



**Desenvolvimento de Circuitos para Músculos Artificiais
Poliméricos por Efeito Capacitivo.**

Pedro Ferreira da Costa Blois de Assis - 9915432

*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 assim como incentivos que me fizeram superar momentos difíceis encontrados no final do prazo de entrega determinado. São elas Douglas Éden Ferrari (Gerente Geral da ITM), Dr. Guilherme Cortes (pesquisador da USP), a empresa M&D - Monitoração e Diagnose, Prof. Marco A. Meggiolaro (Mecânica), Prof. Francisco Rubens (Elétrica), Ricardo Flach Latorre Moreno, Júlio Quadrio Guedes, Felipe Scofano, Eduardo Azevedo Revoredo, Washington Loyello e a minha família.

Resumo

Aplicações futuras de sistemas robóticos necessitarão de dispositivos e componentes simples, robustos, leves, baratos e de fácil controle, assim como futuras próteses para deficientes físicos. As próteses atuais são muito pesadas, pouco funcionais e nada anatômicas devido à utilização de motores elétricos como atuadores, inviabilizando um *design* antropomórfico, além de consumirem muita energia. Atuadores binários reduzem muito a complexidade de um sistema por terem apenas dois estados discretos para cada grau de liberdade. Um grande número de atuadores binários é necessário para um manipulador ter um comportamento similar ao de um sistema contínuo, no entanto os atuadores convencionais impedem o desenvolvimento de robôs binários práticos. Atuadores com elastômeros dielétricos possuem altas densidades de energia e grandes deformações em resposta aos estímulos aplicados e podem servir na construção de práticos robôs binários [Bar-Cohen, 2002]. Eles possuem um comportamento semelhante ao dos músculos por terem sua forma alterada quando submetidos a uma tensão elétrica.

Este trabalho visa desenvolver circuitos de acionamento de alta voltagem para atuadores poliméricos binários, e.g. para os atuadores concebidos na tese de mestrado de Andreas R. Wingert [2002], pós-graduado pelo MIT (Massachusetts Institute of Technology) em engenharia mecânica. Foi desenvolvido e implementado com sucesso um conversor DC-DC que eleva de 30V a 12kV e com ele pode-se reproduzir testes básicos de deformação do polímero para diferentes espessuras do mesmo.

Abstract

Future applications for robotic systems will require devices and components that are simpler, more robust, lightweight, inexpensive and easy to control, such as for future prosthesis for limb handicaps. Present active prostheses are heavy and non-anatomic due to the actuators (motors) used, preventing an anthropomorphic design and demanding lots of energy. Binary actuators reduce the complexity of a system by having only two discrete states for each degree of freedom. To reach behavior similar to a continuous system, a high number of binary actuators is required, however current actuators prevent practical binary system development. Dielectric elastomer actuators exhibit high energy densities and large displacement responses due to electrical stimulation and might be useful in practical binary robots. These actuators have muscle-like behavior by having their geometry changed as a voltage is applied.

This work intends to develop high-voltage circuits to power binary polymer-based actuators, such as the ones proposed by Andreas R. Wingert [2002] in “Development of a Polymer-Actuated Binary Manipulator” at MIT (Massachusetts Institute of Technology) for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering. A high voltage DC-DC converter was developed and implemented to produce output voltages from 400V to 12kV from a 30V input. Basic strain tests were reproduced with success for different polymers with different thicknesses.

Índice

Agradecimentos	2
Resumo	3
Abstract.....	4
Índice	5
Índice de figuras	6
1_ Introdução.....	7
2_ Tecnologia de Atuadores.....	10
3_ Projeto do Módulo Atuador.....	15
3.1_ Princípios básicos do atuador	15
3.2_ Elastômeros	17
3.3_ Rigidez dielétrica.....	18
3.4_ Capacitância	19
3.5_ Eletrodos.....	20
4_ Desenvolvimento do Sistema Elétrico de Acionamento	21
4.1_ Aparelho de defesa pessoal.....	21
4.2_ Conversor DC-DC	23
5_ Validação Experimental	33
5.1_ Uma camada de polímero VHB 4905	34
5.2_ Quatro camadas de polímero VHB 4910.....	36
5.3_ Duas tiras lado-a-lado com quatro camadas de polímero VHB 4910	38
6_ Resultados Obtidos e Discussões	41
7_ Conclusões e Trabalhos Futuros.....	46
Bibliografia.....	47
Apêndices	49

Índice de figuras

Figura 1: Princípio de funcionamento de um atuador de polímero dielétrico.....	11
Figura 2: Manipulador binário com atuadores de polímero dielétrico (BRAID).....	13
Figura 3: Forças eletrostáticas atuando no polímero.....	15
Figura 4: Aparelho de descarga elétrica para defesa pessoal.....	22
Figura 5: Fonte 30V DC utilizada.....	23
Figura 6: Esquemático do circuito conversor DC-DC implementado.....	25
Figura 7: Transistor BU508D separado do circuito oscilador.....	26
Figura 8: Circuito gerador de onda quadrada montado na protoboard.....	26
Figura 9: Conversor DC-DC implementado.....	27
Figura 10: Esquemático do flyback HR7839 da HR DIEMEN.....	29
Figura 11: Esquemático para descobrir o terra do enrolamento secundário.....	30
Figura 12: Esquemático para descobrir os pinos do enrolamento primário.....	30
Figura 13: Esquemático para descobrir a polaridade do enrolamento primário.....	31
Figura 14: Esquema dos pinos do flyback.....	31
Figura 15: Flyback OV2076/M utilizado no projeto.....	32
Figura 16: Primeira armação de teste da performance do atuador.....	34
Figura 17: Armação do teste de moldura fixa.....	36
Figura 18: Segunda armação de teste da performance do atuador.....	38
Figura 19: Disposição das quatro tiras de polímeros para o terceiro teste.....	39
Figura 20: Terceira armação de teste da performance do atuador.....	40
Figura 21: Teste de moldura fixa sem tensão aplicada.....	41
Figura 22: Teste de moldura fixa com tensão de aproximadamente 6,5kV aplicada.....	42
Figura 23: Teste de moldura fixa com VHB 4910 sem tensão aplicada.....	44
Figura 24: Teste de moldura fixa do VHB 4910 com tensão aplicada.....	44
Figura 25: Momento em que o dielétrico se rompe devido a alta tensão.....	45

