disponível em: <http://www.coe.ufrj.br/~acmq/bennet.html>.
- [44] BINH DUC TRUONG, C. P. L., HALVORSEN, E. “Analysis of Electrostatic Energy Harvesters Electrically Configured as Bennet’s Doubler”, *IEEE Sensors Journal*, v. 17, n. 16, pp. 5180–5191, ago. 2017.
- [45] HEGGLUN, I. “Electronics World”, pp. 795–806, out. 1996.
- [46] LEFEUVRE, E., RISQUEZ, S., WEI, J., et al. “Self-biased inductor-less interface circuit for electret-free electrostatic energy harvesters”, *Journal of Physics: Conference Series*, v. 557, n. 1, 012052, pp. 1–5, nov. 2014.
- [47] Disponível em: <https://www.comsol.com/>.
- [48] Disponível em: <https://www.ansys.com/>.
- [49] Disponível em: <http://www.coe.ufrj.br/~acmq/tesla/capcalc.pdf>.
- [50] Disponível em: <http://www.coe.ufrj.br/~acmq/programs/>.
- [51] . Disponível em: <https://www.simplify3d.com/>.
- [52] . Disponível em: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/>.

Apêndice A

Procedimento para Impressão 3D

A impressão 3D foi feita no Laboratório de Integração em Tecnologia Analítica (LabITAn), situado no Instituto de Química (IQ) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), usando uma Impressora 3D Pro - GTMax3D Core A3 e com auxílio do professor Ricardo Michel. Os arquivos *stl* foram gerados usando licença de estudante do software AutoCAD concedido aos alunos da UFRJ, porém podem ser gerados em qualquer ferramenta de CAD (Computer Aided Design) que gere arquivo *stl*. O fatiamento e geração dos arquivos *gcode* para impressão foram feitos usando o software Simplify3D[51], cuja licença pertence ao LabITAn. O arquivo *gcode* carrega as informações acerca da impressão.

O filamento utilizado foi ABS condutor para que fosse possível realizar a troca de carga entre as placas dos capacitores. Esse tipo de filamento possui dopagem de carbono e, por isso, tem características particulares para sua impressão, sendo bem mais difícil de imprimir com este material do que com ABS normal. Os principais problemas encontrados foram aderência na cama de vidro da impressora, não adesão entre as camadas, borda ficando curvadas, centro das impressões não colando na cama. Todos esses problemas foram contornados depois de diversas modificações no perfil de impressão e algumas semanas de testes. Para melhor compreensão dos problemas e medidas possíveis para solucioná-los, o Simplify3D disponibiliza um site que expõe os possíveis problemas encontrados durante a impressão e possíveis soluções[52].

Para o problema de adesão na cama de vidro da impressão é muito comum usar compostos químicos que aumentem a adesão do plástico ao vidro. Em ordem crescente de adesão pode-se usar o *spray* para cabelo da marca Karina; o Karina Extra Forte; cola em bastão da Scotch 3M (este por ser pastoso diminui a qualidade do acabamento da face da peça que ficar em contato com a cola e o vidro) e, o mais forte, gel para cabelo Bozzano 4, todos esses produtos podem ser encontrados em papelarias comuns ou farmácias. Para aplicação em ABS comum os *sprays* da marca Karina citados já bastam. Porém, o ABS condutor devido a sua dopagem de carbono, que é um componente com efeito lubrificante, tem sua aderência muito difícil e foi necessário utilizar o gel Bozzano 4, que

conferiu uma aderência muito forte da mesa para o ABS condutor. Além do uso do gel, também foi posto no perfil de impressão *brim*, que seria uma espécie de "borda" que aumenta a superfície de contato do plástico com o vidro e, assim, facilitando a aderência do material. Outros materiais e técnicas para impressão podem ser usados, porém foram testados esses devido ao material e experiências anteriores.

Para usar o gel tem um procedimento simples, porém importante, a ser feito. O vidro tem que estar bem limpo, seco e com temperatura inferior a 40°C, sendo o mais próximo da temperatura ambiente melhor. Após essas condições serem satisfeitas, camadas muito finas e uniformes de gel devem ser aplicadas no vidro. Para facilitar esse procedimento use um cartão, por exemplo, para passar o gel no vidro, sempre respeitando o mesmo sentido no passar do gel. Cubra toda a área que sua peça irá ocupar no vidro com essa camada bem fina de gel, sendo recomendado passar o cartão sem gel por último para retirar o excesso. Fica quase imperceptível a presença do gel após retirar os excessos, sendo necessário às vezes ver contra a luz, devido ao reflexo. Após esse procedimento, aguarde dez minutos para que a fina camada de gel seque, em seguida já pode dar procedimento a impressão. A peça ficará bem presa ao vidro e a face virada para o vidro bem lisa. Para retirar a peça espere o vidro estar na temperatura ambiente e com uma espátula, idealmente, retire devagar a peça pelas laterais para evitar maiores danos a peça. Caso ache que a peça está ficando muito presa ao vidro, diminua a espessura da camada de gel, ou pode tentar usar um gel com número de fixação menor. Para limpar o vidro do gel, basta usar um pouco de água, que ele sai com facilidade, e para limpar usa-se um pano seco.

Para a falta de adesão entre as camadas de plástico uma solução foi aumentar a temperatura da câmara de impressão. Isto pode ser feito de diversas maneiras, como antes de imprimir já deixar a cama de vidro pré aquecida por alguns minutos, ou imprimir mais peças juntas para aumentar o tempo de impressão, assim aumentando a temperatura da câmara para as camadas seguintes da primeira. No caso do presente experimento, foi usado a segunda opção para a impressão dos suportes, imprimindo mais de dez peças por vez. Quanto as placas dos capacitores não foi preciso pré-aquecer a câmara, pois a placa ocupa maior parte da área da cama e dura quase uma hora para imprimir a primeira camada, portanto a câmara já fica aquecida nas camadas seguintes. As bordas curvadas são causadas por excesso de temperatura no plástico ao sair da extrusora, algo facilmente modificado no perfil de impressão.

A seguir estão as telas do Simplify3D com o perfil de impressão usado. Após a configuração do perfil de impressão, deve-se salvar as configurações, através do botão "Save as New". Ao realizar alguma modificação no perfil de simulação, basta clicar em *Update Profile* que a mudança já será salva no perfil selecionado. Ambos botões e telas podem ser vistos já na Fig. A.1. Comentários extras estão na descrição das imagens.

