



**Desenvolvimento de Sistema de Atuação Linear Baseado em
Músculos Artificiais Poliméricos de Efeito Capacitivo**

Mariana Fonseca Bystronski - 0115184

*Departamento de Engenharia de Controle e Automação, PUC-Rio
22403-900, Rio de Janeiro - Brasil*

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a conclusão desse trabalho como um todo, incluindo ajudas técnicas específicas e idéias assim como incentivos que me fizeram superar dificuldades encontradas no final do prazo de entrega determinado. São elas: Professor Marco Antonio Meggiolaro (Departamento de Mecânica da PUC-Rio), Pedro Ferreira Blois, Oikos Solutions e a minha família.

Resumo

O termo músculo artificial, análogo ao músculo natural, descreve qualquer material atuador que é substancialmente independente da escala em desempenho, onde atuadores maiores podem ser considerados como uma coleção de microatuadores mecanicamente ligados.

Tal músculo artificial teria um desempenho geral que excederia em muito o de atuadores artificiais existentes e poderia ser usado em pequenos robôs, impressoras a jato de tinta, micro-bombas e uma larga faixa de outras micro-aplicações. O músculo artificial seria particularmente aplicável em micro-dispositivos para os quais tecnologias de atuação existentes são limitadas; mas já que ele é independente da escala, ele também pode ser usado em uma grande gama de macro aplicações incluindo robôs, auto-falantes e motores.

Os parâmetros de desempenho deformação, pressão, densidade de energia e tempo de resposta cresceram por fatores de 5-30 nos últimos dois anos. Progresso técnico continua no entendimento do design fundamental dos músculos artificiais nos níveis de material, fabricação e atuação^[1].

Esse trabalho visa à compreensão de alguns aspectos dos músculos artificiais baseados em polímeros dielétricos em relação a seu mecanismo de atuação como a relação entre o deslocamento linear de um corpo solidário a ele e a voltagem de entrada do sistema. Foi montado um sistema concebido com base na teoria da mesa xy capaz de fazer a atuação no polímero e medir o deslocamento resultante do corpo solidário.

Abstract

The term artificial muscle, analogous to natural muscle, describes any actuator material that is substantially scale invariant in performance, where larger actuators can be considered as a collection of mechanically linked microactuators.

Such an artificial muscle would have overall performance greatly exceeding that of existing artificial actuators and could be used for small robots, inkjet printers, micropumps, and a wide range of other microapplications. The artificial muscle would be particularly applicable to microdevices, for which existing actuator technologies are limited; but since it is scale invariant, it could also be used for a wide range of macro applications including robots, speakers, and motors.

Strain, pressure, energy density, and response time performance parameters have increased by factors of 5-30 in the last two years. Technical progress continues in understanding the fundamental design of artificial muscles at the material, fabrication, and actuator levels^[1].

This work intends to comprehend a few aspects of the artificial muscles based in dielectric polymers in relation to their actuation mechanism as the relation between the linear displacement of a solidary body and the input voltage of the system. A system was mounted based on the theories of the xy tables which was capable of performing the actuation on the polymer and measure the resulting displacement of the solidary body.

Índice

Agradecimentos.....	2
Resumo.....	3
Abstract.....	4
Índice.....	5
Índice de imagens e tabelas.....	6
1_ Introdução.....	7
2_ Tecnologias de Atuadores.....	10
3_ Projeto do Módulo Atuador.....	13
3.1_ Princípios Básicos do Atuador.....	13
3.2_ Elastômeros.....	14
3.3_ Características dos Elastômeros Poliméricos.....	15
3.4_ Pressão Efetiva.....	16
3.5_ Tensões de Maxwell.....	18
3.6_ Deformações Sofridas pelo Polímero.....	20
3.7_ Eletrodos.....	21
4_ Apresentação da Planta Mecânica.....	22
4.1_ O Sistema Massa-Mola-Amortecedor.....	22
4.2_ Massa do Sistema.....	23
4.3_ Constante de Mola do Sistema.....	26
4.4_ Constante de Amortecimento do Sistema.....	27
4.5_ Ponto de Equilíbrio em Regime Permanente.....	27
5_ Sistemas de Apoio ao Desenvolvimento do Projeto.....	30
5.1_ Mesa XY de Apoio.....	30
5.2_ Sistema Elétrico de Acionamento.....	31
6_ Procedimento Experimental.....	39
7_ Resultados e Discussões.....	41
7.1_ Método Gráfico de Determinação do Deslocamento.....	41
7.2_ Resultados do Experimento 1.....	45
7.3_ Resultados do Experimento 2.....	50
7.4_ Discussões Finais.....	55
8_ Conclusão e Trabalhos Futuros.....	56
Bibliografia.....	57
Apêndice.....	59

Índice de imagens e tabelas

Figura 1: Desenho SolidWorks do modelo da mesa xy.....	8
Figura 2: Princípio básico de funcionamento do atuador baseado em polímeros dielétricos.....	13
Figura 1: Forças eletrostáticas atuando no polímero.....	14
Figura 4: Esquema de área relevante para o cálculo da seção reta.....	19
Figura 5: Esquema do sistema massa-mola-amortecedor que representa a planta.....	22
Figura 6: Perfil de velocidade no conjunto polímero-graxa condutora.....	23
Figura 7: Gráfico da relação entre a massa equivalente e a razão entre os raios do disco e interno do anel.....	25
Figura 8: Tabela das massas dos componentes do sistema.....	25
Figura 9: Alteração do ponto de equilíbrio do sistema com a voltagem.....	27
Figura 10: Tabela de componentes que compõem a mesa xy de pré-tensionamento do polímero.....	30
Figura 11: Foto da mesa xy de apoio.....	31
Figura 12: Fonte 30V DC utilizada.....	32
Figura 13: Esquemático do circuito conversor DC-DC implementado.....	33
Figura 14: Circuito gerador de onda quadrada montado na protoboard.....	34
Figura 15: Transistor BU508D separado do circuito oscilador.....	34
Figura 16: Divisor de tensão utilizado.....	35
Figura 17: Conversor DC-DC implementado.....	35
Figura 18: Esquemático do flyback HR7839 da HR DIEMEN.....	36
Figura 19: Esquemático para descobrir o terra do enrolamento secundário.....	37
Figura 20: Esquemático para descobrir os pinos do enrolamento primário.....	37
Figura 21: Esquemático para descobrir a polaridade do enrolamento primário.....	38
Figura 22: Esquema dos pinos do flyback.....	38
Figura 23: Flyback OV2076/M utilizado no projeto.....	38
Figura 24: Polímero sendo pré-tensionado na mesa xy de apoio.....	39
Figura 25: Método para calcular o diâmetro dos anéis de garulite em pixels no Microsoft Paint.....	41
Figura 26: Cálculo da distância x através do método gráfico para 0 V.....	42
Figura 27: Cálculo da distância y através do método gráfico para 0 V.....	42
Figura 28: Cálculo da distância x através do método gráfico para 500 V.....	43
Figura 29: Cálculo da distância y através do método gráfico para 500 V.....	44
Figura 30: Tabela de tensão de entrada x deslocamento do disco.....	47
Figura 31: Gráfico de tensão x deslocamento na direção x da mesa xy.....	48
Figura 32: Gráfico de tensão x deslocamento na direção y da mesa xy.....	48
Figura 33: Tabela dos deslocamentos teóricos nas direções x e y.....	50
Figura 34: Tabela de tensão de entrada x deslocamento do disco.....	52
Figura 35: Gráfico de tensão x deslocamento na direção x da mesa xy.....	53
Figura 36: Gráfico de tensão x deslocamento na direção y da mesa xy.....	53
Figura 37: Tabela dos deslocamentos teóricos nas direções x e y.....	54

1_ Introdução

Em muitos sistemas de pequena escala, tais como micro-robôs e outros micro-dispositivos portáteis, a necessidade de atuadores melhores é particularmente crítica porque atuadores eletromagnéticos convencionais geralmente apresentam eficiência ruim em escalas pequenas. Tem havido muito interesse recente em polímeros eletroativos como materiais para atuadores. Em geral, polímeros são atraentes como materiais para atuadores porque são leves, fáceis de fabricar em vários formatos e baratos^[2].

Em particular, pesquisadores no campo de biomimética (campo de estudo em que mecanismos robóticos são baseados em modelos inspirados na biologia) crêem ser possível que esses materiais possam ser aplicados para imitar os movimentos dos animais, insetos e até mesmo partes do corpo humano^[3], criando um exoesqueleto capaz de ajudar pessoas deficientes.

Existem duas grandes categorias de polímeros eletroativos (PEAs) dependendo de seu modo de mecanismo de ativação, elas são as categorias eletrônica e iônica. Campos elétricos ou forças de Coulomb geralmente ativam os PEAs eletrônicos enquanto que os iônicos são ativados pela mobilidade ou difusão de íons^[3].

Estudaremos atuadores de polímeros eletroativos eletrônicos que usam a deformação de elastômeros dielétricos. O desempenho do atuador com esses materiais é similar de muitas maneiras ao desempenho do músculo natural. Por esta razão, esses atuadores podem ser vistos como um tipo de músculo artificial.

Os elastômeros dielétricos não são a melhor das tecnologias em nenhuma medida de desempenho isolada. No entanto, seu desempenho geral e em particular sua alta densidade de energia específica e alta eficiência encorajam o bastante para se sugerir que eles sejam usados competitivamente em atuadores com eficiência de energia que sejam leves e compactos, em relação a tecnologias comuns de atuação como as eletromagnéticas e as piezelétricas^[2].

Este trabalho visa o desenvolvimento de uma mesa xy funcional, em pequena escala, sem qualquer componente metálico, fato inédito na engenharia de equipamentos para microindústria. O movimento da “peça”, representada por um disco central de garulite, desta planta é gerado através de um atuador baseado em um polímero

dielétrico. Neste tipo de atuador, um filme de polímero dielétrico é revestido dos dois lados por um eletrodo flexível, uma alta voltagem é aplicada, e a atração eletrostática entre os eletrodos causa uma diminuição da espessura e aumento de área do filme, gerando movimentos lineares satisfatórios.

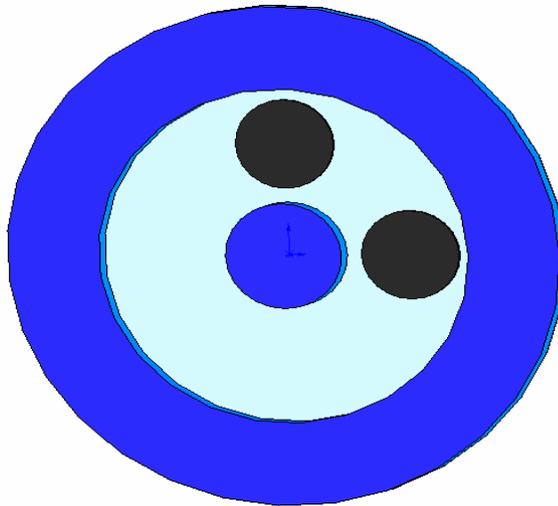


Figura 1: Desenho SolidWorks do modelo da mesa xy

A estrutura do atuador proposta neste trabalho difere um pouco dos atuadores poliméricos tradicionais, tendo em vista que serão utilizados dois frames (anéis) e dois discos centrais ambos de garulite em uma geometria circular com o filme de polímero presente entre eles. Assim tem-se a mesma estrutura em ambos os lados do polímero. Em geral, esses atuadores operam em relativa alta voltagem (tipicamente 100-4.000 V, dependendo da espessura e das propriedades do material)^[2]. A tensão máxima de excitação aceita pela configuração é de 3.500 Volts, o que está dentro da faixa de operação padrão deste tipo de atuador. Pretende-se com isso estudar a possibilidade de se obter um futuro equipamento não metálico, que não sofreria perdas elétricas, para ajudar na fabricação de micro-dispositivos como os MEMS (Micro-Eleto-Mechanical-Systems, ou seja, Sistemas Micro Eletromecânicos).

O objetivo deste trabalho é desenvolver tal sistema de atuação baseado em geometria circular e testar uma nova abordagem para os atuadores poliméricos. Pretende-se atingir deslocamentos satisfatórios do disco central mantendo-se as características principais do atuador que são a simplicidade, a leveza e a baixa excitação. Serão apresentados o *design* e o desempenho desse atuador em testes simples

que demonstram a conveniência desses polímeros dielétricos como atuadores a serem usados em pequenas escalas.

No capítulo 2 serão apresentadas as tecnologias de atuação existentes que são utilizadas como músculos artificiais mostrando os avanços atingidos nessa área do conhecimento em engenharia de materiais com ênfase no elastômeros baseados em polímeros dielétricos.

No capítulo 3 é descrito o projeto do atuador polimérico de efeito capacitivo incluindo os princípios básicos, características e elementos constitutivos.

No capítulo 4 é descrita a modelagem do sistema proposto através de um sistema massa-mola-amortecedor incluindo o cálculo dos componentes da massa, da constante de mola e da constante de amortecimento.

No capítulo 5 são apresentados os sistemas de apoio que foram construídos para auxiliar na execução deste trabalho. Esses sistemas são: uma mesa xy metálica para pré-tensionar o polímero em ambas as direções x e y e um circuito eletrônico capaz de excitar o polímero.

No capítulo 6 é descrito passo-a-passo o procedimento experimental que foi realizado no decorrer deste experimento.

No capítulo 7 é descrito o método gráfico de medição do deslocamento e são apresentados os resultados finais e suas discussões.

No capítulo 8, as conclusões oriundas deste trabalho são apresentadas, assim como opções de trabalhos futuros.

2_ Tecnologia de Atuadores

Dentre os principais atuadores de alta relação entre capacidade de carga e peso próprio está o de liga de memória de forma, como o Nitinol, que responde à temperatura através da mudança de sua microestrutura cristalina^[4]. Na sua forma mais simples, as ligas de memória de forma se encontram como fios que se contraem em resposta à passagem de uma corrente que aquece o material. A frequência de resposta do material depende da resposta térmica do mesmo e com menos de 5% de deformação alcançam tensões de mais de 200MPa^[4].

Outros tipos de atuadores não-convencionais são os piezoelétricos, que podem ser à base de cerâmica ou poliméricos, e mudam sua forma na presença de um campo elétrico^[4]. Um modelo simplificado do efeito piezoelétrico é considerar os ânions e cátions formando um entrelaçado cristalino com molas. Sob o efeito de um campo elétrico, os ânions e cátions tendem a se mover em direções opostas, causando assim uma deformação na rede cristalina. Atuadores piezoelétricos possuem rápidas taxas de respostas, alcançando pressões acima de 100Mpa apesar da pequena deformação de no máximo 1%^[4]. Mecanismos flexíveis têm sido idealizados para amplificar os movimentos de atuadores de baixa deformação.