1_ Introdução

A "suposta invalidez" das pessoas portadoras de deficiência, bem como com a possibilidade de sua auto-suficiência, é uma preocupação da sociedade há algum tempo. Entretanto, lenta, pausada e repleta de obstáculos, vem sendo a efetiva inserção dessas pessoas especiais no mercado de trabalho, mas não por falta de normas, visto que o Brasil – onde segundo a ONU, 10% da população é portadora de algum tipo de deficiência – é o país detentor da legislação mais completa da Íbero-América, na área de apoio a essas pessoas especiais [Mendonça, 2003].

Nossa legislação incentiva a preparação das pessoas portadoras de deficiência (PPD's) para o mercado de trabalho, permitindo-lhes a inserção no grupo das pessoas economicamente ativas. Existem muitos dispositivos na nossa constituição que garantem às PPD's o direito a um convívio social equilibrado, o direito social ao trabalho, bem como proibição de qualquer tipo de discriminação, ainda que no que diz respeito a salários e critérios de admissão. Diversas leis protegem seus direitos, inclusive garantindo sua inclusão no mercado de trabalho e punindo com rigor o preconceito por eles sofrido referente aos seus defeitos [Mendonça, 2003].

As próteses, existentes no mercado atualmente, são muito pesadas e consomem muita energia, sem falar no seu alto custo. Isso faz com que a PPD ainda tenha seus movimentos restringidos tanto à amplitude quanto à velocidade. Para as pessoas com baixo poder aquisitivo essas próteses são inviáveis, restando apenas as mais simples de madeira ou plástico passivas. Com isso a inclusão dessas PPD no mercado de trabalho se torna muito difícil, apesar de parte da sua função motora perdida ter sido recuperada e do direito previsto na Constituição ao trabalho.

O desenvolvimento de músculos artificiais à base de polímeros possibilita uma nova geração de próteses mais leves, baratas, versáteis, econômicas, anatômicas e funcionalmente mais próximas ao membro perdido. O paciente poderá então se aproximar ainda mais das suas atividades corriqueiras sem os inconvenientes de ter que depender de motores elétricos acoplados ao corpo.

O conceito de robôs binários foi introduzido no final da década de 60, início dos anos 70. Com o crescente poder computacional acompanhado na última década, a análise, controle e planejamento de robôs binários com um grande número de graus de liberdade tornou-se exequível. O controle de um manipulador binário é diferente na sua concepção se comparado a um manipulador contínuo. Como exemplo temos que a cinemática inversa de um manipulador binário requer uma busca através de um conjunto discreto de configurações. Para um sistema com muitos graus de liberdade, essa procura exaustiva do espaço de busca torna-se impraticável, no entanto algoritmos genéticos reduziram drasticamente o tempo de processamento [Wingert, 2002].

Alguns trabalhos experimentais foram feitos sobre manipuladores redundantes. Como exemplo temos um grande manipulador constituído por uma armação de geometria variável (VGT) composto por atuadores pneumáticos. Os movimentos binários eram conseguidos guiando cada atuador através de dois anteparos mecânicos. Um exemplo de manipulador hiper redundante é uma estrutura VGT com formato de cobra de 30 graus de liberdade que usa servo-motores DC [Wingert, 2002]. No entanto, essas estruturas só são factíveis para um número muito limitado de graus de liberdade. Poucos trabalhos foram desenvolvidos para a concepção de manipuladores binários com um design mais simples, leves e robustos.

Este trabalho visa o desenvolvimento de circuitos de alta voltagem para o acionamento de um manipulador binário constituído de um atuador de polímero dielétrico. Nestes atuadores, 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 mesmo causa uma diminuição da espessura e aumento de área do filme, gerando movimentos.

A estrutura do atuador proposta neste trabalho difere um pouco dos atuadores poliméricos tradicionais, tendo em vista que serão utilizadas mais camadas de polímeros e uma tensão de alimentação maior que a usual, acima de 10kV. Pretende-se com isso estudar a possibilidade de se obter atuadores com maior capacidade de carga.

Atuadores binários simplificam muito o *design* de um manipulador a partir do momento que seus graus de liberdade possuem apenas dois estados discretos, tornando

desnecessário um controle com realimentação. Um sistema contínuo pode ser aproximado pela utilização de vários atuadores binários, substituindo assim os atuadores convencionais que tornavam muito complexos robôs hiper redundantes.

Atuadores de polímeros dielétricos possuem uma grande densidade de energia e grandes deslocamentos como resposta. Esses atuadores pertencem à classe de polímeros eletroativos (EAP) e possuem um comportamento semelhante ao do músculo já que a sua geometria é modificada quando submetida a uma tensão.

O objetivo deste trabalho é desenvolver circuitos de acionamento e testar uma nova abordagem para os atuadores poliméricos. Pretende-se atingir maiores quantidades de energia mantendo-se as características principais do atuador que são a simplicidade, leveza e baixa excitação. Será apresentado o *design* e a performance desse atuador em testes simples de força e deformação demonstrando a conveniência desses polímeros dielétricos.