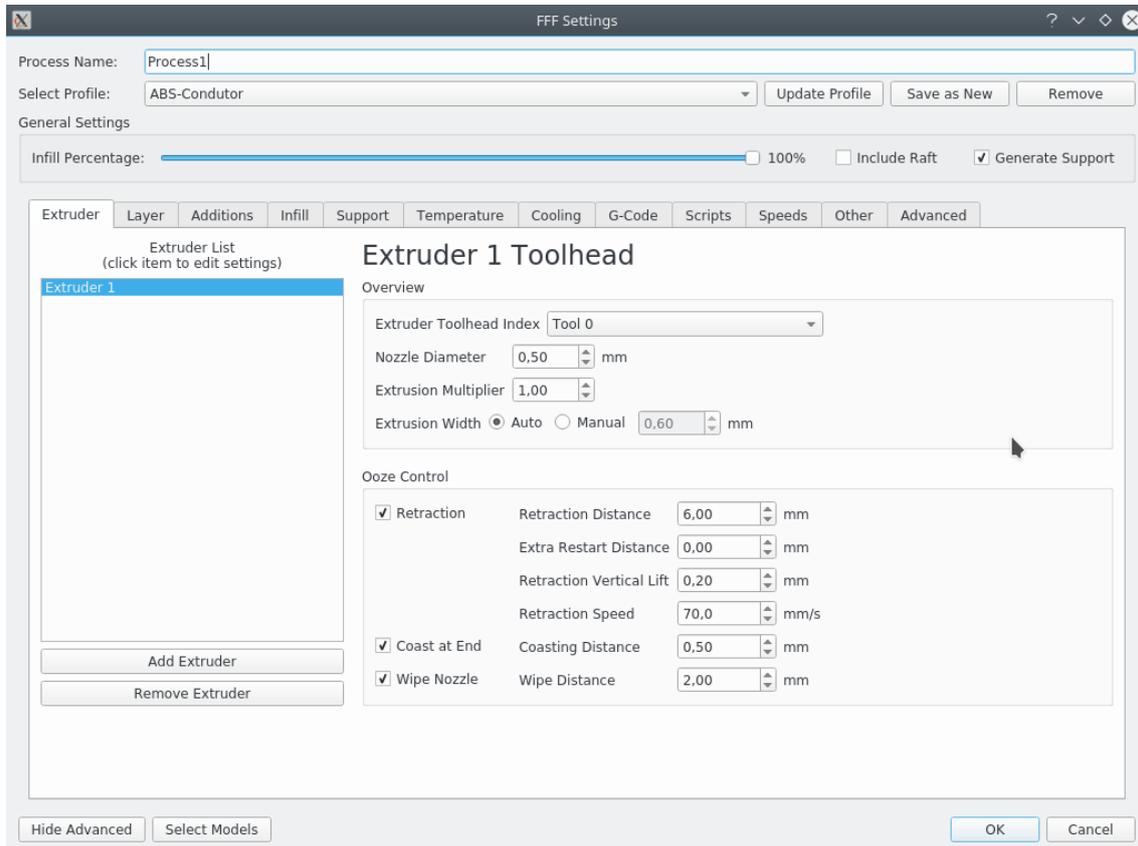


Figura A.1: Tela de controle da extrusora. Logo acima da aba "Extruder", tem uma barra de rolagem chamada "Infill Percentage", ela corresponde a porcentagem de solidez da sua peça, pois a peça pode ser um tanto quanto oca para economizar material. Dessa tela os valores estão como no padrão, somente o campo "Extrusion Multiplier" foi alterado para 1,00, sendo ele o fator de multiplicação da espessura expelida pelo bico da extrusora, de acordo com o diâmetro do filamento usado. Este parâmetro é responsável pelo preenchimento da peça também, assim como o "Infill Percentage", e, como foi usado filamento condutivo que tem baixa adesão, é importante ter um bom preenchimento para que a adesão ao vidro e entre camadas seja a melhor possível.

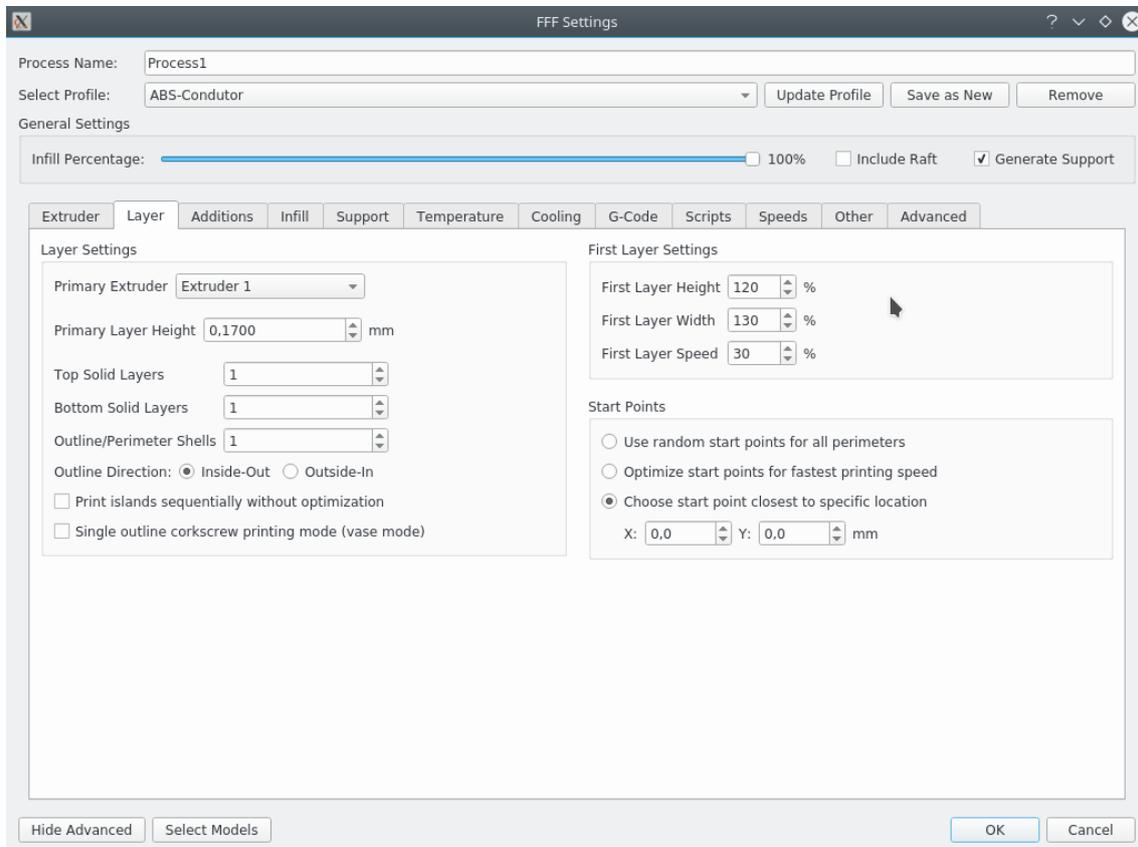


Figura A.2: Tela de configuração de camadas. Nesta aba, encontra-se duas áreas importantes, sendo elas a *"Layer Settings"* e *"First Layer Settings"*. Na primeira, é importante a configuração da altura das camadas (*"Primary Layer Height"*), contribui diretamente para o número de camadas da impressão, com mais camadas fica mais fácil a adesão entre elas, pois a câmara aquece mais e, também, propicia um acabamento melhor. Os campos *"Top Solid Layers"*, *"Bottom Solid Layers"* e *"Outline/Perimeters Shells"* são responsáveis pelo número de envoltórias, cascas, das camadas, como a impressão é composta por pequenas áreas é importante ter maior preenchimento para coesão da estrutura, assim é importante ter apenas uma para permitir maior preenchimento. Dessa tela, possivelmente a configuração mais importante é a de configurações para primeira camada que está presente em *"First Layer Settings"*, nesta seção configura a altura (*"First Layer Height"*), a largura (*"First Layer Width"*) e velocidade (*"First Layer Speed"*). Essas configurações são importantes, pois contribui majoritariamente para a adesão da impressão com a cama de vidro. Tanto altura e largura contribuem para o aumento da área da superfície de contato com o vidro. A velocidade é reduzida para melhorar a deposição sobre o vidro e dar mais tempo para a primeira camada colar na cama de vidro.