Polímeros eletroativos (EAPs, sigla em inglês) formam um grupo extenso de atuadores à base de polímeros que produzem uma resposta mecânica ocasionada por um estímulo elétrico. Polímeros condutores têm seu volume alterado através da inserção e remoção de íons. Isso ocorre como resultado de reações de oxidação e redução que podem ser controladas elétrica ou quimicamente. O polímero tem que estar em contato com um eletrólito, geralmente líquido. Isso frequentemente limita o leque de aplicações dos polímeros condutores, mesmo considerando o fato de alcançarem deformações maiores que 10% e pressões acima de 450MPa^[4]. Existem também polímeros em forma de gel que incham quando submetidos a uma voltagem.

A tecnologia de atuadores abordada nesse trabalho será a de polímeros dielétricos (elastômeros). Um filme do polímero dielétrico é revestido dos dois lados por um eletrodo flexível (graxa condutora). Quando uma voltagem é aplicada nos eletrodos, a atração eletrostática entre os mesmo causa uma diminuição da espessura do filme, proporcionando uma expansão da área devido à conservação do volume. Essa expansão pode ser usada como um sistema mecânico de atuação.

Estudos com polímeros dielétricos são feitos desde 1992 pelos EUA^[4]. Nos últimos anos uma melhora significativa tem sido atingida na identificação de novos materiais elásticos.

O princípio básico de funcionamento é muito bem entendido e tem sido verificado experimentalmente. A resposta do atuador é precisamente conhecida para pequenas deformações, no entanto, devido à não-linearidade das propriedades elásticas do polímero, grandes deformações não são bem previstas pelos modelos. Experimentos sistemáticos têm sido feitos nos atuadores para medir a força isométrica e a deformação sob diferentes estiramentos nos atuadores elásticos tanto de acrílico como de silicone. A caracterização das propriedades elétrica e mecânica dos polímeros continua sendo feita para uma melhor utilização da tecnologia^[5].

Diferentes configurações geométricas convertem a expansão de área do filme em deslocamentos lineares. Como exemplo, pode-se confinar o filme entre duas molduras circulares fixas. Nesse caso, a direção de movimento do elemento central móvel que é atuado coincide com a expansão do filme.

Geometrias planas de atuadores baseados em polímeros dielétricos têm sido propostas para impulsionar robôs com movimentos tipo cobra e outros com pernas tipo inseto. Tendo em vista que os atuadores só funcionam previamente tensionados, alguma força externa de restauração é necessária, a qual pode ser conseguida de diversas maneiras. No caso do manipulador tipo cobra, cada grau de liberdade é controlado por um par de atuadores antagônicos. Para o robô com pernas de insetos, uma mola de retorno é utilizada^[4]. Essa combinação de atuadores e mecanismos antagônicos com tensões constantes tem sido proposta a fim de aumentar cada vez mais o espaço de atuação desses dispositivos.

Entretanto, existem bons motivos que justificam a escolha do atuador de polímero dielétrico para esta aplicação. Comparando o mesmo com a liga de memória de forma e polímeros condutores, polímeros dielétricos conseguem maiores deformações (acima de 380% já foram relatados^[4]). As propriedades de força e deformação permitem a implementação de um *design* mais simples e direto para o atuador sem a necessidade de amplificar o movimento. Eles têm também demonstrado alto desempenho em termos de densidade de energia e velocidade de resposta e podem ser feitos de materiais comuns e baratos^[4].

No próximo capítulo será descrito o desenvolvimento de módulos baseados nesses atuadores. Sob as condições ideais do laboratório, os atuadores de polímero dielétrico alcançaram densidades de energia muito altas, excedendo às de tecnologias convencionais como eletroímãs. O desempenho desses atuadores, quando aplicados em dispositivos práticos, mostrou-se menor do que quando utilizado sob condições ideais. Uma pesquisa foi feita sobre a melhor forma de implementar esses atuadores em sistemas reais. Nesse contexto, a implementação desses atuadores consiste na maneira em que os mesmos serão integrados aos sistemas. Por exemplo, um motor elétrico interage com um mecanismo principalmente através torque e deslocamentos rotacionais transmitidos pelo eixo. No caso dos atuadores de polímero, a interação com o sistema envolve muitas variáveis, sendo, portanto mais complexo^[6].

3_ Projeto do Módulo Atuador

Esse capítulo apresenta o desenvolvimento de um módulo atuador que se comporta como um mecanismo de atuação orientada. A física que governa o funcionamento de um atuador de polímero dielétrico será brevemente revista e então aplicada a um atuador linear.

3.1_ Princípios Básicos do Atuador

A **figura 2** mostra o princípio de operação dos atuadores baseados em polímeros eletroestrictivos mostrando o efeito da voltagem aplicada no elemento mais básico de um atuador deste tipo, um filme de polímero elastomérico relativamente maleável é colocado entre dois eletrodos deformáveis. Quando uma diferença de voltagem é aplicada entre os eletrodos, o polímero é comprimido em espessura e expandido em área pelas forças eletrostáticas, fornecendo um mecanismo de atuação^[7].

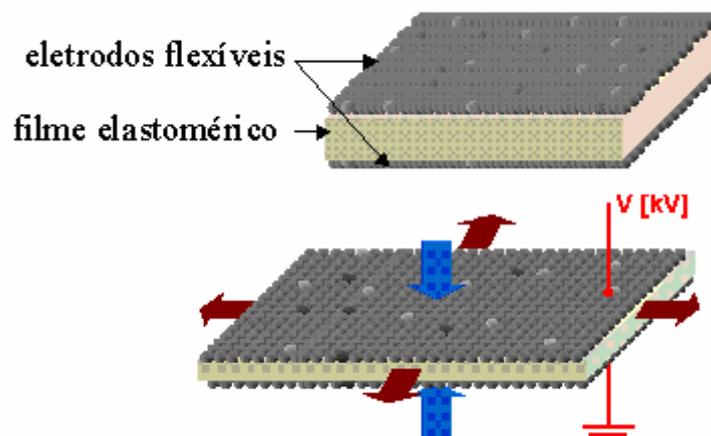


Figura 2: Princípio básico de funcionamento do atuador baseado em polímeros dielétricos

O termo eletroestritivo é usado aqui no sentido genérico de descrever a resposta de tensão e deformação de um material a um campo elétrico. A eletrostrição dos polímeros dielétricos com eletrodos deformáveis resulta das forças eletrostáticas geradas entre as cargas livres nos eletrodos e é proporcional ao quadrado do campo elétrico. Já que essa propriedade resulta de forças eletrostáticas externas, qualquer material dielétrico elastomérico a exibirá teoricamente^[7].

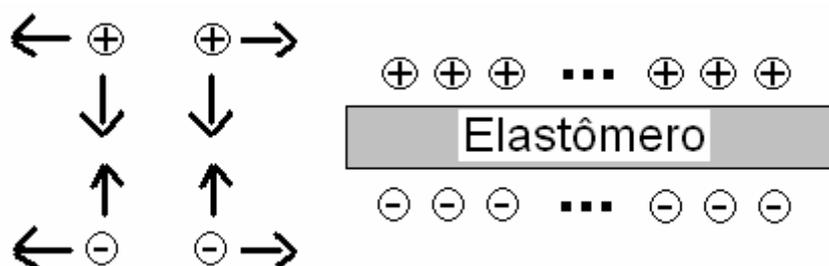


Figura 2: Forças eletrostáticas atuando no polímero

Talvez a equação de desempenho mais básica para os polímeros eletroestrictivos relaciona a voltagem aplicada e as propriedades do filme à pressão eletrostática gerada. A primeira vista, podemos ser tentados a usar equações bem conhecidas para força em um capacitor de placas paralelas. No entanto, diferente deste capacitor, os eletrodos em um atuador polimérico são deformáveis. Isso significa que energia elétrica adicional é convertida em energia mecânica em um modo estendido como resultado da repulsão que ocorre entre cargas iguais nos eletrodos individuais^[7].

3.2_ Elastômeros

A componente chave do atuador proposto é o elastômero (classe de polímero que possui uma grande elasticidade). Os polímeros por sua vez são geralmente obtidos formando-se gigantescas cadeias moleculares concatenando-se moléculas orgânicas repetidamente. As ligações da cadeia são covalentes, e a mesma é mantida junta por entrelaçamentos e ligações secundárias mais fracas. Os elastômeros têm cadeias altamente espiraladas e parcialmente ligadas entre si, que permitem grandes deformações elásticas. Quando uma força é aplicada na maioria dos polímeros, deformações tanto plásticas quanto elásticas ocorrem. As deformações elásticas se devem à distensão das ligações covalentes e podem, portanto, ser recuperadas. Já as deformações plásticas são causadas pelo deslizamento e rompimento das cadeias do polímero e não podem ser recuperadas. Esse fluxo de cadeias entre si é viscoso, logo dependente do tempo. Como consequência dessa propriedade, uma carga constantemente aplicada ao polímero causa uma contínua distensão do mesmo, com isso

o material permanece esticado, diminuindo assim a força do elastômero. Essa propriedade depende muito da temperatura e varia muito entre os polímeros.

Uma grande variedade de elastômeros tem sido usada como atuadores dielétricos, incluindo polímeros acrílicos, silicone e poliuretano. Neste trabalho, polímeros de acrílico foram utilizados, pois mostraram uma boa resposta de deformação e altas densidades de energia^[8].

O polímero usado é o VHBTM 4905 (*Very High Bond*) fabricado pela 3MTM. É vendido como uma fita adesiva e está disponível na forma de um rolo de filme com uma espessura de 0,5 mm. Ela é transparente e muito elástica, sendo possível esticá-la cinco vezes o seu comprimento nas duas direções planas, sem rasgá-la. É uma fita muito aderente, que de certa forma facilita muito a montagem do atuador uma vez que ela é facilmente presa a outros componentes sem a necessidade de um adesivo adicional. No entanto, um contato acidental dela com ela própria causa uma união tão forte que não se consegue separar sem destruí-la^[6]. Esse material tem demonstrado a maior densidade de energia de deformação quando usado como atuador dielétrico^[8]. A maior deformação atingida registrada foi de 240%, mas o acrílico apresenta uma grande perda viscoelástica. As perdas viscosas limitam a eficiência a partir do momento em que parte da energia é convertida em calor. O comportamento viscoso limita também a velocidade de resposta, logo quando usado em alta velocidade como atuador o material mostra uma grande histerese. A viscosidade pode ser útil para minimizar as vibrações do manipulador^[6].

3.3_ Características dos Elastômeros Poliméricos

A elasticidade do elastômero serve como uma mola em um atuador eletrostático. Assim, não é surpreendente que uma instabilidade eletro-mecânica pode ocorrer sob certas condições. Essa instabilidade ocorre porque depois de certa deformação, a pressão do campo elétrico com uma voltagem aplicada constante aumenta mais rápido do que a pressão de restauração devido à elasticidade do material, então o filme começa a se enrugam em ondas na direção da largura da amostra. A máxima voltagem aplicada é determinada experimentalmente como a voltagem em que o filme começa a se enrugam^[7].

O tempo de resposta da pressão de materiais poliméricos eletroestrutivos foi medido como menor que 4 ms através do uso de uma célula de carga; no entanto, esta medida foi limitada pela eletrônica usada^[7].

Atuadores de elastômeros dielétricos possuem uma característica notável que pode ser considerada uma desvantagem em certas aplicações. Em geral, esses atuadores operam em relativa alta voltagem. Essa alta voltagem faz com que a eletrônica do atuador se torne mais complexa. Mas há aplicações em que a alta voltagem pode ser uma vantagem, já que ela permite uma transmissão mais eficiente da energia elétrica através de fios e conectores imperfeitos^[2].

Eficiência de energia, um importante parâmetro para certas aplicações, é estimado em 80-90% em faixas de atuação de 1-20 Hz. Em faixas de atuação mais altas, a perda por vazamento de corrente por ciclo é reduzida, assim aumentando a eficiência^[7].

A eficiência estimada assume recuperação da carga. Mesmo sem recuperação da carga uma eficiência relativamente boa (10-50%) deve ser possível baseada nas grandes deformações observadas, pois quando a deformação aumenta, cargas opostas ficam mais próximas e cargas iguais se afastam. Por isso, uma grande porção da energia elétrica é convertida em trabalho mecânico^[7].

3.4_ Pressão Efetiva

A rigidez dielétrica é o campo elétrico máximo (razão entre a voltagem e a espessura) que um dielétrico pode suportar sem ser partido. Se essa rigidez for excedida, elétrons migram de um eletrodo para o outro em cascata através do material, causando um curto-circuito e inutilizando assim o polímero. Tendo em vista que a pressão é proporcional ao quadrado da rigidez dielétrica, pode-se dizer que a mesma é crucial para o desempenho do atuador. A rigidez dielétrica é uma propriedade do material, e para os polímeros ela varia significativamente com a pré-distensão do material^[8]. Essa pré-distensão pode aumentar a máxima pressão efetiva atingida por um fator de mais de duas ordens de grandeza.

A pressão efetiva p do atuador é definida como a mudança na energia eletrostática por unidade de área por unidade de deslocamento do filme na direção da espessura. Ela é dada pela seguinte equação^[7]:

$$p = \left(\frac{1}{A} \right) \frac{dU}{dz} \quad (1)$$

onde A é a área, U é a energia eletrostática e z é a espessura. Essa pressão efetiva é a força de atuação por unidade de área na direção da espessura.