No capítulo 2 apresentam-se as tecnologias dos atuadores chamados “músculos artificiais” existentes hoje em dia mostrando o avanço que a tecnologia tem mostrado na busca por dispositivos capazes de substituir o músculo humano. No capítulo 3 é mostrado o projeto do atuador polimérico de efeito capacitivo incluindo os princípios básicos de funcionamento assim como uma descrição detalhada sobre os componentes constituintes do atuador. No capítulo 4 encontra-se o desenvolvimento do sistema de acionamento do atuador incluindo as duas alternativas abordadas e testadas. No capítulo 5 são descritos os procedimentos replicados com o polímero a fim de testar os sistemas de acionamento desenvolvidos (as duas abordagens sugeridas). No capítulo 6 discorre-se sobre os resultados obtidos ao testar os sistemas de acionamento desenvolvidos incluindo discussões sobre os possíveis motivos dos sucessos e fracassos durante os experimentos. Finalmente no capítulo 6 encontram-se as conclusões tiradas a partir dos resultados obtidos e sugestões para trabalhos futuros idealizadas de acordo com as oportunidades vistas durante os testes.

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 [Wingert, 2002]. 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 [Wingert, 2002].

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 [Wingert, 2002]. 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% [Wingert, 2002]. 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 [Wingert, 2002]. Existem também polímeros em forma de gel que incham quando submetidos a uma voltagem.

A tecnologia de atuadores utilizada em robôs binários abordada nesse trabalho será a de polímeros dielétricos (elastômeros). O princípio de funcionamento é simples e é

mostrado na **Figura 1**. 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 mesmos 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.

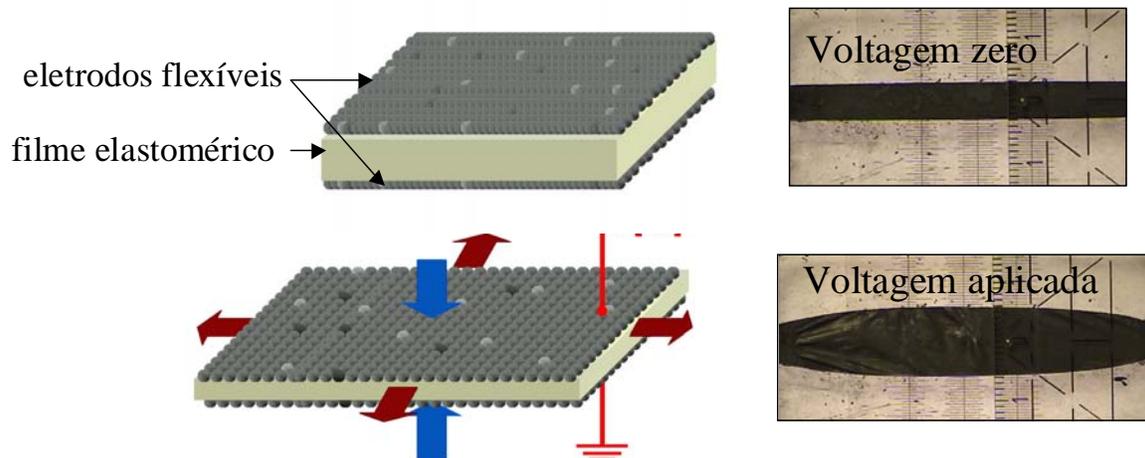


Figura 1: Princípio de funcionamento de um atuador de polímero dielétrico [Wingert, 2002].

Estudos com polímeros dielétricos são feitos desde 1992 pelos EUA [Wingert, 2002]. 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 [Sommer-Larsen et al., 2002].

Esses elastômeros dielétricos têm sido testados como atuadores lineares, auto-falantes e geradores, dentre outros [Wingert, 2002]. Diferentes configurações geométricas convertem a expansão de área do filme em deslocamentos lineares. Como exemplo, pode-se confinar o filme entre duas molduras planas articuladas. Nesse caso, a direção de movimento do atuador 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 [Wingert, 2002]. 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.

As tecnologias de atuadores mencionadas acima têm sido usualmente referenciadas como músculos artificiais. Enquanto a literatura não consegue chegar a um consenso para a definição exata de um músculo artificial, de maneira geral podemos dizer que o mesmo consiste em um atuador que apresente um comportamento semelhante à de um músculo, ou seja, um material que responda mecanicamente a um estímulo elétrico [Bar-Cohen, 2002]. Uma definição menos ampla seria apenas considerar materiais cuja performance seja independente da escala, logo um grande atuador seria considerado como a combinação de pequenos outros. Desconsiderando as limitações da fabricação, esses materiais funcionam numa escala muito pequena, em contraste com atuadores hidráulicos ou motores elétricos, que têm sua eficiência diretamente proporcional ao tamanho.

Pesquisadores quantificam a performance dos atuadores utilizando parâmetros como deformação, tensão, velocidade, densidade de energia, densidade de potência e eficiência. Apesar da abundância de valores adquiridos, deve-se ter cuidado ao comparar as várias tecnologias de atuadores. Nenhum procedimento padrão de medição desses parâmetros foi adotado, sendo que todos os valores medidos foram alcançados sob condições ideais

implicando, portanto, que sob condições práticas de uso esses valores podem não ser logrados.

Entretanto, existem bons motivos que justificam a escolha do atuador de polímero dielétrico para robôs binários. Comparando o mesmo com a liga de memória de forma e polímeros condutores, polímeros dielétricos conseguem maiores deformações (acima de 380% relatados em [Wingert, 2002]). 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 alta performance em termos de densidade de energia e velocidade de resposta e podem ser feitos de materiais comuns e baratos [Wingert, 2002].

Estudos sobre atuadores de polímeros dielétricos e robôs binários têm sido feitos independentemente um do outro. A união dessas duas tecnologias possibilita o desenvolvimento de robôs leves, baratos e de fácil controle. Na **Figura 2** uma representação conceitual dessa união de tecnologias é mostrada. O BRAID é usado como demonstração de algumas das tecnologias-chave possivelmente importantes para futuros robôs.