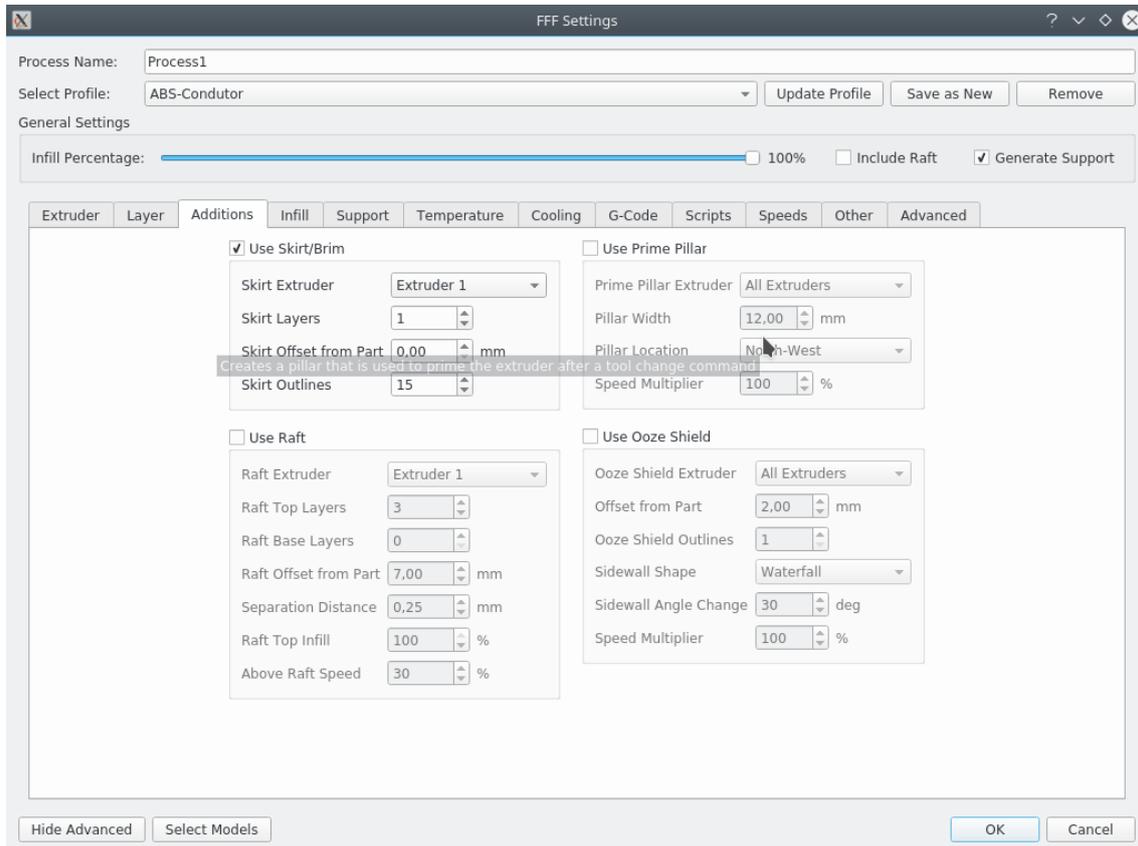


Figura A.3: Tela para adicionar auxílio à impressão. O único auxílio usado foi o *brim* e suas configurações se encontram na imagem. Foi posto *brim* apenas na primeira camada ("Skirt Layers: 1"), para facilitar seu destacamento depois de concluída a impressão e, também, facilitar a retirada da peça do vidro. Alguns testes feitos com duas camadas mostrou que torna difícil destacar, sendo que ao destacar ocorria o descolamento entre as camadas, como também dificultava retirar do vidro com a espátula, justamente por ser mais grosso. A opção "Skirt Outlines" determina o número de linhas que o *brim* terá. Foi selecionado quinze para aumentar a superfície de contato entre a peça e o vidro, aumentando a adesão. Esse número foi determinado empiricamente.

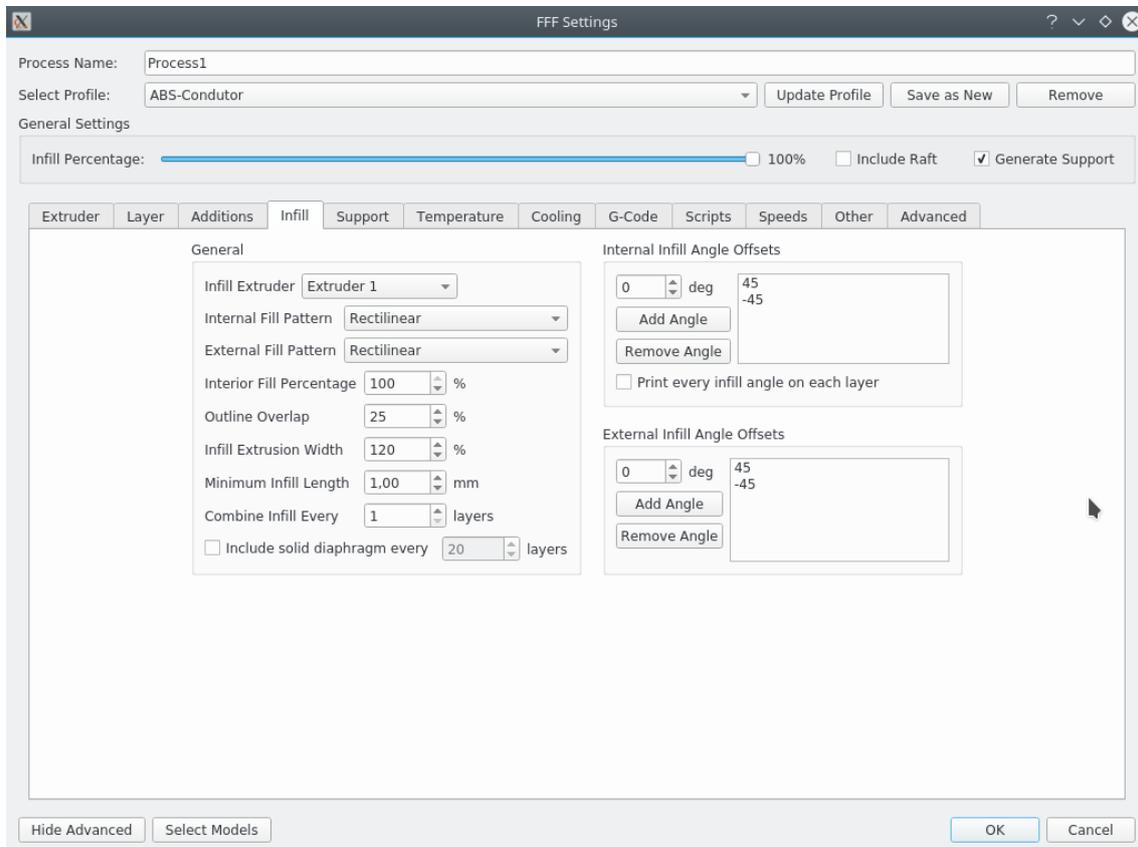


Figura A.4: Tela com configurações de preenchimento da peça. Em "General" temos a opção do padrão de preenchimento em "Internal Fill Pattern" e "External Fill Pattern", sendo escolhido "Rectilinear"(retilinear) para ter um preenchimento mais justo. É importante a peça ter um bom preenchimento, tanto para melhorar a adesão ao vidro, quanto a adesão entre camadas, portanto "Interior Fill Percentage" está em 100%. O campo "Outline Overlap" relaciona-se a porcentagem de sobreposição entre as camadas da linha de impressão que o bico faz, isso garante maior adesão entre as linhas, bem como preenchimento da peça e adesão entre as camadas. A opção "Infill Extrusion Width" serve, também para melhor acoplamento entre as linhas de impressão, adesão ao vidro e compensar possíveis diferenças na espessura do fio. As opções de ângulo "Internal Infill Angle Offsets" e "External Infill Angle Offsets" determinam o padrão de desenho que o bico da extrusora irá fazer, como foi escolhido o padrão retilíneo os ângulos de 45° e -45° foram posto por default, sendo que eles se alternam a cada camada da impressão. Através de testes foi visto que esse padrão realmente melhora a adesão entre as camadas. Foram feitos adicionando 0°, 60°, 120° e 180°, porém o preenchimento ficou melhor apenas com os dois ângulos originais.