Restrições mecânicas são relacionadas à incompressibilidade volumétrica do filme. Filmes elastoméricos podem ser facilmente achatados ou esticados, mas somente de forma que deixe seu volume constante. Em pequenas deformações, esta característica é descrita matematicamente assumindo-se um coeficiente de Poisson de 0,5. Se z é a espessura do filme e A é sua área, então as restrições mecânicas no caso geral são expressas por^[7]:

$$Az = \text{constante} \quad (2)$$

A energia eletrostática armazenada U de um filme com cargas opostas Q e $-Q$ colocadas em sua superfície pode ser escrita como^[7]:

$$U = \frac{0,5Q^2}{C} = \frac{0,5Q^2 z}{\varepsilon_0 \varepsilon A} \quad (3)$$

onde $C = \varepsilon_0 \varepsilon A / z$ é a capacitância, z é a espessura do filme, $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ é a permissividade no vácuo e ε é a constante dielétrica relativa (que se pensa ser relacionada com a densidade do polímero e, por isso não varia significativamente). A mudança na energia eletrostática armazenada dU para um mudança dz em espessura e dA em área pode ser derivada da equação (3) como sendo^[7]:

$$dU = \left(\frac{0,5Q^2}{\varepsilon_0 \varepsilon A} \right) dz - \left(\frac{0,5Q^2 z}{\varepsilon_0 \varepsilon A} \right) \frac{dA}{A} \quad (4)$$

Aplicando a restrição da equação (2), encontramos que $\frac{dA}{A} = -\frac{dz}{z}$; então podemos reescrever a equação (4) como^[7]:

$$dU = \left(\frac{Q^2}{\varepsilon_0 \varepsilon A} \right) dz \quad (5)$$

Utilizando se a equação (1) tem-se que a pressão efetiva é dada por^[7]:

$$p = \frac{Q^2}{\varepsilon_0 \varepsilon A^2} \quad (6)$$

Finalmente, sabendo-se que o campo elétrico é dado por $E = Q/\varepsilon_0 \varepsilon A$, é possível expressar a pressão efetiva como^[7]:

$$p = \varepsilon_0 \varepsilon E^2 \quad (7)$$

A pressão efetiva na equação (7) é exatamente o dobro da pressão em um capacitor de placas paralelas. A diferença é explicada pela presença do segundo termo na equação (4), o termo dA . A pressão maior é devida à deformação dos eletrodos que permite que ambas as forças de atração entre os eletrodos opostamente carregados e as forças que tendem a separar as cargas em cada eletrodo se unam na pressão efetiva normal ao plano do filme^[7].

De acordo com a equação (7), a máxima pressão independe da espessura do filme. Um filme mais grosso pode suportar maiores voltagens, mas a razão entre a voltagem e espessura permanece a mesma.

3.5_ Tensões de Maxwell

Uma tensão é induzida no material quando o capacitor é carregado. Essa tensão de Maxwell é de natureza puramente eletrostática. Segundo os textos padrões, a diferença entre as tensões normais $\sigma_{xx} - \sigma_{zz}$ e $\sigma_{yy} - \sigma_{zz}$ é igual à força por área necessária para manter a deformação antes da aplicação do campo elétrico^[9]:

$$\sigma_{xx} - \sigma_{zz} = \sigma_{yy} - \sigma_{zz} = p = \epsilon_0 \epsilon E^2 \quad (1)$$

O filme de polímero é esticado α_x vezes na direção da largura e α_y vezes na direção do comprimento, resultando em um filme com uma espessura final $z = z_0 / (\alpha_x \alpha_y)$. O comprimento final do atuador é $y = \alpha_y y_0$ e a largura final é $x = \alpha_x x_0$. O campo elétrico é calculado através das razões de expansão como $E = V \times (\alpha_x \alpha_y) / z_0$ [9]. A relação entre a voltagem aplicada (V) e a força exercida pelo polímero (F_x ou F_y) pode ser obtida da equação $p = F/A$. Fazendo-se uma aproximação para tornar a área da seção reta unidimensional, a área considerada para o cálculo das forças nas direções x e y é dada pela faixa de largura d (diâmetro do disco central de garulite) que se estende na linha do disco central como mostrado na figura abaixo. Logo, $A_x = y \times z = d \alpha_y \times \frac{z_0}{\alpha_x \alpha_y}$ e $A_y = x \times z = d \alpha_x \times \frac{z_0}{\alpha_x \alpha_y}$.

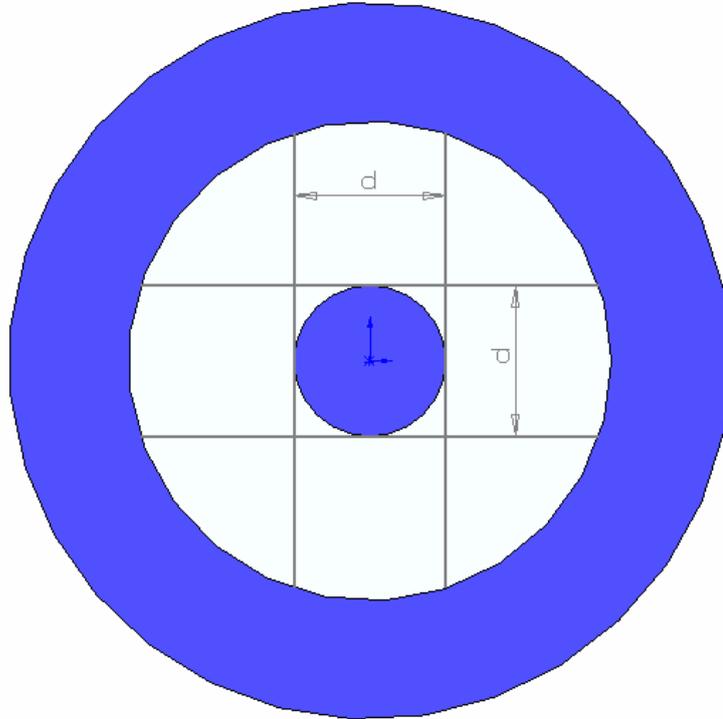


Figura 4: Esquema de área relevante para o cálculo da seção reta

Assim, podemos derivar que:

$$\begin{aligned}
 F_x &= p \times A = \varepsilon \varepsilon_0 E^2 \times A_x = \varepsilon \varepsilon_0 \times \left(\frac{V \times (\alpha_x \alpha_y)}{z_0} \right)^2 \times d\alpha_y \times \frac{z_0}{\alpha_x \alpha_y} = \\
 &= \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \alpha_x^2 \alpha_y^2 V^2}{z_0^2} \times \frac{dz_0}{\alpha_x} = \frac{d}{z_0} \alpha_x \alpha_y^2 \varepsilon \varepsilon_0 V^2 \\
 F_y &= p \times A = \varepsilon \varepsilon_0 E^2 \times A_y = \varepsilon \varepsilon_0 \times \left(\frac{V \times (\alpha_x \alpha_y)}{z_0} \right)^2 \times d\alpha_x \times \frac{z_0}{\alpha_x \alpha_y} = \\
 &= \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \alpha_x^2 \alpha_y^2 V^2}{z_0^2} \times \frac{dz_0}{\alpha_y} = \frac{d}{z_0} \alpha_x^2 \alpha_y \varepsilon \varepsilon_0 V^2
 \end{aligned} \tag{2}$$

Como nos experimentos realizados $\alpha_x \neq \alpha_y$, logo, $F_x \neq F_y$.

3.6_ Deformações Sofridas pelo Polímero

A compressão e distensão sofridas pelo polímero são dadas em função da conservação do volume do material, vista na equação abaixo:

$$(1 + \varepsilon_x)(1 + \varepsilon_y)(1 + \varepsilon_z) = 1 \tag{1}$$

onde ε_x , ε_y e ε_z são as deformações nas três direções, sendo que a deformação na direção i é dada pela equação abaixo:

$$\varepsilon_i = \frac{l}{l_0} - 1, \tag{2}$$

onde l_0 é o comprimento original e l o comprimento final. A contribuição da compressão e distensão ocasionadas pela voltagem aplicada pode ser expressa em termos da pressão efetiva sobre o filme.

Se o material for perfeitamente elástico, a pressão efetiva pode ser relacionada com a deformação da espessura dada na equação abaixo:

$$\varepsilon_z = -\frac{p}{Y} = -\varepsilon\varepsilon_0 \frac{E^2}{Y} = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{Y} \left(\frac{V}{z}\right)^2 \quad (3)$$

onde Y é o módulo de Young do polímero. Essa equação é bastante precisa para pequenas deformações, ou seja, quando a espessura z é muito próxima do valor original z_0 , e o comportamento elástico do material está na sua faixa linear. No entanto, a expansão nas outras duas direções são mais importantes e a deformação da área (ε_a) do polímero pode ser derivada da equação (1) (onde $(1 + \varepsilon_a) = (1 + \varepsilon_x)(1 + \varepsilon_y)$), resultando em^[4]:

$$\varepsilon_a = \frac{1}{1 + \varepsilon_z} - 1 = \frac{1}{1 - \frac{p}{Y}} - 1 = \frac{p}{Y - p} \quad (4)$$

3.7_ Eletrodos

Os eletrodos utilizados têm que atender tanto os requisitos elétricos quanto mecânicos. Eles devem exercer pressão sobre o polímero, o qual muda de tamanho significativamente. Para não interferir com o movimento desejado do atuador, o eletrodo tem que ser flexível, logo sua rigidez deve ser significativamente menor que a do polímero. Ele deve também manter a condutividade, mesmo sob altas deformações. O eletrodo encontrado que atende essas particularidades e, portanto, utilizado neste trabalho, foi a graxa condutora de carbono *Molykote™ 41 Extreme High Temp Bearing Grease* da *Dow Conrnig™*^[10].

A graxa utilizada neste trabalho é funcional, mas pode ser substituída por melhores eletrodos. O principal problema encontrado é a facilidade com que ela é retirada com um contato acidental. Outros eletrodos foram testados em outros trabalhos sendo que um deles é uma combinação de um condutor em pó com um ligante, e essa mistura é então diluída e borrifada no polímero^[4].

4_ Apresentação da Planta Mecânica

A planta idealizada na execução deste projeto, tanto na direção x quanto na direção y, pode ser modelada através de um sistema massa-mola-amortecedor super amortecido já que o sistema como um todo pode ser considerado quase-estático^[4].

4.1_ O Sistema Massa-Mola-Amortecedor

Seja o sistema massa-mola-amortecedor viscoso conforme mostra a figura:

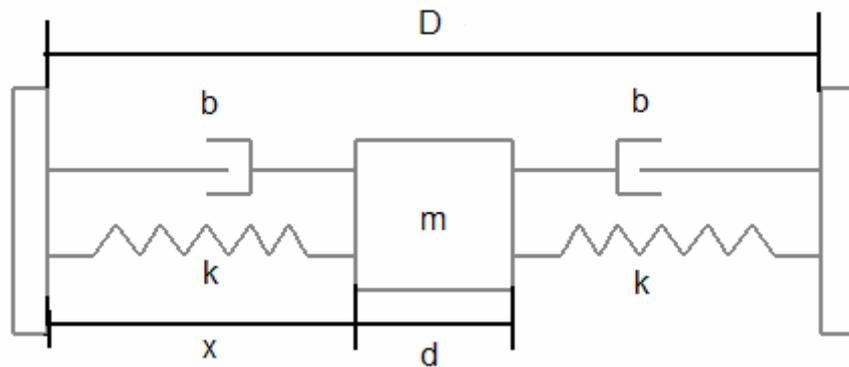


Figura 5: Esquema do sistema massa-mola-amortecedor que representa a planta

Para sistemas como esse a segunda lei de Newton estabelece que:

$$\sum F = ma$$

onde m é a massa, a é a aceleração da massa e $\sum F$ é a soma algébrica de todas as forças aplicadas à massa m .

$$-F_{k_e} - F_{b_e} + F_{k_d} - F_{b_d} = ma$$

$$-k(x - x_0) - b\dot{x} + k((D - d - x) - x'_0) - b\dot{x} = m\ddot{x}$$

$$m\ddot{x} + 2b\dot{x} + k(x - x_0) - k((D - d - x) - x'_0) = 0$$

A equação acima é a equação de movimento do sistema onde x_0 é o comprimento original do filme de polímero na direção x e x'_0 é este comprimento inicial acrescido pela deformação ε_x gerada pela voltagem aplicada; mas como este trabalho não visa, na

sua presente forma, determinar ou compreender a dinâmica do sistema, apenas a solução em regime permanente será calculada. O exemplo dado nessa nota teórica é o do funcionamento do sistema na direção x , mas pode-se determinar o comportamento do sistema na direção y de forma análoga.

4.2_ Massa do Sistema

O polímero perto do disco tem velocidade v e perto do anel tem velocidade zero devido às restrições físicas da planta, logo a velocidade média deve ser menor que v e por isso uma massa equivalente menor do a total do conjunto polímero-graxa condutora entra na equação de determinação da massa. A velocidade média do conjunto é aproximadamente metade da velocidade do disco central se o disco central for grande, e $1/3$ se o disco for pequeno. Assumem-se pequenos deslocamentos do disco, e que o perfil de velocidades varia com taxa constante. R_0 é o raio interno do anel, e r_0 o raio do disco, que tem velocidade v numa direção y qualquer num dado instante de tempo.

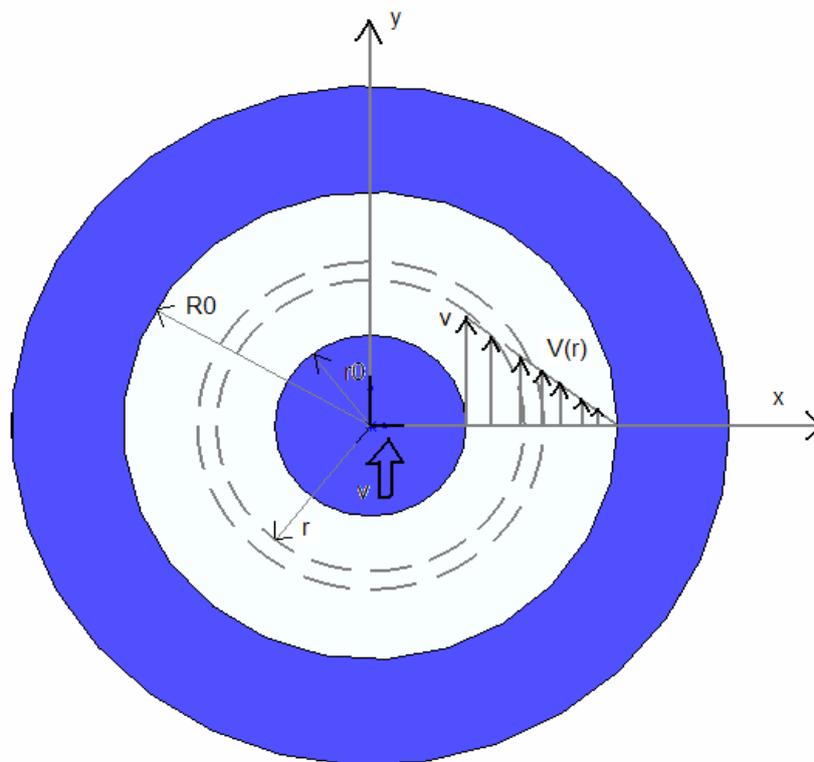


Figura 6: Perfil de velocidade no conjunto polímero-graxa condutora

Massa do anel de polímero: $dm = \rho \times 2\pi \times r \times dr$

Perfil de velocidade: $V(r) \approx \frac{R_0 - r}{R_0 - r_0} \times v$ (para $r_0 \leq r \leq R_0$)

$$\begin{aligned} \text{Momento linear do polímero: } p &= \int_{r_0}^{R_0} V(r) dm = \int_{r_0}^{R_0} \frac{R_0 - r}{R_0 - r_0} \times v \times \rho \times 2\pi \times r \times dr = \\ &= \frac{\rho \times 2\pi \times v}{R_0 - r_0} \times \int_{r_0}^{R_0} (R_0 r - r^2) dr = \frac{\rho \times 2\pi \times v}{R_0 - r_0} \times \left(\int_{r_0}^{R_0} R_0 r \times dr - \int_{r_0}^{R_0} r^2 \times dr \right) = \\ &= \frac{\rho \times 2\pi \times v}{R_0 - r_0} \times \left(\left(\frac{R_0 r^2}{2} \right) \Big|_{r_0}^{R_0} - \left(\frac{r^3}{3} \right) \Big|_{r_0}^{R_0} \right) = \frac{\rho \times 2\pi \times v}{R_0 - r_0} \times \left(\left(\frac{R_0^3}{2} - \frac{R_0 r_0^2}{2} \right) - \left(\frac{R_0^3}{3} - \frac{r_0^3}{3} \right) \right) = \\ &= \frac{\rho \times 2\pi \times v}{R_0 - r_0} \times \left(\frac{R_0^3}{6} + \frac{r_0^3}{3} - \frac{R_0 r_0^2}{2} \right) \end{aligned}$$

$$\text{A massa do polímero é: } m = \int_{r_0}^{R_0} dm = \int_{r_0}^{R_0} 2\pi\rho \times r \times dr = 2\pi\rho \left(\frac{r^2}{2} \Big|_{r_0}^{R_0} \right) = 2\pi\rho \times \left(\frac{R_0^2 - r_0^2}{2} \right)$$