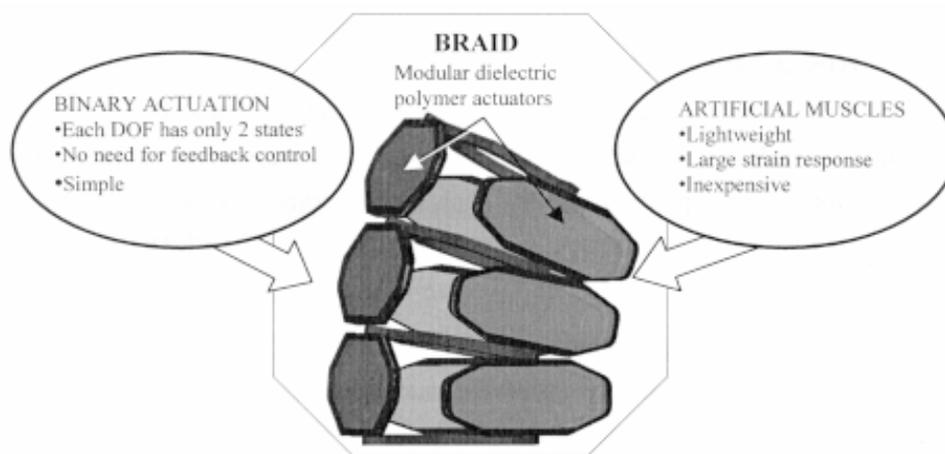


Figura 2: Manipulador binário com atuadores de polímero dielétrico (BRAID) [Wingert, 2002].

No próximo capítulo será descrito o desenvolvimento dos módulos de atuadores binários. Sob as condições ideais do laboratório, os atuadores de polímero dielétrico alcançaram densidades de energia muito altas, excedendo às de tecnologias convencionais

como eletroímãs. A performance 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.

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. Baseado neste modelo, o atuador será ajustado para alcançar uma performance apropriada a um robô binário.

3.1_ Princípios básicos do atuador

O polímero dielétrico que separa os eletrodos sofre uma pressão eletrostática quando uma voltagem é aplicada nos mesmos. Duas componentes dessa força contribuem para a deformação do filme elástico. As cargas opostas nos eletrodos se atraem, gerando uma compressão na direção correspondente à espessura do filme. Por outro lado, as cargas similares, contidas em cada eletrodo, se repelem causando uma distensão do filme nas direções correspondentes ao comprimento e largura, como mostra a **Figura 3**.

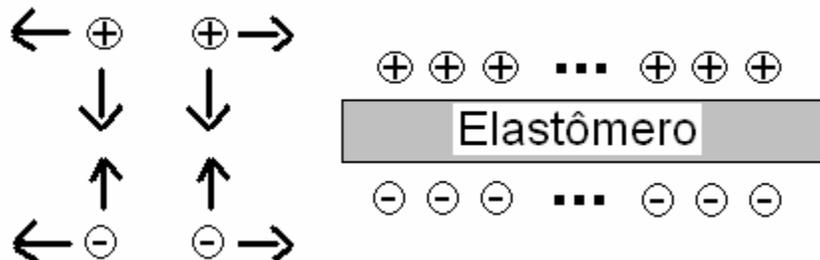


Figura 3: Forças eletrostáticas atuando no polímero.

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

$$(1 + s_x)(1 + s_y)(1 + s_z) = 1 \quad (1)$$

onde s_x , s_y e s_z são as deformações nas três direções, sendo que a deformação na direção i é dada pela equação abaixo:

$$s_i = \frac{l}{l_0} - 1, \quad (2)$$

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 e é dada pela equação abaixo:

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

onde ε é a constante dielétrica do material, ε_0 é a permissividade do meio e E é o campo elétrico aplicado, dado pela razão entre a voltagem aplicada V e a espessura do polímero z .

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

$$s_z = -\frac{p}{Y} = -\varepsilon \varepsilon_0 \frac{E^2}{Y} = -\frac{\varepsilon \varepsilon_0}{Y} \left(\frac{V}{z} \right)^2 \quad (4)$$

onde Y é o módulo de Young do polímero [Wingert, 2002]. 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 (s_a) do polímero pode ser derivada da equação 1, resultando em:

$$s_a = \frac{1}{1 + s_z} - 1 = \frac{1}{1 - \frac{p}{Y}} - 1 = \frac{p}{Y - p} \quad (5)$$

3.2_ Elastômeros

O componente chave do atuador proposto é o elastômero (classe de polímero que tem 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 [Pelrine et al., 2002].

O polímero usado é o VHBTM 4910 (*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 1mm. 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. Esse material tem demonstrado a maior densidade de energia de deformação quando usado como atuador dielétrico [Pelrine et al., 2002]. 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.

3.3_ Rigidez dielétrica

A máxima pressão efetiva que pode ser alcançada por um material é dada por:

$$p_{\max} = \varepsilon\varepsilon_0 (E_{\max})^2 \quad (6)$$

onde E_{\max} é a rigidez dielétrica do polímero. 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 a performance do atuador. A rigidez dielétrica é uma propriedade do material, e para os polímeros ela varia significativamente com a pré-distensão do material [Pelrine et al., 2002]. Uma caracterização detalhada do polímero VHB™ 4910 foi publicado por *RISO* [Wingert, 2002]. A rigidez dielétrica de uma amostra não deformada é 18MV/m, e quando deformadas 500% nas duas direções planas esse valor sobe para 218MV/m [Wingert, 2002]. Essa pré-distensão aumenta a máxima pressão efetiva atingida por um fator de mais de duas ordens de grandeza.

De acordo com a (6, a máxima pressão independe da espessura do filme. Um filme mais grosso pode suportar maiores voltagens, mas a maior razão entre a voltagem e espessura permanece a mesma.