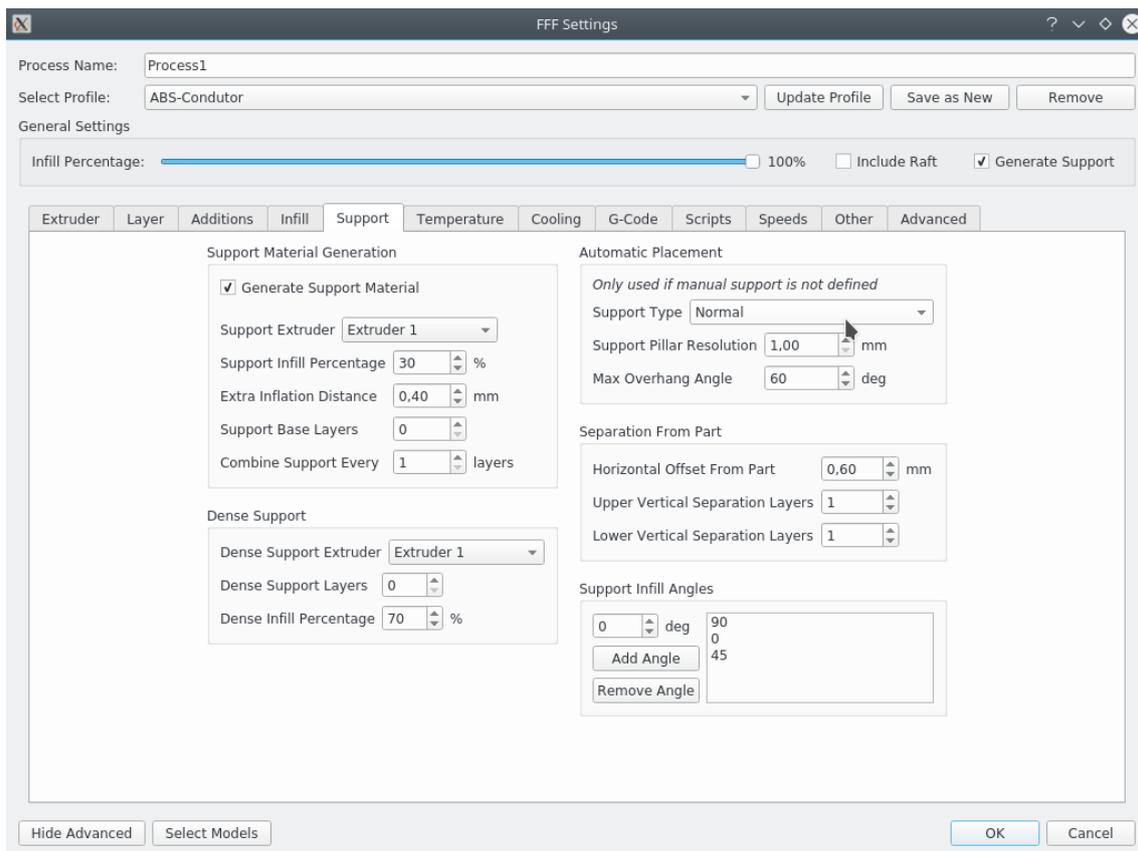


Figura A.5: Tela para configuração de possíveis suportes para impressão. Na impressão não foi necessário usar nenhum suporte, tanto para as placas quanto para os espaçadores. Portanto, a configuração presente é uma padrão.

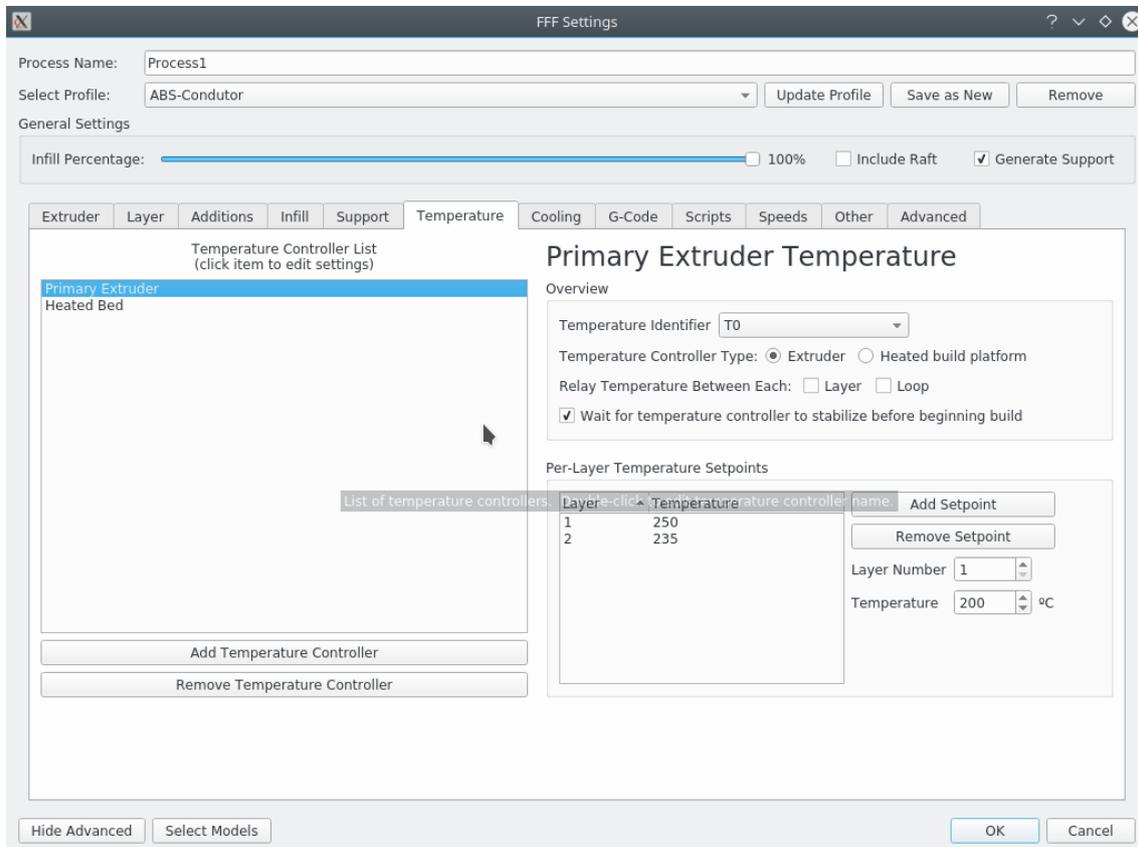


Figura A.6: Tela com as definições de temperatura para a extrusora e cama de vidro. Apesar de não selecionada, a temperatura da cama de vidro pode ser definida clicando em "Heated Bed", sendo ela definida em 115°C. A temperatura da extrusora é modificada da primeira camada para as restantes, com a primeira sendo de 250°C e as seguintes 235°C. A primeira camada é impressa com uma temperatura mais elevada para aumentar a adesão ao vidro, uma vez que a temperatura do vidro é inferior a do plástico, o que promove um encolhimento dele ao longo da impressão da primeira camada e aumentando a temperatura da primeira camada compensa esse efeito. As camadas seguintes são impressas numa temperatura menor, pois já entram em contato com o próprio ABS condutor, tendo ABS com ABS uma adesão maior que ABS com vidro. Essas temperaturas foram determinadas empiricamente, com 250°C a adesão ao vidro foi perfeita, não tendo nenhum ponto de descolamento e boa aderência com a camada superior. A temperatura de 235°C apresentou excelente adesão entre as camadas. Testes com 230°C para as camadas seguintes a primeira foram feitos, porém mostrou descolamento entre camadas.