Calculando v :

$$v = \frac{p}{m} = \frac{\frac{2\pi\rho \times v}{R_0 - r_0} \times \left(\frac{R_0^3}{6} + \frac{r_0^3}{3} - \frac{R_0 r_0^2}{2} \right)}{2\pi\rho \times \left(\frac{R_0^2 - r_0^2}{2} \right)} = \frac{2v}{(R_0 - r_0)(R_0^2 - r_0^2)} \times \left(\frac{R_0^3}{6} + \frac{r_0^3}{3} - \frac{R_0 r_0^2}{2} \right)$$

$$\text{Logo, } p = m \times \frac{2v}{(R_0 - r_0)(R_0^2 - r_0^2)} \times \left(\frac{R_0^3}{6} + \frac{r_0^3}{3} - \frac{R_0 r_0^2}{2} \right) = m_{\text{equivalente}} \times v$$

$$\text{Sendo assim, } m_{\text{equivalente}} = m \times \frac{2}{(R_0 - r_0)(R_0^2 - r_0^2)} \times \left(\frac{R_0^3}{6} + \frac{r_0^3}{3} - \frac{R_0 r_0^2}{2} \right)$$

$$\text{Se } r_0 \text{ é pequeno, então } p \approx \frac{mv}{3} \text{ e a } m_{\text{equivalente}} = \frac{m}{3}.$$

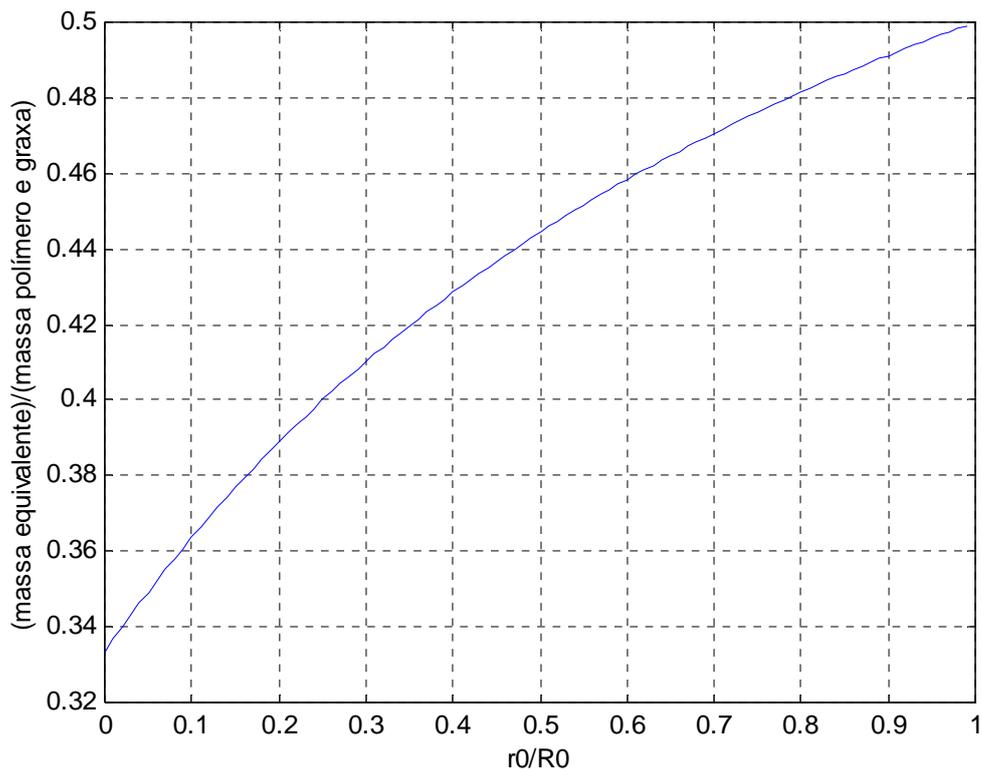


Figura 7: Gráfico da relação entre a massa equivalente e a razão entre os raios do disco e interno do anel

Todas as massas do conjunto foram medidas em uma balança:

Componente do Sistema	Massa (g)
Anéis de garulite (moldura)	
Anel 1	21,10
Anel 2	21,41
Anel 3	20,80
Anel 4	20,93
Polímero	
Conjunto Anéis 1 e 4	0,59
Conjunto Anéis 2 e 3	0,99
Graxa condutora	0,11
Discos de garulite	
Disco 1	1,53
Disco 2	1,46
Massa total	
Conjunto Anéis 1 e 4	45,72
Conjunto Anéis 2 e 3	46,30

Figura 8: Tabela das massas dos componentes do sistema

A massa relevante para o sistema é a massa equivalente do conjunto polímero-graxa condutora mais a massa dos dois discos de garulite.

Para o conjunto de anéis 1 e 4:

$$m = m_{\text{equivalente}} + m_{\text{discos}} = \frac{m_{\text{polímero}} + m_{\text{graxa}}}{3} + m_{\text{discos}} = \frac{0,59 + 0,11}{3} + 1,53 + 1,46 =$$

$$= \frac{0,7}{3} + 2,99 = 0,23 + 2,99 = 3,22 \text{ g}$$

Para o conjunto de anéis 2 e 3:

$$m = m_{\text{equivalente}} + m_{\text{discos}} = \frac{m_{\text{polímero}} + m_{\text{graxa}}}{3} + m_{\text{discos}} = \frac{0,99 + 0,11}{3} + 1,53 + 1,46 =$$

$$= \frac{1,1}{3} + 2,99 = 0,36 + 2,99 = 3,35 \text{ g}$$

4.3_ Constante de Mola do Sistema

Agora será calculada a constante de mola que, por hipótese, é igual para as duas molas.

Para a mola da esquerda temos:

$$F_x = K \times (x - x_0)$$

$$F = \sigma \times A = E \times \varepsilon_x \times A_x = E \times \frac{(x - x_0)}{x_0} \times d\alpha_y \times \frac{z_0}{\alpha_x \alpha_y} = \frac{z_0 dE}{x_0 \alpha_x} \times (x - x_0)$$

Para a mola da direita temos:

$$F_x = K \times ((R - d - x) - x_0)$$

$$F = \sigma \times A = E \times \varepsilon_x \times A_x = E \times \frac{((R - d - x) - x_0)}{x_0} \times d\alpha_y \times \frac{z_0}{\alpha_x \alpha_y} = \frac{z_0 dE}{x_0 \alpha_x} \times ((R - d - x) - x_0)$$

O cálculo é idêntico para a direção y:

$$K_y = \frac{z_0 dE}{y_0 \alpha_x}$$

4.4_ Constante de Amortecimento do Sistema

Como o sistema pode ser considerado quasi-estático^[4], isso quer dizer que o efeito do amortecimento é muito elevado, tendendo ao infinito. Isto também implica no fato de esse ser um sistema super amortecido.

4.5_ Ponto de Equilíbrio em Regime Permanente

Quando a voltagem é aplicada nos eletrodos, a posição de equilíbrio do sistema se altera proporcionalmente. Na **figura 9** abaixo, está o esquema de como o fenômeno ocorre.

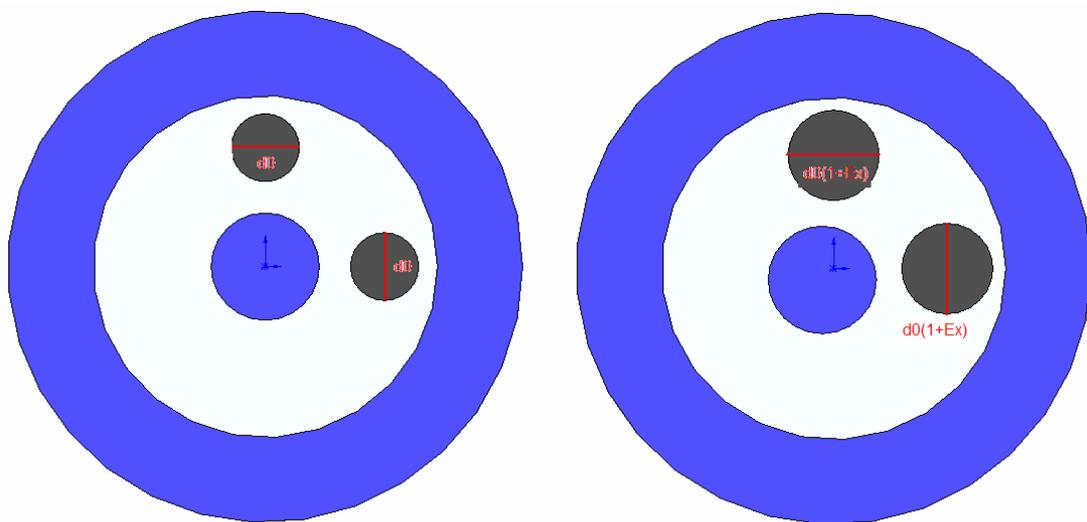


Figura 9: Alteração do ponto de equilíbrio do sistema com a voltagem

No regime permanente, a equação do movimento do sistema se reduz a:

$$k(x - x_0) - k((D - d - x) - x_0') = 0$$

Como os k s podem ser considerados iguais temos:

$$k((x - x_0) - ((D - d - x) - x_0')) = 0$$

Logo, $((x - x_0) - ((D - d - x) - x_0')) = 0$. Sendo assim:

$$\begin{aligned}x - x_0 - D + d + x + x_0' &= 0 \\2x - D + d + x_0' - x_0 &= 0 \\2x &= D - d - (x_0' - x_0) \\x &= \frac{D - d - (x_0' - x_0)}{2}\end{aligned}$$

Mas sabemos que $x_0' - x_0$ é igual ao aumento de tamanho sofrido pelo polímero entre os eletrodos. Logo:

$$x_0' - x_0 = d_0 \varepsilon_x$$

Agora, devemos encontrar o valor de ε_x . Sabe-se que:

$$\varepsilon_a = \frac{p}{Y - p}$$

$$(1 + \varepsilon_x)(1 + \varepsilon_y) = (1 + \varepsilon_a)$$

Como o aumento do tamanho do polímero entre os eletrodos é pequeno, pode-se considerar que $\varepsilon_x = \varepsilon_y$. Logo:

$$(1 + \varepsilon_x)^2 = 1 + \frac{p}{Y - p} = \frac{1}{1/Y - p} + \frac{p}{Y - p/1} = \frac{Y - p + p}{Y - p} = \frac{Y}{Y - p}$$

$$(1 + \varepsilon_x) = \sqrt{\frac{Y}{Y - p}}$$

$$\varepsilon_x = \sqrt{\frac{Y}{Y - p}} - 1$$

Da equação do regime permanente temos:

$$x = \frac{D-d-(x'_0-x_0)}{2} = \frac{R-d-d_0\varepsilon_x}{2} = \frac{D-d-d_0\left(\sqrt{\frac{Y}{Y-p}}-1\right)}{2} =$$

$$= \frac{D-d-d_0\left(\sqrt{\frac{Y}{Y-\varepsilon\varepsilon_0\left(\frac{V^2}{z^2}\right)}-1}\right)}{2} = \frac{D-d-d_0\left(\sqrt{\frac{Y}{Y-\varepsilon\varepsilon_0\left(\frac{V^2}{\left(\frac{z_0}{\alpha_x\alpha_y}\right)^2}\right)}-1}\right)}{2}$$

Mas como é necessário apenas calcular o deslocamento da disco central, deve-se subtrair da equação acima o valor da posição de equilíbrio quando o sistema está em repouso. Logo, quando $V = 0 \rightarrow x = (D - d)/2$. Assim podemos derivar em módulo a seguinte equação para o deslocamento teórico da peça:

$$\Delta x = d_0 \left(\sqrt{\frac{Y}{Y-\varepsilon\varepsilon_0\left(\frac{V^2}{\left(\frac{z_0}{\alpha_x\alpha_y}\right)^2}\right)}-1} \right)$$

5_ Sistemas de Apoio ao Desenvolvimento do Projeto

De forma a tornar possível a realização do experimento foram necessários o projeto e a implementação de outros sistemas paralelos: um mecânico e outro elétrico. O sistema mecânico é uma mesa xy metálica manual e o elétrico é o sistema de acionamento do polímero.

5.1_ Mesa XY de Apoio

Essa mesa XY foi construída para que se pudesse pré-tensionar o polímero da forma desejada de maneira simples e rápida e por apenas uma pessoa.