3.4_ Capacitância

Eletricamente, o atuador de polímero dielétrico se comporta como um capacitor, que na sua forma mais básica consiste num par de condutores que armazenam cargas separadas. A capacitância é definida como:

$$C \equiv \frac{Q}{V} \quad (7)$$

onde Q é a carga elétrica. No caso dos atuadores de polímeros dielétricos, essa carga é armazenada nos eletrodos. O atuador pode ser modelado como um capacitor de placas paralelas, onde cada placa tem área A_{xy} , e ambas são separadas por um dielétrico de espessura z . A capacitância é dada por:

$$C = \frac{Q}{V} = \epsilon\epsilon_0 \frac{A_{xy}}{z} \quad (8)$$

Já que o atuador sofre mudanças na sua geometria quando a voltagem é aplicada, tanto a área A_{xy} e a espessura z variam significativamente. A permissividade do ar é constante e igual a 8.85×10^{-12} F/m. A constante dielétrica do meio é função do material que separa as cargas. A capacitância cresce como resultado da inserção de um material isolante (no caso o polímero) entre os eletrodos. No nível microscópico, a capacitância aumenta com o alinhamento dos dipolos no isolante com o campo elétrico externo [Wingert, 2002].

A constante dielétrica tende a cair com a distensão do polímero. Uma possível explicação é que a deformação do polímero inibe alinhamento dos dipolos com o campo elétrico. O polímero VHBTM 4910 tem sua constante dielétrica diminuída de 4.7 para 4.5 quando esticado de 0% para 400% em ambas as direções planas [Wingert, 2002]. No entanto essa mudança tem pouco impacto na pressão efetiva máxima.

3.5_ 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 Corning™* [Dow Corning, 2004].

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 [Wingert, 2002].

No próximo capítulo discute-se o sistema elétrico de acionamento desenvolvido neste trabalho.

4_ Desenvolvimento do 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. Conversores DC-DC são comercializados por empresas como EMCO e Matsusada, e possuem uma saída de 0V à 30kV [EMCO, 2002; Matsusada, 2000]. Para aplicações de baixa potência como neste trabalho, esses conversores podem ser bem compactos. O modelo Q101-5 da EMCO tem uma saída de até 10kV com um formato de um cubo de 22mm de lado. Seu ganho é fixo em 2000, logo sua saída é regulada pela variação da entrada. Na entrada do conversor pode ser usada uma bateria de 9V com uma resistência variável.

No entanto, esses conversores não se encontram disponíveis no mercado brasileiro, e sua importação tem custos elevados. Duas linhas foram adotadas para conseguir a voltagem necessária com sistemas de baixo custo. A primeira delas foi adquirir um aparelho de choque usado em defesa pessoal, que fornece em torno de 150kV, e reduzir a tensão até conseguir o valor desejado. A outra idéia foi construir um circuito que fornecesse a tensão desejada a partir de uma bateria de 9V e uma fonte de DC de 30V.

4.1_ Aparelho de defesa pessoal

Na primeira das soluções adquiriu-se um aparelho elétrico de alta voltagem utilizado em defesa pessoal, encontrado facilmente em lojas de produtos de mesmo fim. O aparelho comprado foi o *Electric fire M-150K* da ITM Eletrônica e Telecomunicações Ltda [ITM, 2004]. Este aparelho é utilizado como defesa pessoal, policiamento em geral (indicado para uso em desordens públicas onde armas convencionais são perigosas e ineficazes), carteiros e tomadores de contas de água e luz (para defesa contra animais ferozes) e fazendeiros e sitianteiros (para lidar com gado e rebanhos em geral). O dispositivo produz 150kV a partir de uma bateria de 9V, mas como a mesma possui baixa potência, a amperagem na saída do aparelho é ínfima (da ordem de 2 μ A), não conseguindo portanto gerar danos físicos às

peessoas. Uma pequena rajada de um quarto de segundo numa pessoa causa pequena contração muscular e um grande efeito inibidor. Uma rajada moderada de 1 a 4 segundos pode levar o receptor ao chão e causar alguma confusão mental, o que pode levar o receptor a desistir do ataque, mas este ainda está apto a levantar-se quase que imediatamente. Uma rajada contínua de 5 segundos ou mais pode imobilizar o receptor, causar desorientação, perda de equilíbrio, queda, fraqueza e entorpecimento por alguns minutos. As únicas pessoas que correm risco de vida ao receber um choque deste aparelho são portadores de doenças cardiovasculares ou cerebrais e hipertensos. A figura abaixo apresenta o aparelho comprado.

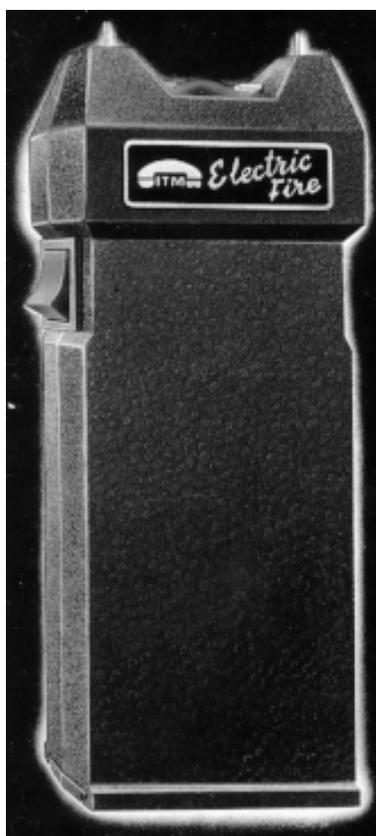


Figura 4: Aparelho de descarga elétrica para defesa pessoal.

Informações do fabricante do aparelho revelaram que internamente tem-se um *spike* por volta dos 800V que incide sobre uma bobina de alta tensão com em torno de 1000 espiras. Devido ao efeito corona, as centelhas tendem a se dividir na saída. E quanto mais tensão se tem na entrada, maior o número de centelhas, sendo que estima-se que cada

centelha tenha por volta de 50kV. Com base nisso concluiu-se que diminuindo-se a tensão de entrada provavelmente seria possível obter uma tensão de saída também menor.