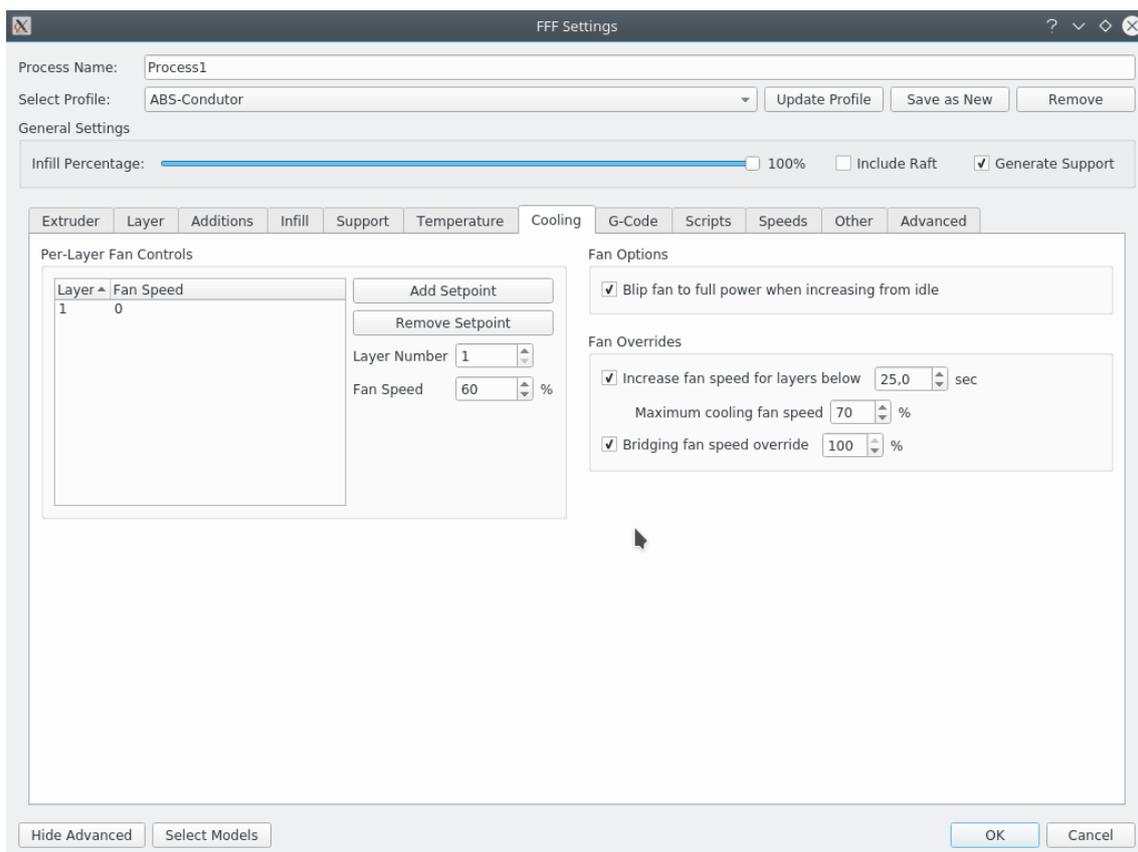


Figura A.7: Tela com opções de controle do resfriamento da extrusora. Não foi feita nenhuma modificação nessa seção, sendo as configurações presentes as padrão.

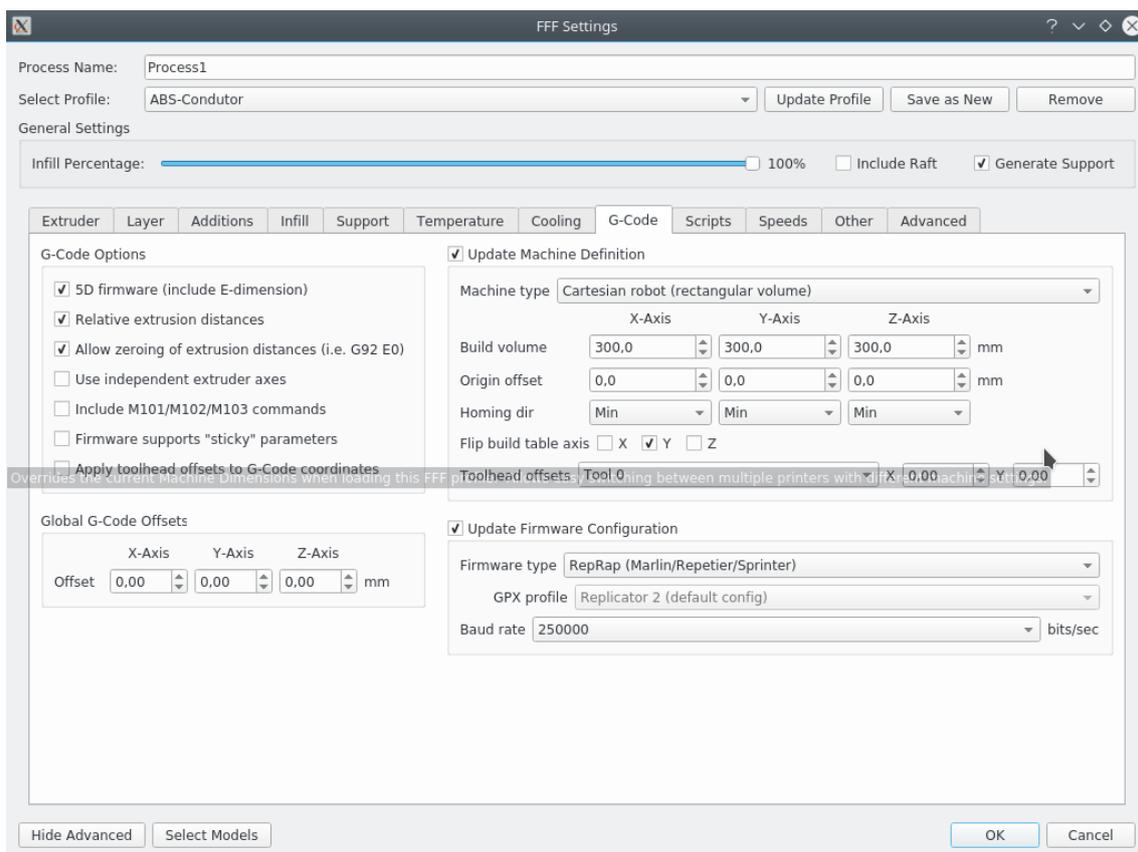


Figura A.8: Tela de especificação do G-Code. Não foi feita nenhuma modificação nessa seção, sendo as configurações presentes as padrão.

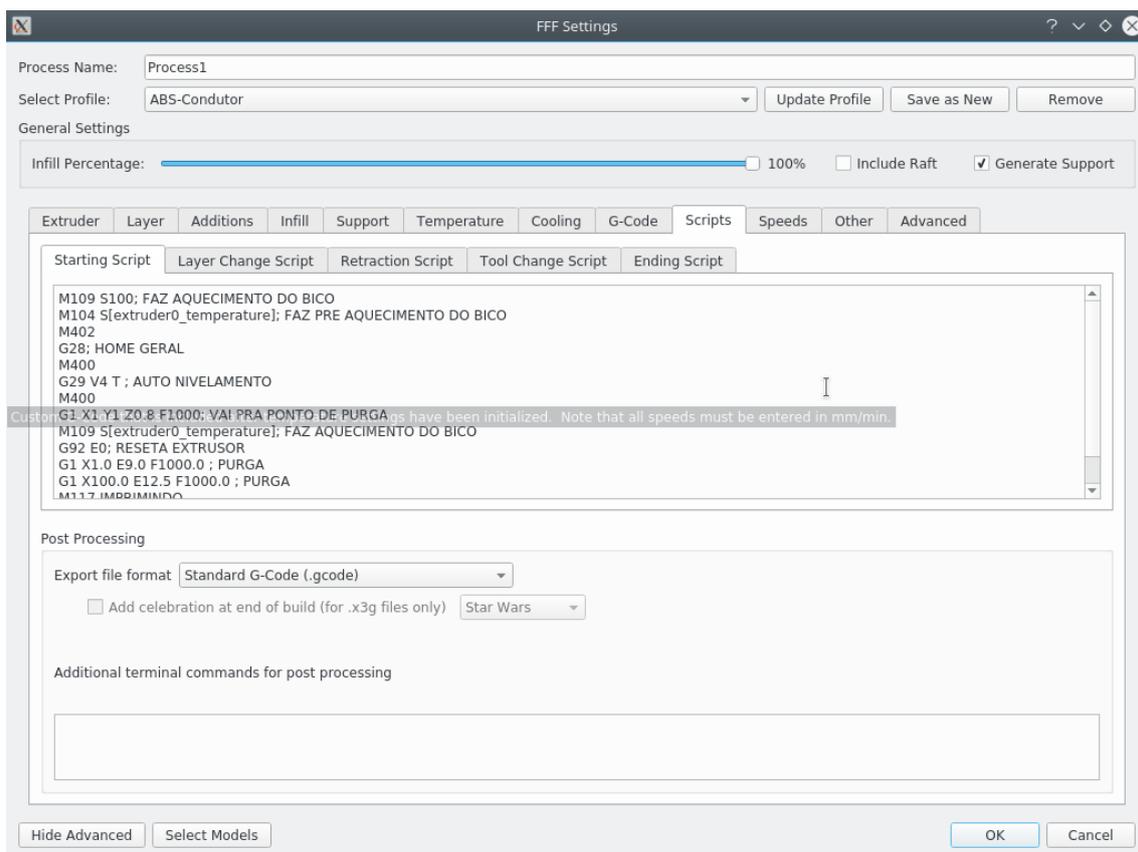


Figura A.9: Tela de especificação do *script* do G-Code. Não foi feita nenhuma modificação nessa seção, sendo as configurações presentes as padrão.