A lista dos materiais utilizados se segue:

Componente	Quantidade
Perfil da Bosch Rexroth modelo 45x45 (69,85 cm)	4
Perfil de Aço (1,96cm x 1,35cm x 69,8cm)	4
Perfil de Alumínio (0,97cm x 0,34cm x 61cm)	2
Perfil de Alumínio (0,97cm x 0,34cm x 24,7cm)	2
Elemento de União da Bosch Rexroth modelo Cantoneira 43x42	4
Parafuso com Cabeça de Martelo Bosch Rexroth modelo M6x16	8
Parafuso com Cabeça de Martelo Bosch Rexroth modelo M6x25	6
Parafusos Escariados	4
Porca de Pressão Bosch Rexroth modelo M6	10
Porca Borboleta	6
Elemento de Fixação C	2

Figura 10: Tabela de componentes que compõem a mesa xy de pré-tensionamento do polímero



Figura 11: Foto da mesa xy de apoio

5.2_ Sistema Elétrico de Acionamento

Para excitar o atuador à base de polímero, é necessária uma alta voltagem da ordem de milhares de volts. No entanto, isso não quer dizer que o atuador precise de uma grande quantidade de energia elétrica. A corrente drenada pelo sistema é muito baixa, da ordem de microAmpères.

Na solução idealizada para o projeto, foi montado um circuito que eleva os 30V da fonte para 5kV necessários no projeto. O componente principal do circuito é um flyback utilizado em televisores para alimentar os tubos de imagem^[6].



Figura 12: Fonte 30V DC utilizada

A idéia é que o flyback precisa ser excitado por uma onda quadrada na entrada negativa do enrolamento primário, enquanto que os 30V, ou menos, entram pelo positivo. Para excitar o flyback foi utilizado um circuito oscilador com o chip NE555 ajustado para uma frequência de 20kHz^[6].

Os componentes utilizados foram:

- Flyback OV2076/M;
- Circuito integrado NE555;
- Transistor BU508D;
- 2 resistores de 1k Ω de ¼ W;
- 2 resistores de 10 Ω de ¼ W;
- 1 potenciômetro de 4k7 Ω de ¼ W;
- 2 capacitores eletrolíticos de 100 μ F – 63V;
- 3 capacitores de cerâmica: 2 de 10 η F – 1kV e 1 de 15 η F – 250V;
- Protoboard modelo MP-1680;
- Bateria Duracell alcalina 9V MN1604B1.

Os *datasheets* do NE555 e do BU508D se encontram no Apêndice. Abaixo é possível ver o esquema do circuito implementado para o conversor, onde o flyback foi representado pelo símbolo de um transformador comum^[6].

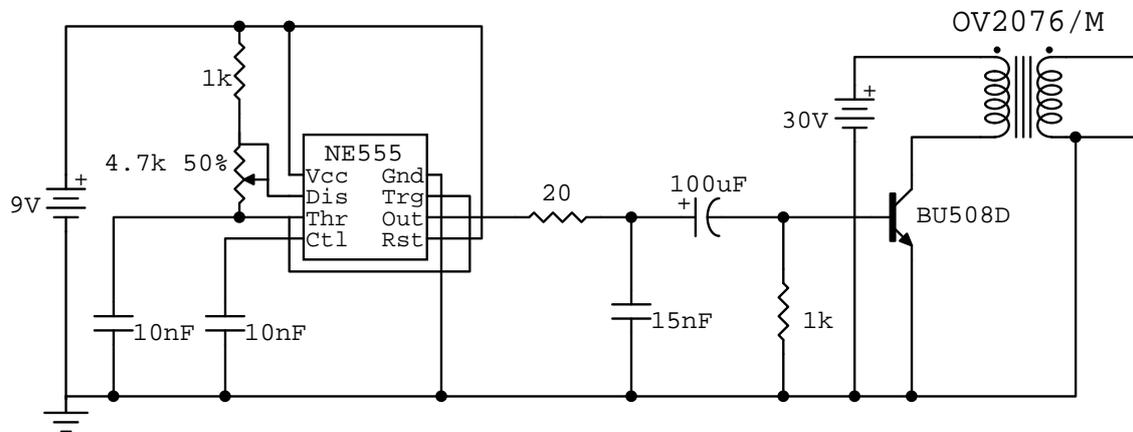


Figura 13: Esquemático do circuito conversor DC-DC implementado

A configuração dos componentes para obter uma frequência desejável no oscilador NE555 foi conseguida através do *datasheet* do componente. Ajustando-se o potenciômetro de 4k7 pode-se variar a frequência da saída. Na saída do CI encontra-se um resistor de 20Ω responsável por limitar a corrente drenada do NE555 afim de que esse não queime. Os capacitores de 15nF e 100μF juntamente com o resistor de 1kΩ fazem o papel de condicionamento do sinal que excita o transistor, tendo em vista que havia no sistema um ruído razoavelmente alto, sendo necessário, portanto tratamentos como um filtro passa-baixa atribuído ao capacitor para a terra. O transistor por sua vez está funcionando nesta aplicação como chave comutadora que, de acordo com o sinal gerado pelo oscilador, libera para o flyback pulsos de 30V fornecidos pela fonte DC. A **figura 14** mostra o circuito implementado numa *protoboard*^[6].

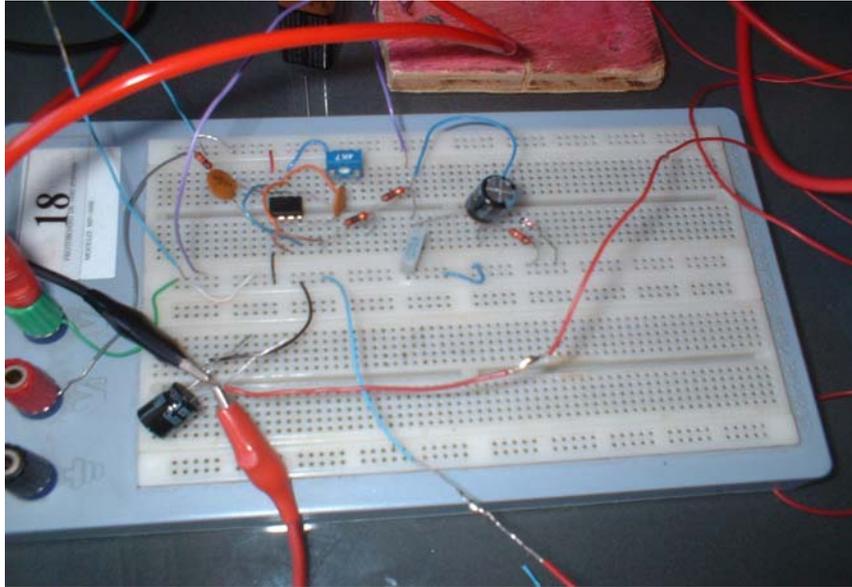


Figura 14: Circuito gerador de onda quadrada montado na protoboard

O transistor, por estar chaveando tensões de até 30V, precisou ser separado do circuito oscilador afim de não danificar nenhum dos componentes nem a *protoboard* devido à alta corrente que passa por ele. Logo foram soldados fios às suas pernas, e o componente foi preso a uma placa da madeira improvisada como mostra a **figura 15**^[6].

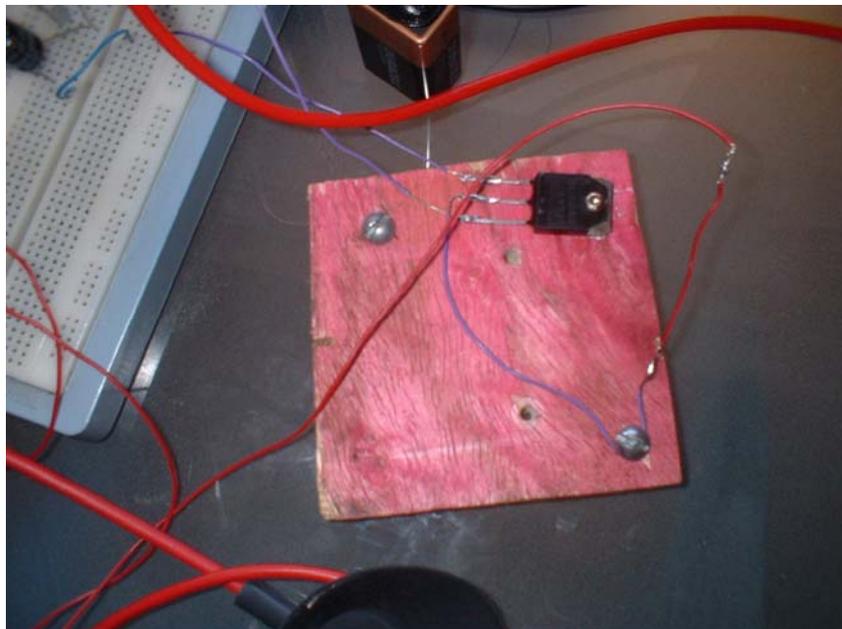


Figura 15: Transistor BU508D separado do circuito oscilador

O circuito se mostrou estável durante todos os testes, não apresentando qualquer problema.

Para que fosse possível medir as altas tensões de saída do flyback foi utilizado o divisor de tensão V1G da EMCO que é da ordem de 1.000:1^[11].



Figura 16: Divisor de tensão utilizado

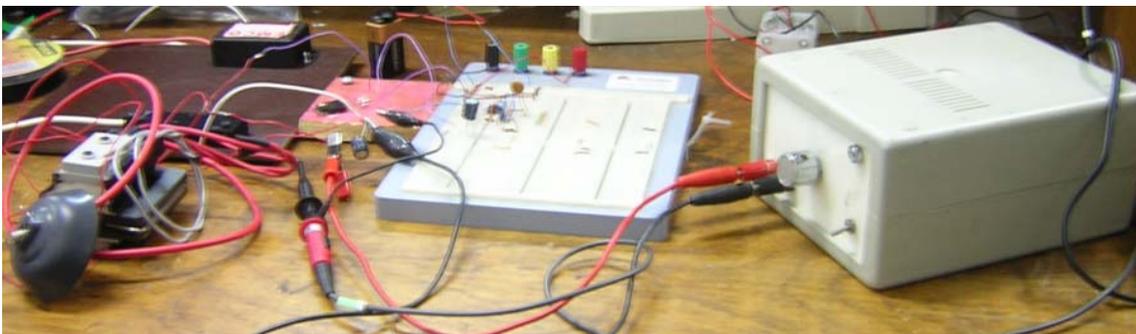


Figura 17: Conversor DC-DC implementado

A seguir descreve-se o flyback utilizado. Esses componentes são transformadores elevadores de tensão com mais de uma bobina primária, fornecendo diferentes relações para as tensões no secundário, capazes de fornecer por volta de 30kV a partir de tensões de 60V^[12]. O flyback adquirido foi o OV2076/M da BRAS ALFA utilizado em televisores PHILIPS modelos PT578 e PT658. Apesar de ter contactado o fabricante, não foi possível conseguir um *datasheet* ou qualquer informação sobre a pinagem do componente. Portanto seu funcionamento foi suposto parecido ao do flyback HR7839 da HR DIEMEN, cujo esquemático se encontra a seguir^[6].



HR 7839

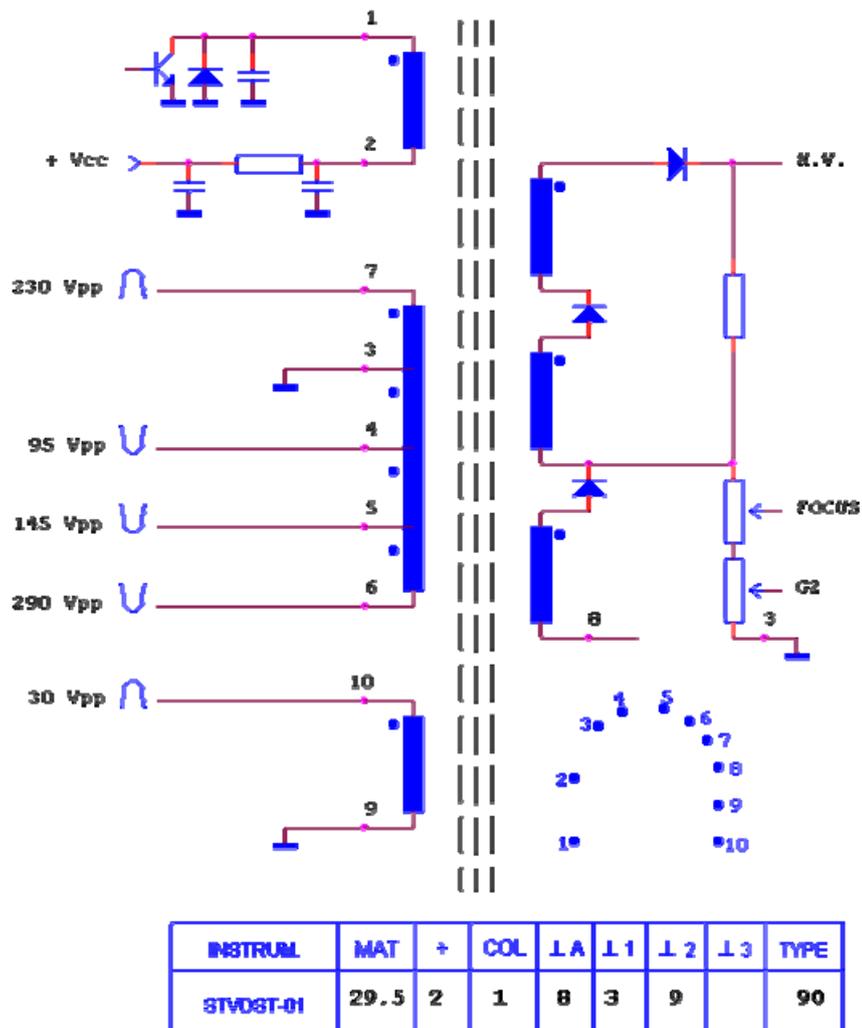


Figura 18: Esquemático do flyback HR7839 da HR DIEMEN

Internamente ele possui um transistor chaveando o primário entre a tensão de entrada no positivo e a terra^[13]. Essa variação de tensão abrupta possui uma alta derivada da corrente que flui pelo enrolamento primário. A tensão induzida no secundário é proporcional à taxa de variação da corrente na outra bobina^[14]. Como esse é um transformador elevador, na sua saída haverá uma alta tensão retificada por um diodo interno.

Para descobrir a pinagem do componente, foi utilizado o seguinte procedimento^[6]:

- Usar uma fonte DC de 24V e um voltímetro na escala de 20V. Conectando o catodo do voltímetro na saída positiva do flyback (fio longo e vermelho com um “copo” de borracha em volta da extremidade do mesmo) e o anodo na terra da fonte, testar com a saída positiva da fonte todos os pinos do flyback até obter

uma tensão entre 5-10V no voltímetro. O pino que fornecer a tensão será a terra do enrolamento secundário.