Com o auxílio de uma fonte de tensão DC de 0-30V (Figura 5), alimentou-se o aparelho com uma tensão mínima de funcionamento do mesmo de 3,8V, onde foi observada apenas uma centelha na saída ocorrida com intervalos de tempo de 1 segundo aproximadamente entre elas. No entanto, as voltagens alcançadas por esse sistema (50kV) ainda são muito altas para os polímeros estudados, como será visto no capítulo de resultados. A seguir descreve-se o segundo sistema elétrico estudado para o acionamento dos polímeros, capaz de gerar tensões menos elevadas.

4.2_ Conversor DC-DC

Na segunda solução idealizada, foi montado um circuito que eleva os 30V da fonte para 12kV necessários no projeto. O componente principal do circuito é um flyback utilizado em televisores para alimentar os tubos de imagem.



Figura 5: 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.

Os componentes utilizados foram:

- Flyback OV2076/M;
- Circuito integrado NE555;
- Transistor BU508D;
- 2 resistores de $1k\Omega$ de $\frac{1}{4}W$;
- 2 resistores de 10Ω de $\frac{1}{4}W$;
- 1 potenciômetro de $4k7\Omega$ de $\frac{1}{4}W$;
- 2 capacitores eletrolíticos de $100\mu F - 63V$;
- 3 capacitores de cerâmica: 2 de $10\eta F - 1kV$ e 1 de $15\eta F - 250V$;
- Protoboard modelo MP-1680;
- Bateria Duracell alcalina 9V MN1604B1.

Os *datasheets* do NE555 e do BU508D se encontram no Apêndice. Abaixo pode-se ver o esquema do circuito implementado para o conversor, onde o flyback foi representado pelo símbolo de um transformador comum.

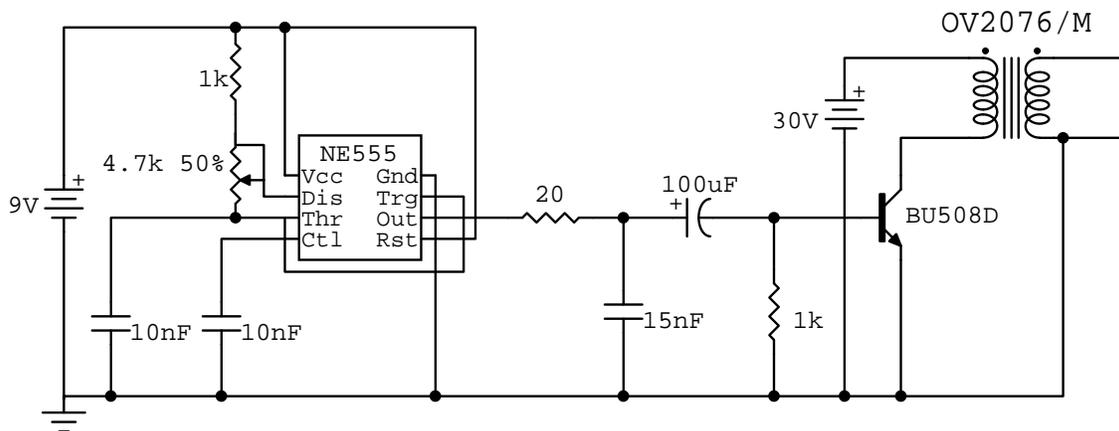


Figura 6: Esquemático do circuito conversor DC-DC implementado.

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 [Bogart, 2001]. 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 o terra [Sedra & Smith, 2000]. 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 8** mostra o circuito implementado numa *proto-board*.

O transistor, por estar chaveando tensões de até 30V, precisou ser separado do circuito oscilador afim de não danificar nenhum dos componentes nem a *proto-board* 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 7**.

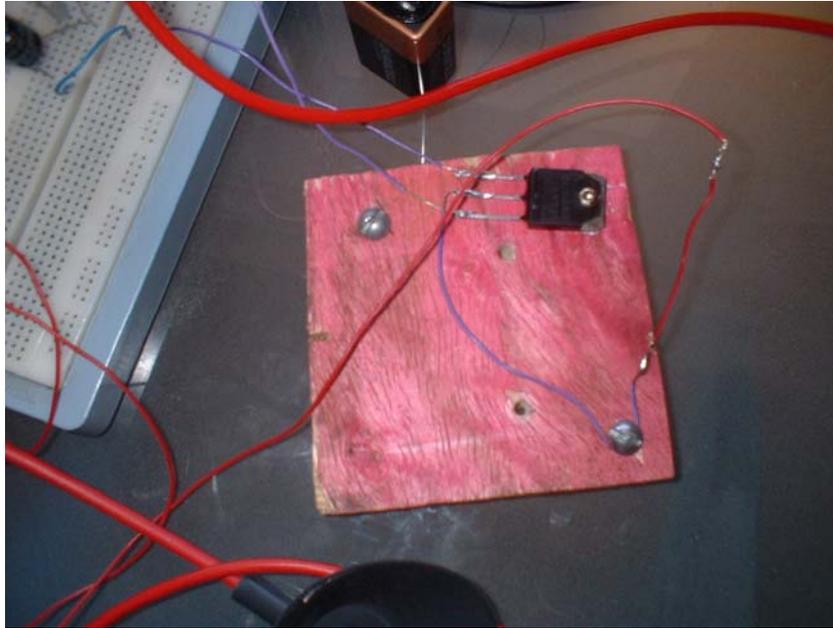


Figura 7: Transistor BU508D separado do circuito oscilador.