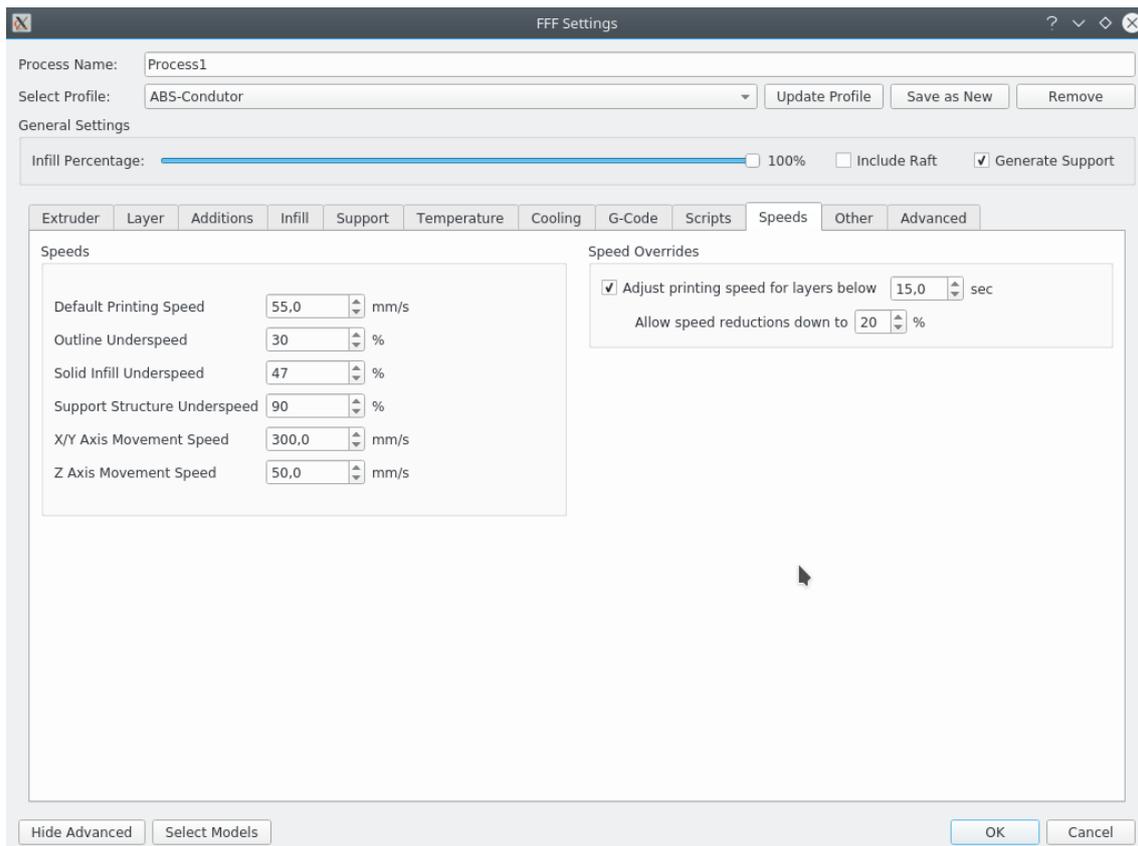


Figura A.10: Tela de definição das velocidades da impressão. Por ser um material de pior adesão, o ABS condutor requer uma velocidade de impressão menor que o ABS comum. Portanto, foi escolhido "Default Printing Speed" de 55 mm/s. As demais configurações foram as padrões.

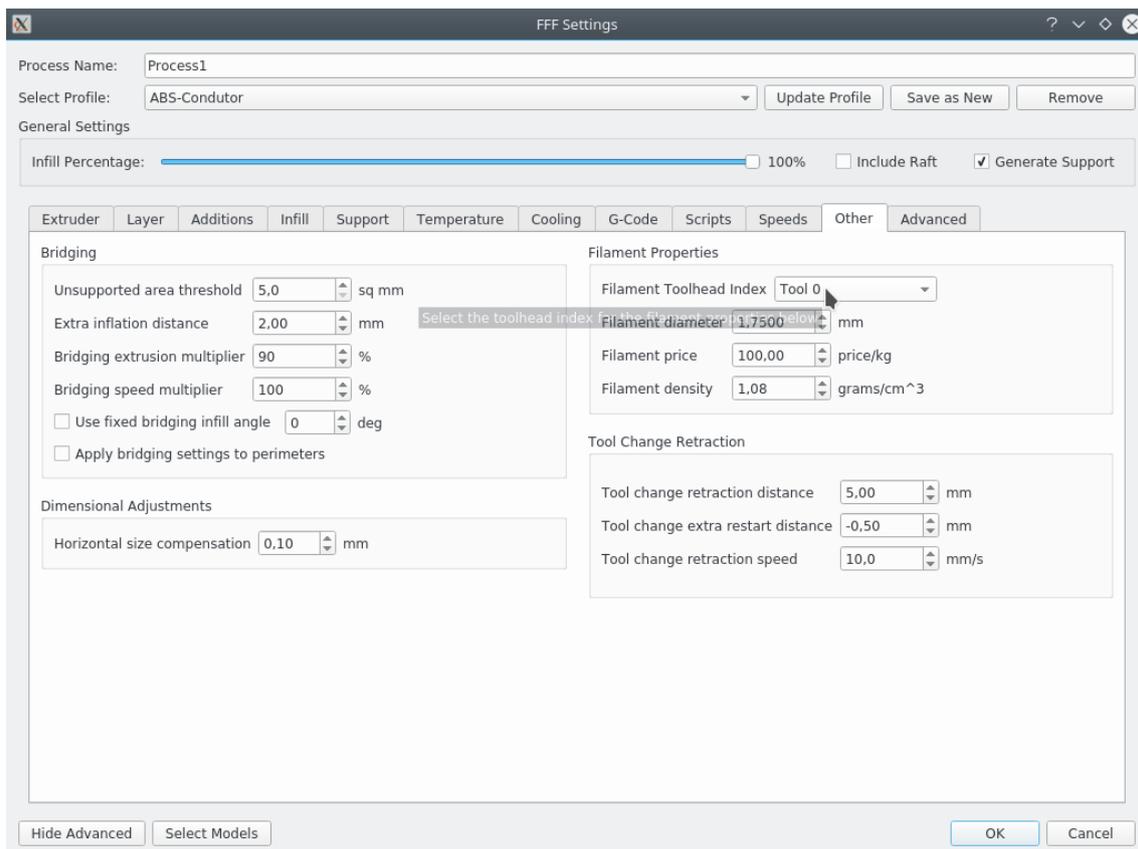


Figura A.11: Tela para configurações extras. Nessa tela a única opção que foi alterada nessa aba foi "Horizontal size compensation" que visa compensar a dilatação do ABS na horizontal e, assim, obter o tamanho mais próximo do real projetado no stl. Para impressão das placas foi escolhido 0,10 mm de compensação, uma vez que ao ver a prévia de impressão determinadas partes da impressão não seriam impressas, devido a resolução do bico da extrusora. Na impressão dos espaçadores foi usado -0,20 mm para se obter o tamanho exato para os parafusos de 1/8 de polegada.