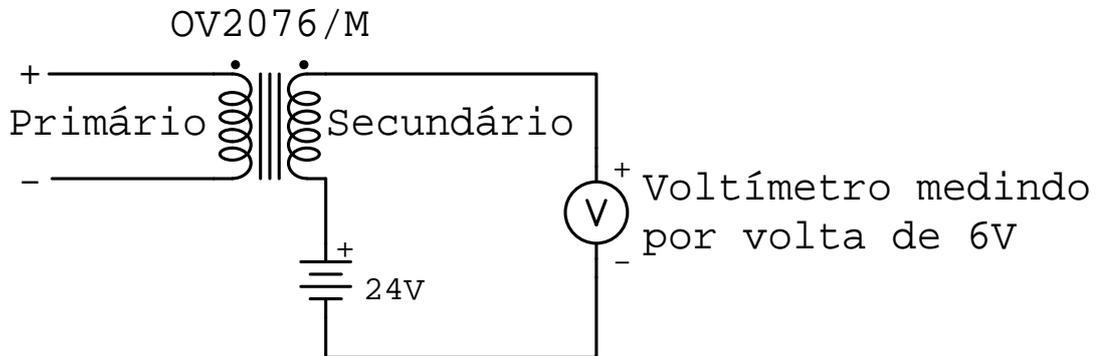


Figura 19: Esquemático para descobrir o terra do enrolamento secundário

- Para descobrir os pinos do enrolamento primário, deve-se medir a resistência entre os pinos do flyback até encontrar o valor por volta de 1Ω no multímetro.

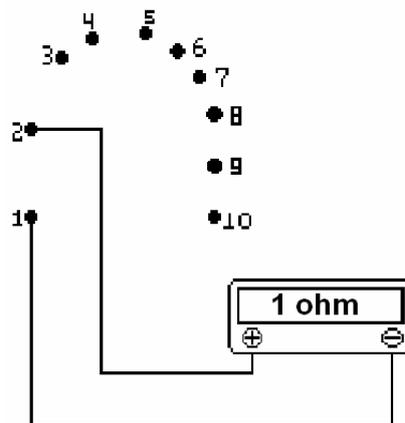


Figura 20: Esquemático para descobrir os pinos do enrolamento primário

- Para descobrir a polaridade do enrolamento primário, deve-se medir a voltagem de saída do flyback quando aplicado um impulso de 9V (provindos de uma bateria de 9V) nos pinos do enrolamento primário. Como não se sabe quais dos pinos é o positivo, deve-se testar as duas polaridades da bateria e ver qual delas vai gerar o maior impulso na saída (por volta dos 30V).

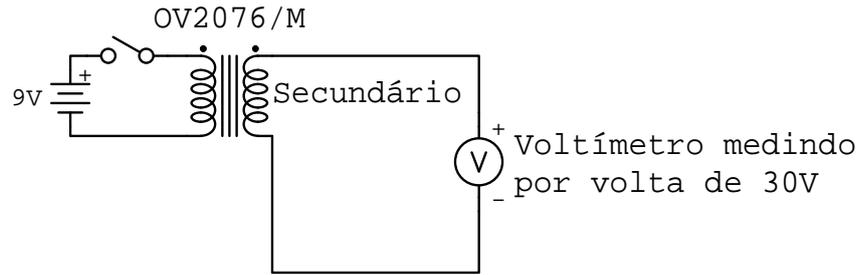


Figura 21: Esquemático para descobrir a polaridade do enrolamento primário

Depois desse procedimento notou-se que os pinos 1 e 2 correspondem respectivamente ao - e + do enrolamento primário, e o pino 8 ao terra do enrolamento secundário, como mostra a figura abaixo.

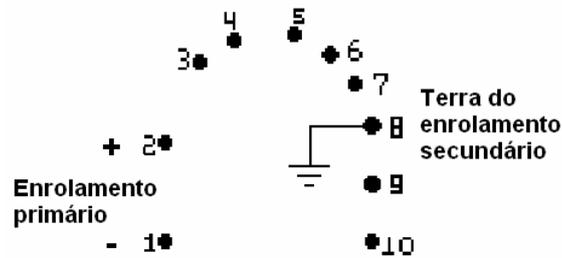


Figura 22: Esquema dos pinos do flyback



Figura 23: Flyback OV2076/M utilizado no projeto

6_ Procedimento Experimental

Os experimentos foram feitos com o intuito de determinar a relação entre a voltagem de excitação e o deslocamento do disco central da mesa xy idealizada. O experimento foi conduzido seguindo-se os passos descritos abaixo:

1) Cortaram-se duas tiras retangulares da fita adesiva VHB 4905 que possuíam, respectivamente, 10 e 11 cm na direção x e 1,9 e 3,3 cm na direção y;

2) Essas tiras foram fixadas na mesa xy de apoio para se realizar o pré-tensionamento do polímero;

3) Estica-se, respectivamente, 400% e 100% na direção x e depois 700% e 400% na direção y;

Do passo 4 em diante o processo é realizado para as duas configurações de pré-tensionamento.

4) Os dois anéis de garulite são então fixados dos dois lados das duas tiras de polímero e é necessário pressionar bem um anel contra o outro para que a força de adesão seja grande;



Figura 24: Polímero sendo pré-tensionado na mesa xy de apoio

5) Corta-se o polímero em volta dos anéis para desconectá-lo da mesa de tensionamento;

6) Os dois discos centrais de garulite são fixados de cada lado do polímero em cada um dos frames e são então pressionados um contra o outro para aderirem bem à fita;

7) A graxa condutora é então colocada sobre o polímero em ambos os lados com o auxílio de um pincel. As duas partes “pintadas” com a graxa é que gerarão o efeito capacitivo. A forma da pintura é circular com um prolongamento até a superfície dos anéis de garulite, pois os fios condutores não podem ser colocados em contato com o polímero podendo gerar curtos;

8) Os fios condutores são então fixados com um pedaço de fita aos anéis de garulite, positivo de um lado e negativo do outro;

9) Esses fios são então conectados ao circuito eletrônico de excitação;

10) A voltagem de excitação do polímero, após passar por um divisor de tensão 1.000:1, foi lida através de um osciloscópio e foi aumentada em relação à saída de alta tensão antes do divisor de 500 Volts a cada passada e lê-se também a média do sinal através de um multímetro e

11) Fotos foram tiradas com uma câmera fotográfica apoiada por um tripé a cada aumento de tensão no circuito de excitação para que através delas fosse possível calcular o deslocamento sofrido pelo disco central de garulite.

7_ Resultados e Discussões

Executando-se os passos descritos no item anterior, os resultados do experimento são gerados e nesta seção eles serão trabalhados de forma a oferecer o resultado procurado que é a obtenção da curva de voltagem de entrada x deslocamento do disco central. Para isso, devemos descobrir através das fotos tiradas durante o experimento qual é o deslocamento sofrido pelo disco central de garulite.

7.1_ Método Gráfico de Determinação do Deslocamento

A determinação do deslocamento do disco central foi realizada através do seguinte método gráfico:

1) Abre-se um programa gráfico qualquer como o Microsoft Paint ou o Adobe Photoshop e mede-se a distância em número de pixels correspondente ao diâmetro dos anéis de garulite em qualquer uma das fotos como demonstrado na figura abaixo, pois o raio interno dos anéis não se altera.

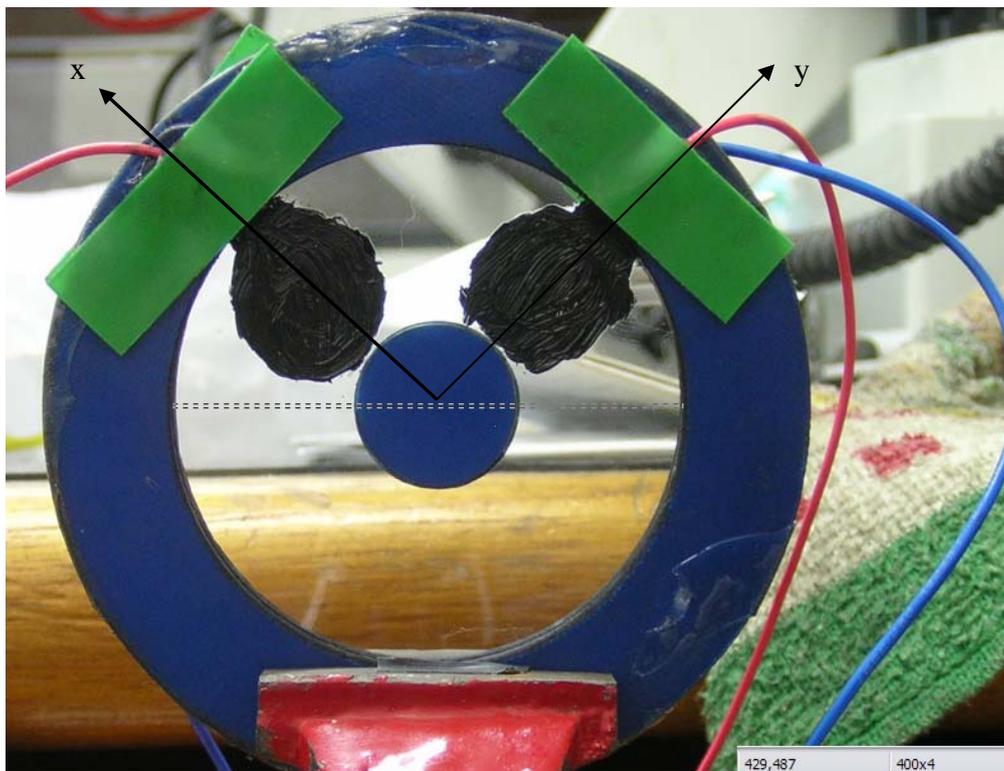


Figura 25: Método para calcular o diâmetro dos anéis de garulite em pixels no Microsoft Paint

2) Então ainda na foto com a voltagem de excitação de 0 V e determina-se o quanto o disco está distante dos anéis de garulite, que são fixos, em ambas as direções x e y. Essa distância, no entanto, é medida em pixels, logo é preciso convertê-la para milímetros;

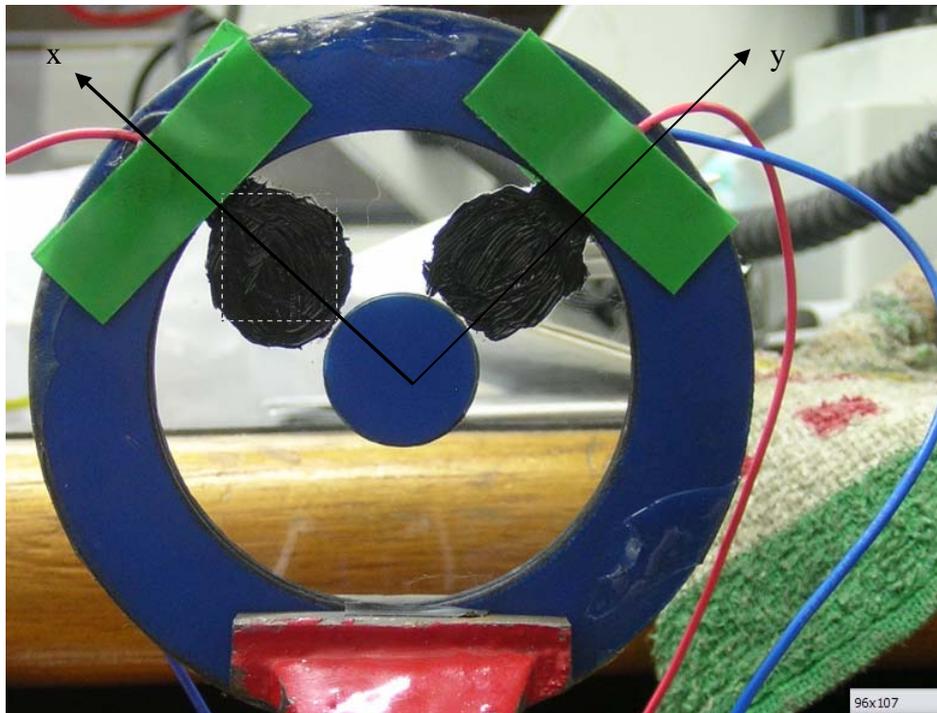


Figura 26: Cálculo da distância x através do método gráfico para 0 V

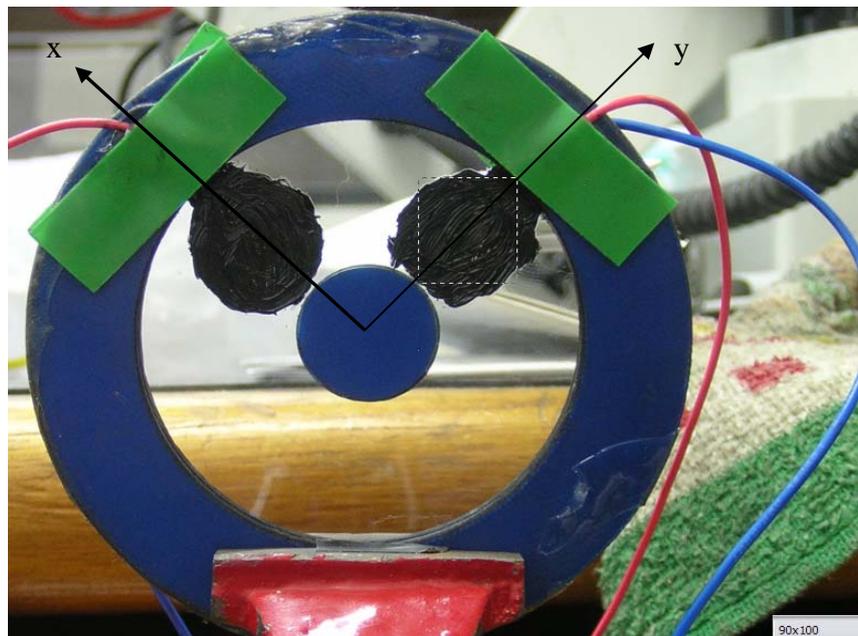


Figura 27: Cálculo da distância y através do método gráfico para 0 V

Distância em pixels na direção x:

$$d = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{96^2 + 107^2} = \sqrt{9.216 + 11.449} = \sqrt{20.665} = 143,8$$

Distância em pixels na direção y:

$$d = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{90^2 + 100^2} = \sqrt{8.100 + 10.000} = \sqrt{18.100} = 134,5$$