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

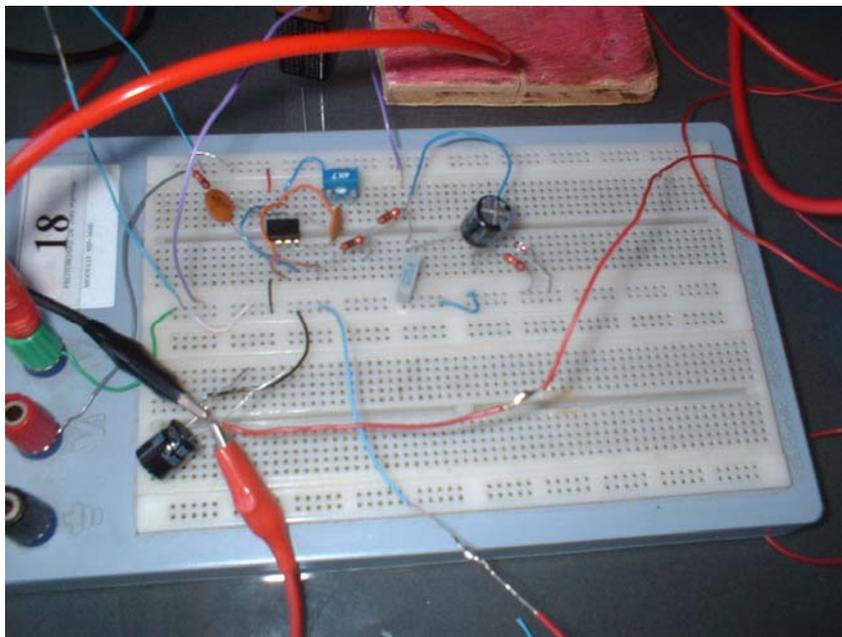


Figura 8: Circuito gerador de onda quadrada montado na protoboard.

Não foi possível medir a saída do flyback devido à falta de instrumentos capazes de suportar altas tensões da ordem de vários kV. Para fazer um divisor de tensão que transformasse 12kV em algo mensurável, seriam necessários componentes fisicamente grandes, pois a tensão é tão alta que arcos voltaicos são formados por cima de componentes comuns encontrados no mercado. Os cálculos abaixo mostram os componentes que seriam necessários para um divisor de tensão de 1000:1, com componentes de ¼W facilmente encontrados comercialmente.

$$P = \frac{V^2}{R}; R = \frac{12000^2}{0,25} = 576 \times 10^6 \Omega = 576 M\Omega$$

Sabendo-se que a razão $\frac{R2}{R1} = 1000$ temos que se R2 tem que ser de 576MΩ logo R1 seria de 576kΩ. No entanto comercialmente o máximo que se encontra no mercado nacional é de 10MΩ.

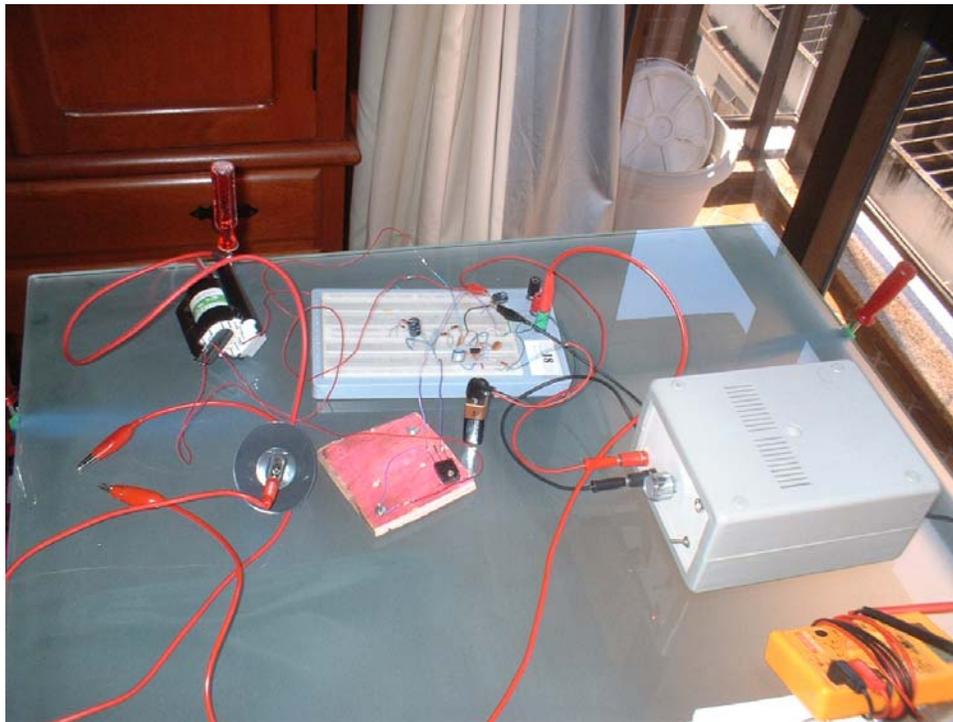


Figura 9: Conversor DC-DC implementado.

A estimativa que está sendo feita sobre o valor de saída do flyback está baseada nos experimentos feitos com o polímero, no qual conseguiram-se resultados semelhantes aos encontrados nos trabalhos de referência desta monografia. Com isso, levando-se em consideração que o polímero utilizado é o mesmo, seguiram-se os procedimentos descritos quanto à pré-deformação do polímero antes de ser aplicada a tensão. Uma vez que a graxa condutora também é a mesma, pode-se concluir que a tensão gerada pelo conversor se encontra na ordem das tensões publicadas em trabalhos anteriores.

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 [Bastos & Fernandes, 2004]. O flyback adquirido foi o OV2076/M da BRAS ALFA utilizado em televisores PHILIPS modelos PT578 e PT658. Apesar de ter contatado 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 abaixo.

- 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 no 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 o terra do enrolamento secundário.