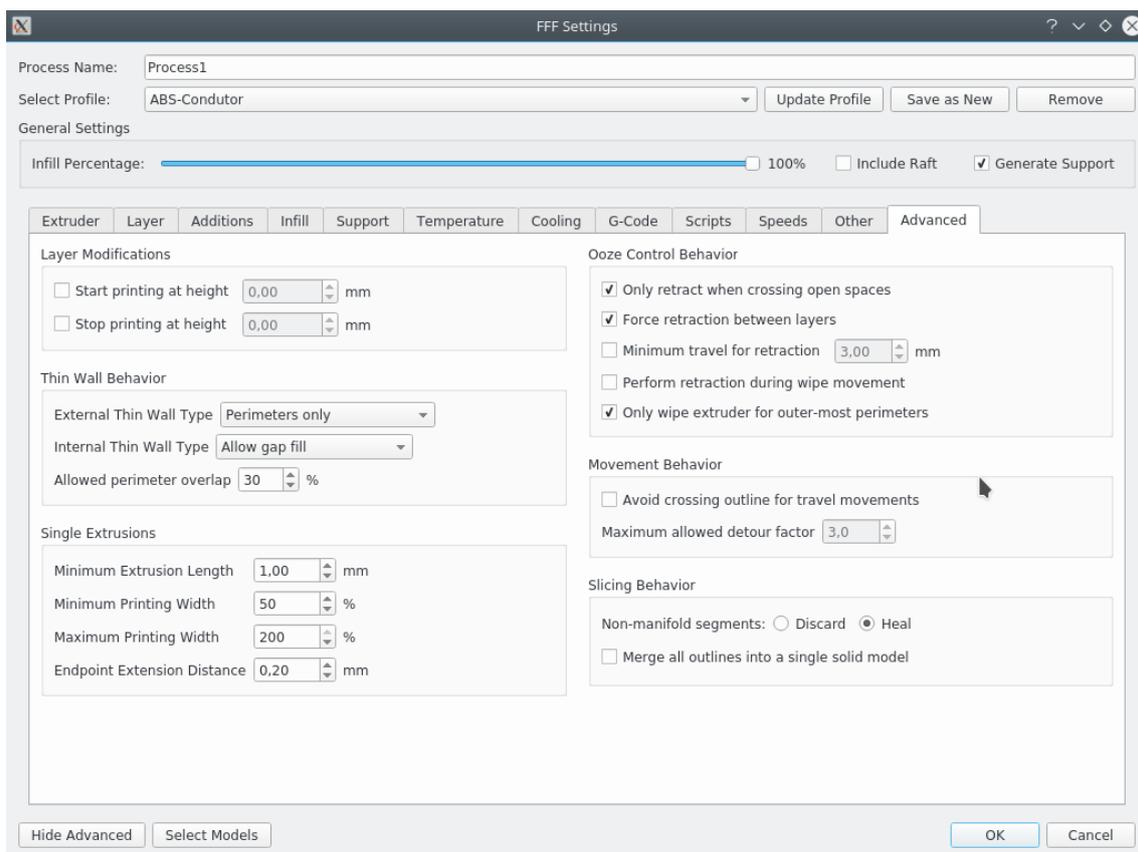


Figura A.12: Tela de opções avançadas. Não foi feita nenhuma modificação nessa seção, sendo as configurações presentes as padrão.

Apêndice B

Canton

O Canton é um simulador que calcula interação entre corpos carregados e os reordena no espaço de acordo com a carga e tensão. Os corpos são basicamente esferas ou conjunto de esferas organizados em alguma geometria. Para o caso de esferas, elas podem ser suspensas por fios para gerar a simulação da organização espacial ao interagirem. Os outros tipos de estruturas consistem em bolinhas organizadas em quadrados, com diferentes tipo de preenchimentos de bolinhas. Todas essas informações são inseridas através de um campo de texto à esquerda. A tela principal do programa pode ser vista na Fig. B.1, sendo todos as informações inseridas em centímetros.

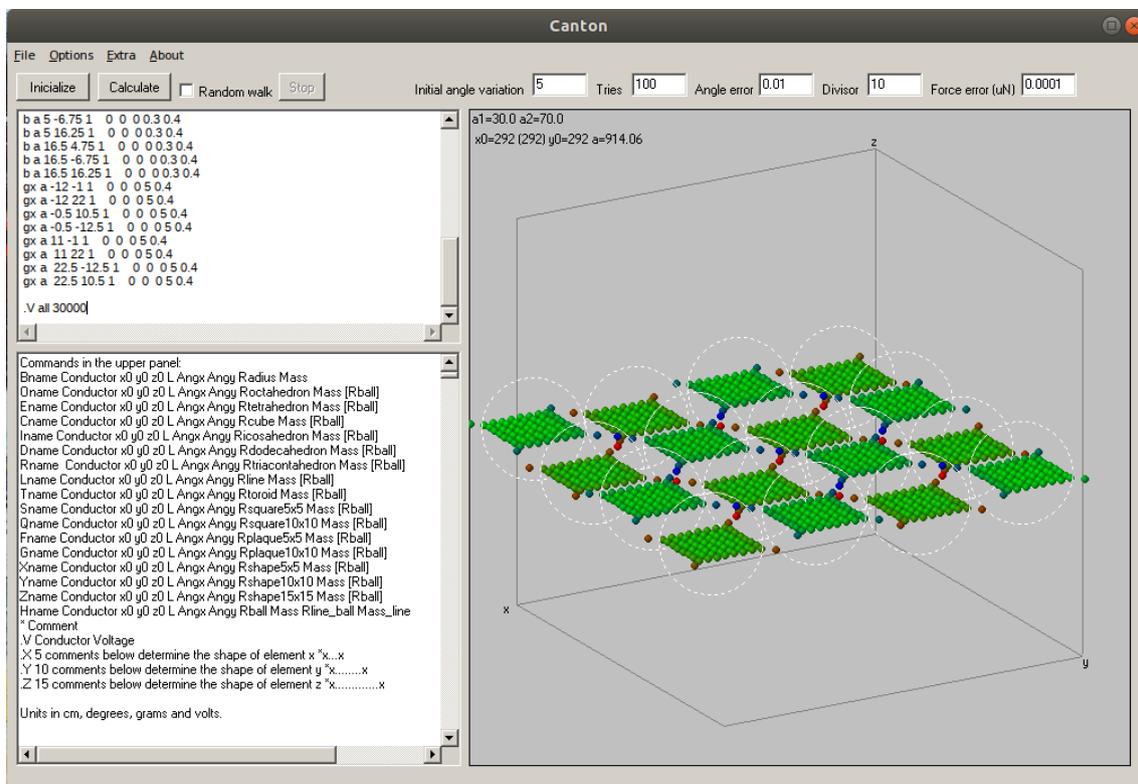


Figura B.1: Tela inicial do Canton.

Cada linha inserida é organizada da seguinte maneira:

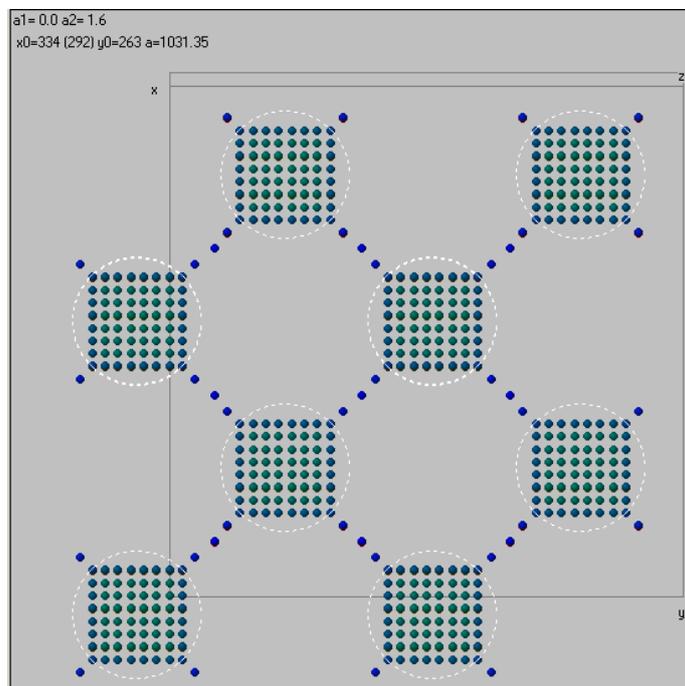
(elemento) (grupo do elemento) (ponto em x) (ponto em y) (ponto em z) (comprimento do fio) (ângulo em x) (ângulo em y) (raio da esfera) (massa da esfera)

O elemento é sinalizado por uma letra, de maneira que, mesmo escrevendo uma palavra, somente a primeira letra da palavra será considerada, conforme pode ser visto na Fig. B.1. Os elementos possíveis estão listados a seguir:

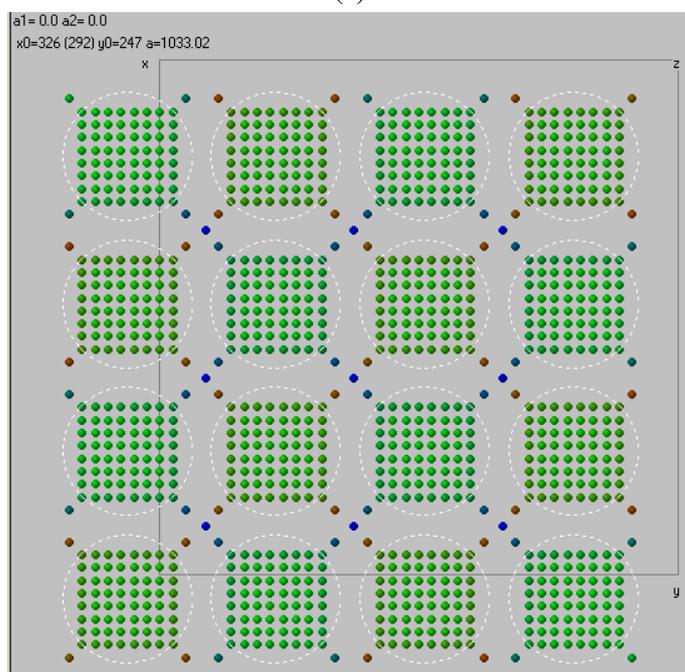
{	<i>b</i> ,	bolinha,
	<i>s</i> ,	quadrado com 5x5 bolinhas,
	<i>q</i> ,	quadrado com 10x10 bolinhas
	<i>f</i> ,	quadrado similar ao <i>s</i> , porém sem uma linha de borda
	<i>g</i> ,	quadrado similar ao <i>q</i> , porém sem uma linha de borda
	<i>y</i> ,	quadrado similar ao <i>q</i> , porém sem duas linhas de borda

Para elementos que não sejam bolinhas é interessante por como θ os valores do comprimento do fio, ângulo em x, ângulo em y. O raio da esfera para o caso de algum elemento diferente de "b" é metade do comprimento do lado do quadrado e a massa passa ser o raio das bolinhas que compõem o quadrado, que tem como sugestão o valor de $0,4$, devido a cálculos internos do software. O grupo é um nome qualquer para separar os elementos para o cálculo do software. Ao final deve-se colocar a tensão de referência em um dos grupos como o seguinte exemplo: $.V a 300$, no qual o grupo "a" tem $300 V$. As Figs. B.2 mostram como fica a exibição gráfica dos dados inseridos.

Os dados inseridos para fazer as imagens acima podem ser visto a seguir e após o cálculo, deve-se clicar com o botão direito na imagem e pedir para calcular as capacitâncias. Estes dados também são o resultado final dos testes para a dissertação. O interesse maior é o valor de capacitância entre os grupos e não deles para o infinito.



(a)



(b)

Figura B.2: A figura (a) apresenta a estrutura alinhada e a figura (b) desalinhada.

*Alinhado com ligacao

b a 6.5 6.5 1 0 0 0 0.4 0.4

b a 6.5 19.5 1 0 0 0 0.4 0.4

b a 6.5 32.5 1 0 0 0 0.4 0.4

b a 19.5 19.5 1 0 0 0 0.4 0.4

b a 19.5 6.5 1 0 0 0 0.4 0.4

b a 19.5 32.5 1 0 0 0 0.4 0.4

b a 32.5 32.5 1 0 0 0 0.4 0.4

b a 32.5 19.5 1 0 0 0 0.4 0.4

b a 32.5 6.5 1 0 0 0 0.4 0.4

gx a 0 0 1 0 0 0 5 0.4

gx a 0 26 1 0 0 0 5 0.4

gx a 26 0 1 0 0 0 5 0.4

gx a 26 26 1 0 0 0 5 0.4

gx a 13 13 1 0 0 0 5 0.4

gx a 39 13 1 0 0 0 5 0.4

gx a 13 39 1 0 0 0 5 0.4

gx a 39 39 1 0 0 0 5 0.4

b all 6.5 6.5 0 0 0 0 0.4 0.4

b all 6.5 19.5 0 0 0 0 0.4 0.4

b all 6.5 32.5 0 0 0 0 0.4 0.4

b all 19.5 19.5 0 0 0 0 0.4 0.4

b all 19.5 6.5 0 0 0 0 0.4 0.4

b all 19.5 32.5 0 0 0 0 0.4 0.4

b all 32.5 32.5 0 0 0 0 0.4 0.4

b all 32.5 19.5 0 0 0 0 0.4 0.4

b all 32.5 6.5 0 0 0 0 0.4 0.4

gx all 0 0 0 0 0 0 5 0.4

gx all 0 26 0 0 0 0 5 0.4

gx all 26 0 0 0 0 0 5 0.4

gx all 26 26 0 0 0 0 5 0.4

gx all 13 13 0 0 0 0 5 0.4

gx all 39 13 0 0 0 0 5 0.4

gx all 13 39 0 0 0 0 5 0.4

gx all 39 39 0 0 0 0 5 0.4

.V all 30000

Para o resultado de capacitância nessa configuração temos os seguintes valores, com

destaque para "C(a,all)" com 76 pF, aproximadamente:

Capacitances:

$$C(a,all)=76.0329061255229 \text{ pF}$$

$$C(a,infinity)=8.30145771831078 \text{ pF}$$

$$C(all,infinity)=8.30145771831078 \text{ pF}$$

*Desalinhado com ligacao quina

b a 6.5 6.5 1 0 0 0 0.4 0.4
b a 6.5 19.5 1 0 0 0 0.4 0.4
b a 6.5 32.5 1 0 0 0 0.4 0.4
b a 19.5 19.5 1 0 0 0 0.4 0.4
b a 19.5 6.5 1 0 0 0 0.4 0.4
b a 19.5 32.5 1 0 0 0 0.4 0.4
b a 32.5 32.5 1 0 0 0 0.4 0.4
b a 32.5 19.5 1 0 0 0 0.4 0.4
b a 32.5 6.5 1 0 0 0 0.4 0.4
gx a 0 0 1 0 0 0 5 0.4
gx a 0 26 1 0 0 0 5 0.4
gx a 26 0 1 0 0 0 5 0.4
gx a 26 26 1 0 0 0 5 0.4
gx a 13 13 1 0 0 0 5 0.4
gx a 39 13 1 0 0 0 5 0.4
gx a 13 39 1 0 0 0 5 0.4
gx a 39 39 1 0 0 0 5 0.4
b all 6.5 6.5 0 0 0 0 0.4 0.4
b all 6.5 19.5 0 0 0 0 0.4 0.4
b all 6.5 32.5 0 0 0 0 0.4 0.4
b all 19.5 19.5 0 0 0 0 0.4 0.4
b all 19.5 6.5 0 0 0 0 0.4 0.4
b all 19.5 32.5 0 0 0 0 0.4 0.4
b all 32.5 32.5 0 0 0 0 0.4 0.4
b all 32.5 19.5 0 0 0 0 0.4 0.4
b all 32.5 6.5 0 0 0 0 0.4 0.4
gx all 0 13 0 0 0 0 5 0.4
gx all 0 39 0 0 0 0 5 0.4
gx all 13 26 0 0 0 0 5 0.4
gx all 13 0 0 0 0 0 5 0.4
gx all 26 13 0 0 0 0 5 0.4
gx all 26 39 0 0 0 0 5 0.4
gx all 39 26 0 0 0 0 5 0.4
gx all 39 0 0 0 0 0 5 0.4
.V all 30000

Para o resultado de capacitância nessa configuração temos os seguintes valores, com

destaque para "C(a,all)" com $21,94 \text{ pF}$, aproximadamente:

Capacitances:

$$C(a,all)=21.9420944346527 \text{ pF}$$

$$C(a,infinity)=9.45079719544514 \text{ pF}$$

$$C(all,infinity)=9.45079719544514 \text{ pF}$$

As placas estão distanciados de 1 cm e com lados de 10 cm . Com esses valores a relação de capacitância fica aproximadamente $3,46$. O programa tem limitações quanto a dimensão, não podendo atingir os valores da estrutura proposta e escalando as dimensões não irá contemplar o efeito de borda para o caso estudado. Porém, serve para dar uma base de entendimento do efeito de borda e uma aproximação para o que pode ser esperado na fabricação, ao ser somado com as especulações feitas ao longo deste trabalho.