3) Então abre-se a foto com a voltagem de excitação de 500 V e determina-se a mesma distância entre o disco e o anel na direção x e na direção y e depois subtrai-se o valor em 0 V. No experimento efetuado o polímero foi atuado nas duas direções ao mesmo tempo. Essa distância, no entanto, é medida em pixels, logo é preciso convertê-la para milímetros;

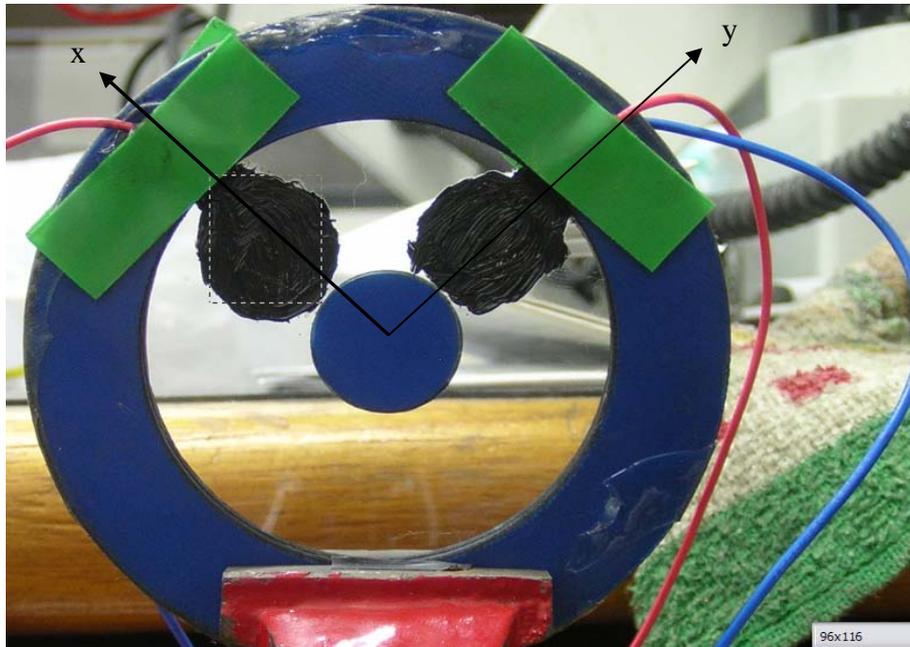


Figura 28: Cálculo da distância x através do método gráfico para 500 V

Para calcular a distância em pixels em x:

$$d = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{96^2 + 116^2} = \sqrt{9.216 + 13.456} = \sqrt{22.672} = 150,6$$

$$d = 150,6 - 143,8 = 6,8 \text{ pixels}$$

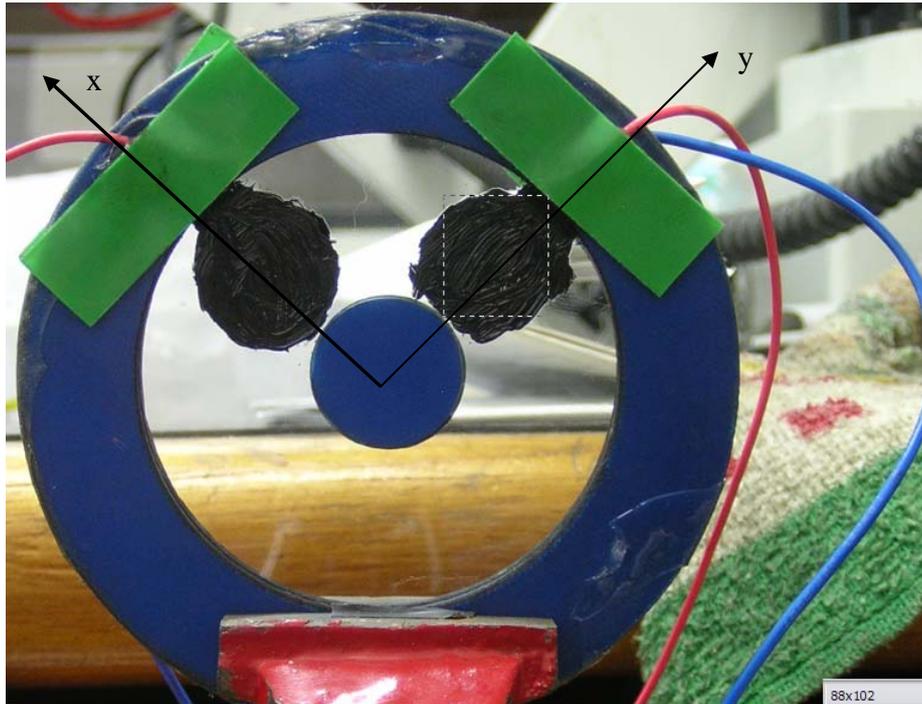


Figura 29: Cálculo da distância y através do método gráfico para 500 V

Para calcular a distância em pixels em y :

$$d = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{88^2 + 102^2} = \sqrt{7.744 + 10.404} = \sqrt{18.148} = 134,7$$

$$d = 134,7 - 134,5 = 0,2 \text{ pixels}$$

4) Sabendo-se do primeiro passo a relação do diâmetro interno em pixels e em milímetros, é possível calcular a distância em milímetros do deslocamento do disco através de uma simples regra de três como demonstrado abaixo.

Na direção x :

$$60,5 \text{ mm} \rightarrow 400 \text{ pixels}$$

$$x \text{ mm} \rightarrow 6,8 \text{ pixels}$$

$$400x = 60,5 \times 6,8$$

$$x = \frac{60,5 \times 6,8}{400} = 1,03 \text{ mm}$$

Na direção y:

$$60,5mm \rightarrow 400 \text{ pixels}$$

$$y \text{ mm} \rightarrow 0,2 \text{ pixels}$$

$$400y = 60,5 \times 0,2$$

$$y = \frac{60,5 \times 0,2}{400} = 0,03mm$$

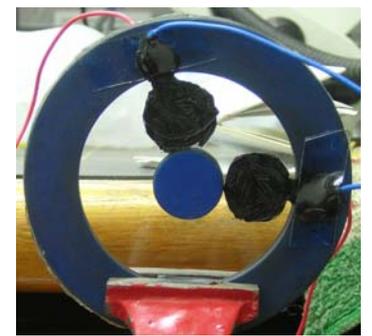
5) Então, esse método é repetido para cada fotografia tirada durante o experimento e assim constroi-se uma tabela de tensão-deslocamento para cada experimento realizado.

7.2_ Resultados do Experimento 1

O experimento 1 foi realizado com o conjunto de anéis de garulite 2 e 3 e com os seguintes parâmetros iniciais:

$$\begin{cases} x_0 = 11cm \\ y_0 = 3,3cm \end{cases} \quad \begin{cases} \alpha_x = 2 \\ \alpha_y = 3 \end{cases} \quad \begin{cases} d_{0_x} = 18mm \\ d_{0_y} = 18mm \end{cases}$$

Tensão de excitação (kV)	Tensão média (kV)	Deslocamento na direção x (mm)	Deslocamento na direção y (mm)	Fotografia
0	0	0	0	

0,5	0,242	0,30	0,24	
1	0,465	0,45	0,41	
1,5	0,712	0,60	0,57	
2	0,965	0,75	0,77	

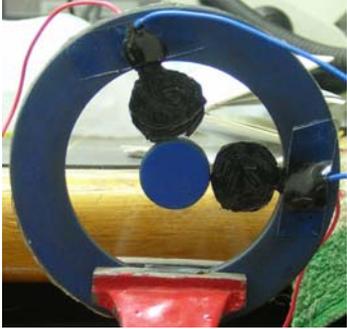
2,5	1,180	0,91	0,88	
3	1,413	1,06	1,01	
3,5	1,639	1,21	1,21	

Figura 30: Tabela de tensão de entrada x deslocamento do disco

Com base na tabela da **figura 30** foram feitos os seguintes gráficos no programa Matlab:

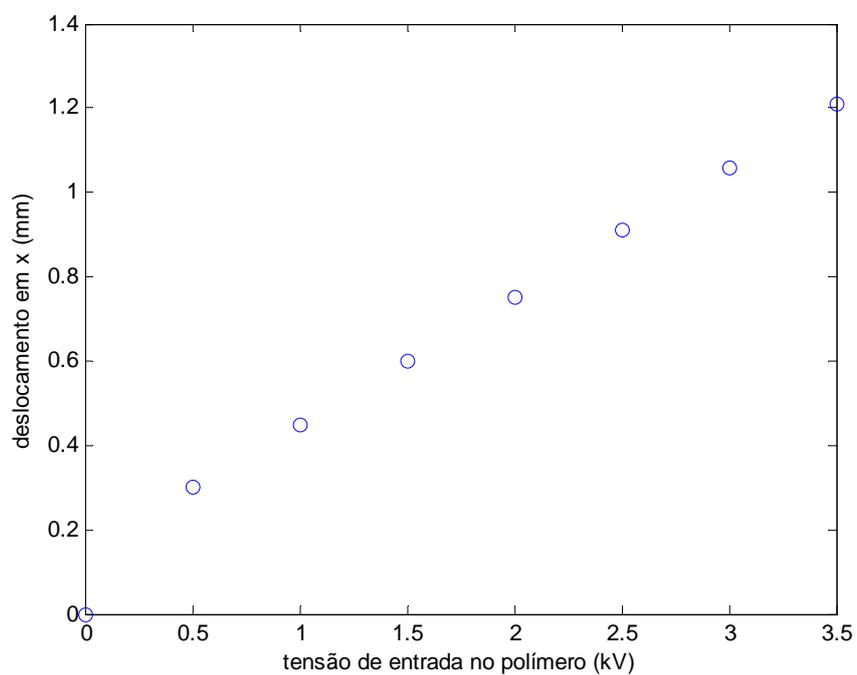


Figura 31: Gráfico de tensão x deslocamento na direção x da mesa xy

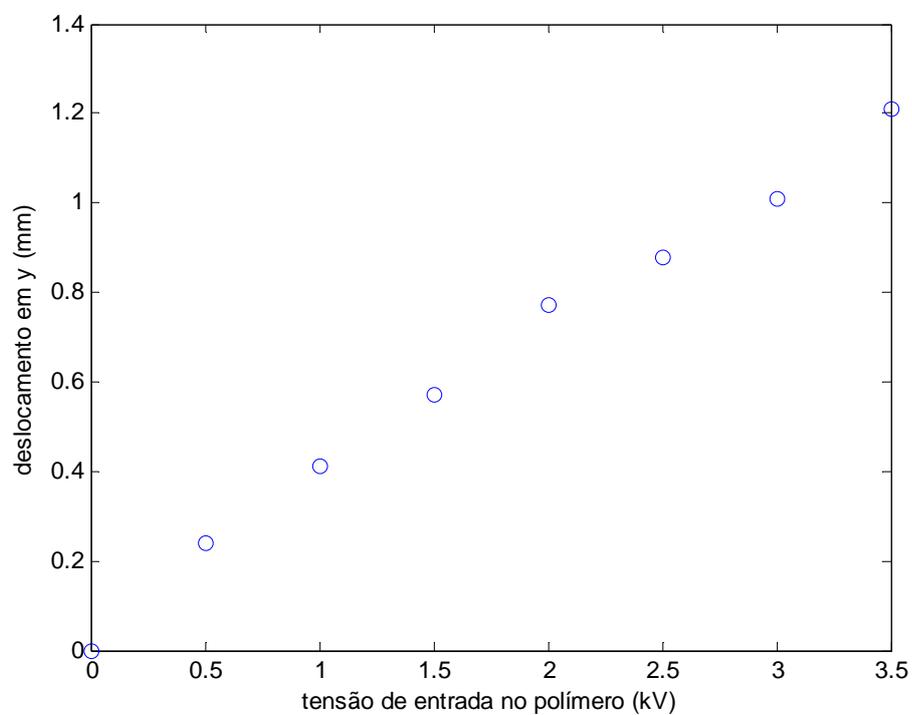


Figura 32: Gráfico de tensão x deslocamento na direção y da mesa xy

Agora, com o que foi definido anteriormente no item 4.5, os deslocamentos teóricos da peça central serão calculados. Esses cálculos estão apresentados na tabela a seguir e os dados utilizados são referentes ao experimento realizado e ao *datasheet* do polímero:

$$\Delta x = d_0 \left(\sqrt{\frac{Y}{Y - \varepsilon \varepsilon_0 \left(\frac{V^2}{\left(\frac{z_0}{\alpha_x \alpha_y} \right)^2} \right)} - 1} \right) = 18 \left(\sqrt{\frac{170 \times 10^3}{170 \times 10^3 - 4,5 \times 8,85 \times 10^{-12} \left(\frac{V^2}{\left(\frac{0,5 \times 10^{-3}}{2 \times 3} \right)^2} \right)} - 1} \right) =$$

$$= 18 \left(\sqrt{\frac{170 \times 10^3}{170 \times 10^3 - 39,83 \times 10^{-12} \left(\frac{V^2}{\left(\frac{0,5 \times 10^{-3}}{6} \right)^2} \right)} - 1} \right) = 18 \left(\sqrt{\frac{170 \times 10^3}{170 \times 10^3 - 39,83 \times 10^{-12} \left(\frac{V^2}{\left(6,94 \times 10^{-9} \right)^2} \right)} - 1} \right) =$$

$$= 18 \left(\sqrt{\frac{170 \times 10^3}{170 \times 10^3 - 39,83 \times 10^{-3} \left(\frac{V^2}{6,94} \right)} - 1} \right)$$

Tensão aplicada ao polímero (kV)	Deslocamento na direção x (mm)	Deslocamento na direção y (mm)
0,0	0,00	0,00
0,242	0,02	0,02
0,465	0,07	0,07
0,712	0,16	0,16

0,965	0,29	0,29
1,180	0,43	0,43
1,413	0,64	0,64
1,639	0,88	0,88

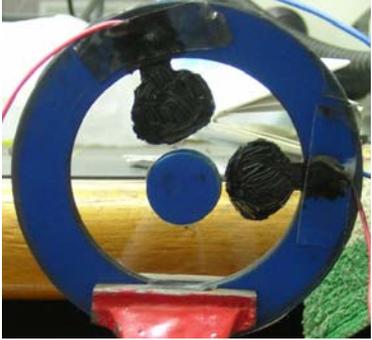
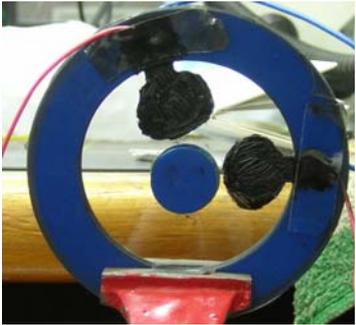
Figura 33: Tabela dos deslocamentos teóricos nas direções x e y

7.3_ Resultados do Experimento 2

O experimento 1 foi realizado com o conjunto de anéis de garulite 1 e 4 e com os seguintes parâmetros iniciais:

$$\begin{cases} x_0 = 10cm \\ y_0 = 1,9cm \end{cases} \quad \begin{cases} \alpha_x = 3 \\ \alpha_y = 6 \end{cases} \quad \begin{cases} d_{0_x} = 20mm \\ d_{0_y} = 21mm \end{cases}$$

Tensão de excitação (kV)	Tensão média (kV)	Deslocamento na direção x (mm)	Deslocamento na direção y (mm)	Fotografia
0	0	0	0	

0,5	0,242	0,15	0,19	
1	0,465	0,30	0,28	
1,5	0,712	0,45	0,42	
2	0,965	0,61	0,57	

2,5	1,180	0,76	0,77	
3	1,413	0,91	0,92	
3,5	1,639	1,06	1,15	

Figura 34: Tabela de tensão de entrada x deslocamento do disco

Com base na tabela da **figura 34** foram feitos os seguintes gráficos no programa Matlab:

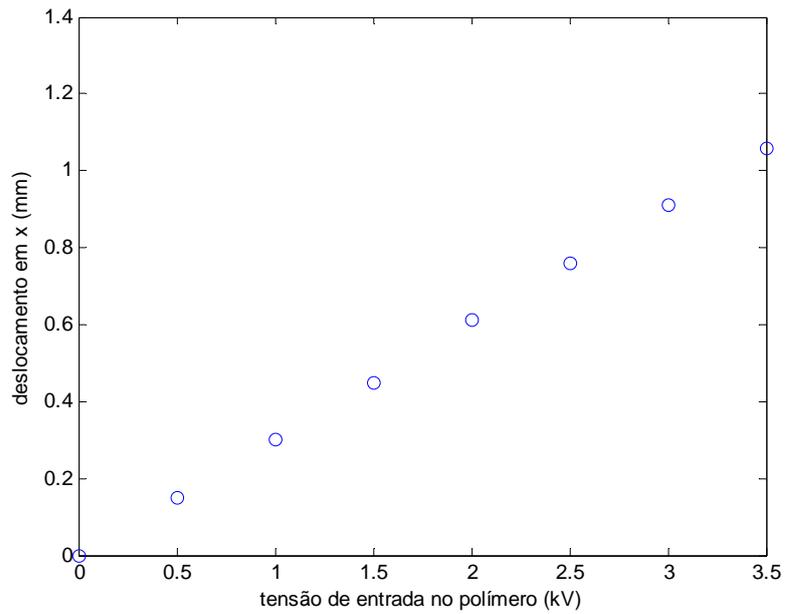


Figura 35: Gráfico de tensão x deslocamento na direção x da mesa xy

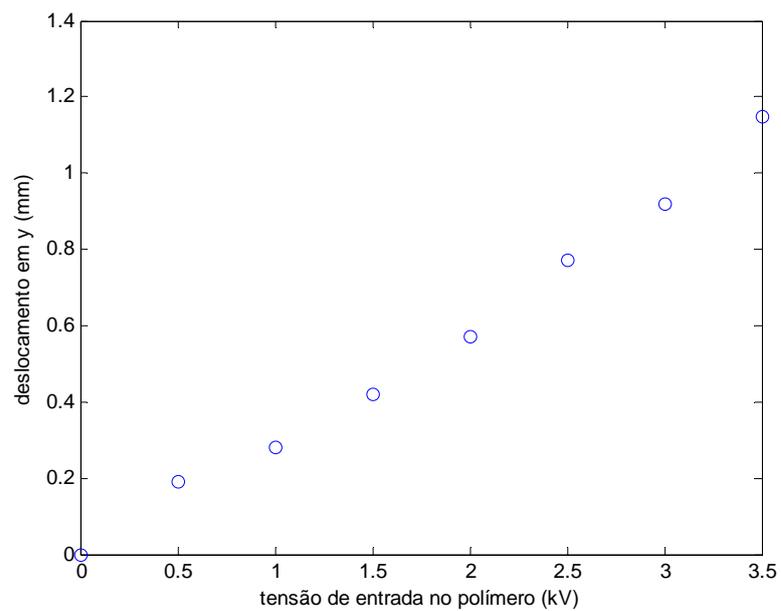


Figura 36: Gráfico de tensão x deslocamento na direção y da mesa xy

Agora, com o que foi definido anteriormente no item 4.5, os deslocamentos teóricos da peça central serão calculados. Esses cálculos estão apresentados na tabela a seguir e os dados utilizados são referentes ao experimento realizado e ao *datasheet* do polímero:

$$\Delta x = d_0 \left(\sqrt{\frac{Y}{Y - \varepsilon \varepsilon_0 \left(\frac{V^2}{\left(\frac{z_0}{\alpha_x \alpha_y} \right)^2} \right)} - 1} \right) = d_0 \left(\sqrt{\frac{170 \times 10^3}{170 \times 10^3 - 4,5 \times 8,85 \times 10^{-12} \left(\frac{V^2}{\left(\frac{0,5 \times 10^{-3}}{3 \times 6} \right)^2} \right)} - 1} \right) =$$

$$= d_0 \left(\sqrt{\frac{170 \times 10^3}{170 \times 10^3 - 39,83 \times 10^{-12} \left(\frac{V^2}{\left(\frac{0,5 \times 10^{-3}}{18} \right)^2} \right)} - 1} \right) = d_0 \left(\sqrt{\frac{170 \times 10^3}{170 \times 10^3 - 39,83 \times 10^{-12} \left(\frac{V^2}{\left(7,72 \times 10^{-10} \right)^2} \right)} - 1} \right) =$$

$$= d_0 \left(\sqrt{\frac{170 \times 10^3}{170 \times 10^3 - 39,83 \times 10^{-2} \left(\frac{V^2}{7,72} \right)} - 1} \right)$$

Tensão aplicada ao polímero (kV)	Deslocamento na direção x (mm)	Deslocamento na direção y (mm)
0,0	0,00	0,00
0,242	0,18	0,19
0,465	0,69	0,72
0,712	1,74	1,83
0,965	3,61	3,79
1,180	6,32	6,64
1,413	11,86	12,45
1,639	26,53	27,86

Figura 37: Tabela dos deslocamentos teóricos nas direções x e y

7.2_ Discussões Finais

Analisando-se o experimento 1 pode-se afirmar que o tamanho do eletrodo de graxa condutora tem efeito sobre o deslocamento do disco central, neste caso podemos notar que como ambos os eletrodos possuem o mesmo tamanho, os deslocamentos gerados são muito parecidos, só não são iguais devido aos erros experimentais na hora da medição do deslocamento pelo método gráfico utilizado.

Analisando-se agora o experimento 2 pode-se afirmar que diferenças no tamanho ou forma do eletrodo irão gerar deslocamentos diferentes em cada uma das direções, especialmente para voltagens próximas do ponto de ruptura do polímero.

Agora, analisando-se os dois experimentos em conjunto é possível afirmar que a diferença no pré-tensionamento possibilitou que se alcançasse um deslocamento maior para a voltagem de 3,5 kV de pico de saída do flyback no experimento 1, logo se o importante for uma ampla faixa de deslocamentos o pré-tensionamento do polímero em ambas as direções x e y deve ser pequeno. Por outro lado, se são necessários pequenos deslocamentos deve-se pré-tensionar o polímero aumentando sua área inicial em várias vezes como foi confirmado no experimento 2.

Analisando-se os resultados teóricos obtidos pode-se afirmar que as aproximações feitas para efeito de facilitar o cálculo geraram erros muito significativos, especialmente no experimento 2, o que resultou num deslocamento de mais de 26 mm que nem é possível devido às restrições geométricas da moldura fixa circular utilizada, que possui um diâmetro interno de 60,5 mm e o disco central possui um diâmetro de 19 mm, logo o deslocamento máximo permitido na geometria é de 20,75 mm, além do fato de não ser coerente com os pequenos deslocamentos visíveis experimentalmente. No geral, os resultados teóricos não confirmaram as afirmações feitas acima sobre os dados experimentais, que por sua vez também possuem erros significativos devido ao método gráfico basicamente visual utilizado na medição dos deslocamentos.

8_ Conclusão e Trabalhos Futuros

O objetivo dos experimentos alvo deste trabalho foram alcançados e estão neste apresentados na forma das figuras 31, 32, 35 e 36 que apresentam os deslocamentos gerados em relação à voltagem de entrada que é transmitida ao polímero através do circuito acionador.

Ainda é necessário se compreender vários dos aspectos que envolvem o uso de polímeros dielétricos como atuadores, mas com os resultados deste trabalho é possível entender porque eles são tão estudados e cobçados no ramo atual de engenharia dos materiais, pois suas propriedades permitem que ele gere deformações de ordem de grandeza pequena.

A ordem de grandeza dos deslocamentos da ordem dos milímetros que foram encontrados durante os experimentos realizados é uma descoberta importante, pois no futuro permitirá a fabricação de micro-dispositivos com precisão, utilizando como atuador um equipamento leve, barato e de fácil utilização e fabricação.

Como trabalhos futuros sugere-se o estudo da dinâmica do sistema do polímero, a reavaliação das aproximações feitas para se determinar o deslocamento teórico, a elaboração de uma malha de controle de deslocamento baseado nesta classe de atuadores e melhorias gerais nas condições do experimento, por exemplo, fazer uma mesa de apoio xy movida por motor DC, comprar alguns componentes eletrônicos como o conversor DC-HVDC da EMCO E101 para substituir o circuito de acionamento por um elemento mais confiável e substituir o método gráfico visual de medição do deslocamento utilizado por um método acessorado por software e uma câmera fixa.

Bibliografia

- [1] Chiba S., “Laboratory Introduction”, em *Worldwide R&D*, pp 4-5.
- [2] Pelrine R., Kornbluh R., Joseph J., Heydt R., Pei Q., Chiba S., “High-field Deformation of Elastomeric Dielectrics for Actuators”, em *Materials Science and Engineering C*, Volume 11, pp 89-100.
- [3] Bar-Cohen Y., “Eletroactive Polymers as Artificial Muscles: Reality and Challenges”, em *Proceedings of the 42nd AIAA Structures, Structures Dynamics and Materials Conferences (SDM)*, encontrado no site da internet: <http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=885>.
- [4] Wingert A. R., “Development of a Polymer-Actuated Binary Manipulator”, Submitted to the Department of the Requirements for the Degree of Master of Science in Mechanical Engineering at the Massachusetts Institute of Technology, June 2002.
- [5] Sommer-Larsen P., Kofod G., MH S., Benslimane M., Gravesen P., “Performance of Dielectric Elastomer Actuator and Materials”, in *Smart Structure and Materials 2002: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, Yoseph Bar-Cohen, Editor, Proceedings of the SPIE Vol. 4695, pp.158-166.
- [6] Blois P., “Desenvolvimento de Circuitos para Músculos Artificiais Poliméricos por Efeito Capacitivo”, Submetido ao Departamento de Graduação de Engenharia de Controle e Automação da PUC-Rio, dezembro 2004.
- [7] Pelrine R. E., Kornbluh R. D., Joseph J. P., “Electrostriction of Polymer Dielectrics with Compliant Electrodes as a Means of Actuation”, em *Sensors and Actuators A*, Volume 64, pp 77-85.
- [8] Pelrine R., Kornbluh R., Pei Q., Stanford S., Oh S., Eckerle J., “Dielectric Elastomer Artificial Muscle Actuators: Toward Biomimetic Motion”, in *Smart Structure and Materials 2002: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, Yoseph Bar-Cohen, Editor, Proceedings og SPIE Vol. 4695, pp.126-137.

- [9] Kofod G., Sommer-Larsen P., Kornbluh R., Pelrine R., “Actuation Response of Polyacrylate Dielectric Elastomers”, em *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Volume 14, pp 787-793.
- [10] Dow Corning internet site, <http://www.dowcorning.com/>, 2004.
- [11] EMCO High Voltage Corporation internet site <http://www.emcohighvoltage.com/>, 2002.
- [12] Bastos A., Fernandes S., “Manutenção de Fontes Chaveadas”, Rio de Janeiro, Antenna Edições Técnicas Ltda, 2004.
- [13] Brites P., “Flybacks & Circuito de Deflexão Horizontal”, Rio de Janeiro, Antenna Edições Técnicas Ltda, 2002.
- [14] Halliday D., Resnick R., Walker J., “Fundamentos de Física 3: Eletromagnetismo”, traduzido e revisado por Denise Helena da Silva Sotero e Gerson Bazo Costamilan, Rio de Janeiro, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1996.
- [15] Datasheet do polímero, encontrado em <http://www.3m.com>

Apêndice



www.fairchildsemi.com

LM555/NE555/SA555 Single Timer

Features

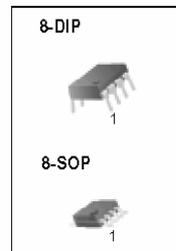
- High Current Drive Capability (200mA)
- Adjustable Duty Cycle
- Temperature Stability of 0.005%/°C
- Timing From μSec to Hours
- Turn off Time Less Than $2\mu\text{Sec}$

Applications

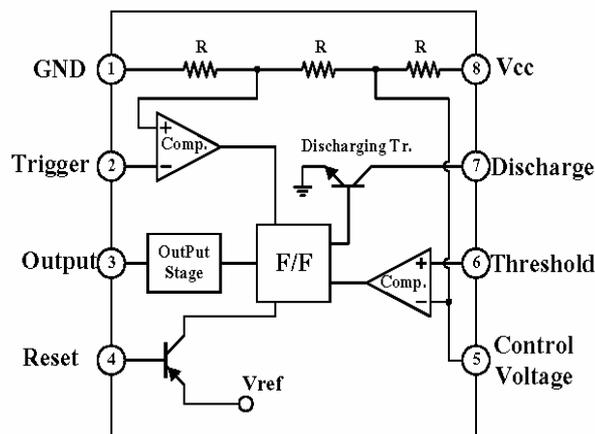
- Precision Timing
- Pulse Generation
- Time Delay Generation
- Sequential Timing

Description

The LM555/NE555/SA555 is a highly stable controller capable of producing accurate timing pulses. With monostable operation, the time delay is controlled by one external resistor and one capacitor. With astable operation, the frequency and duty cycle are accurately controlled with two external resistors and one capacitor.



Internal Block Diagram



Rev. 1.0.2

©2002 Fairchild Semiconductor Corporation