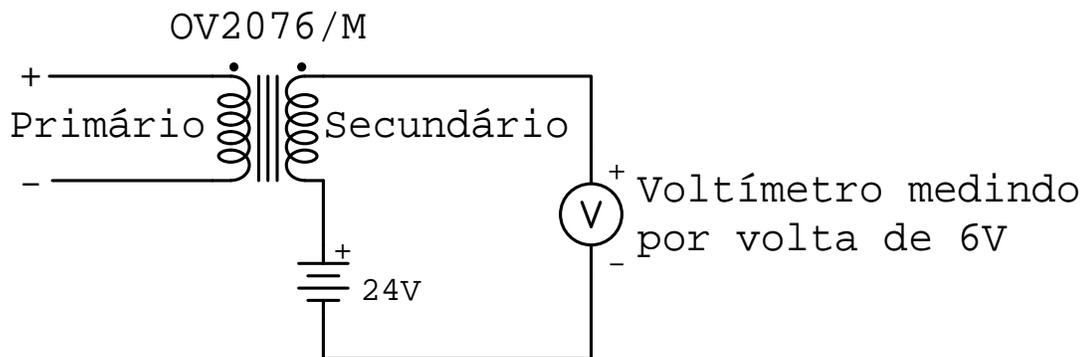


Figura 11: Esquemático para descobrir o terra do enrolamento secundário.

- 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.

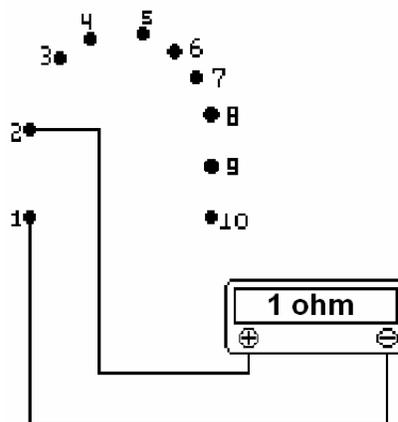


Figura 12: Esquemático para descobrir os pinos do enrolamento primário.

- 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).

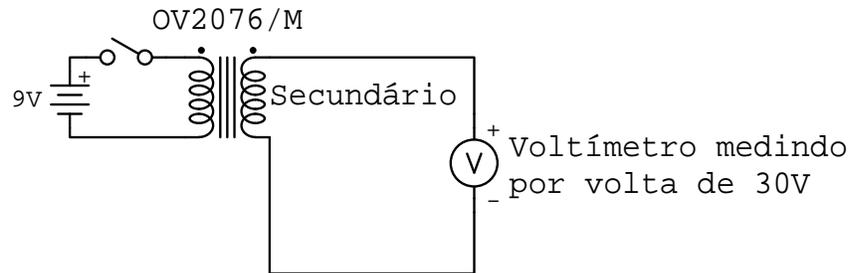


Figura 13: Esquemático para descobrir a polaridade do enrolamento primário.

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. No próximo capítulo, este sistema elétrico desenvolvido será utilizado no acionamento de músculos artificiais poliméricos.

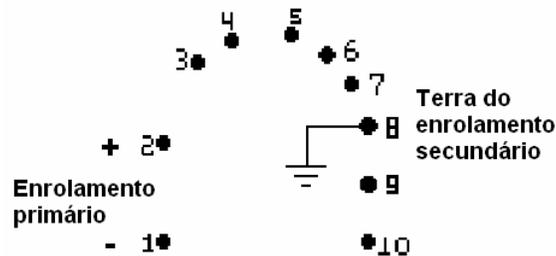


Figura 14: Esquema dos pinos do flyback.



Figura 15: Flyback OV2076/M utilizado no projeto.

5_ Validação Experimental

A **Figura 16** mostra um primeiro teste preparado para demonstrar as deformações do polímero quando aplicada uma tensão conforme foi explicado acima [Kornbluh et al., 1999]. O polímero é colocado entre quatro cubos de alumínio e então é esticado 400% nas duas direções onde dois pares de barras (um par de alumínio e outro de nylon) são colocados entre os cubos de forma a manter o polímero esticado. Uma pasta condutora é então aplicada nos dois lados, no centro e em forma de círculos com o auxílio de um pincel. Na direção em que foi usado o par de barras de nylon, uma fina linha de pasta condutora liga o círculo às barras em ambos os lados para o contato elétrico. A aplicação de uma voltagem da ordem de kV causa uma compressão do filme na sua espessura e uma expansão da área, como previsto pela equação (4). Maiores voltagens implicam em maiores deformações, no entanto eventualmente o polímero será corrompido gerando curto-circuito nos eletrodos, destruindo assim o polímero.

Outro teste de moldura fixa a ser testado será para deformações em apenas uma direção, que por ser mais simples serve para dar uma noção da tensão de entrada no flyback necessária para excitar o polímero. Esse experimento consiste em prender uma tira de polímero entre dois pares de cubos de alumínio, esticá-lo, passar a graxa condutora e aplicar a tensão desejada.

A região do polímero entre os eletrodos será chamada de *filme* ou *região ativa*, conseqüentemente a região sem os eletrodos será chamada de *filme* ou *região inativa*. Para esse teste, o diâmetro dos eletrodos tem que ser significativamente menor que o diâmetro interno da moldura para minimizar os efeitos de compressão nas bordas. A deformação da área do polímero é medida através da monitoração da área dos eletrodos, e a variação da espessura do polímero pode ser achada em função da deformação da área, uma vez que o volume é praticamente constante (equação 1).

Essa armação foi usada pelo *Stanford Research Institute* (SRI) para verificar experimentalmente a equação (5), que relaciona a expansão da área com a voltagem aplicada. Resultados bastante próximos, entre o experimental e o

teórico, foram registrados para deformações de espessura s_z maiores que 15% [Kornbluh et al., 1999]. A seguir são descritas as diferentes configurações utilizadas.



Figura 16: Primeira armação de teste da performance do atuador.

5.1_ Uma camada de polímero VHB 4905

Para esse teste foram utilizados quatro cubos de alumínio onde lateralmente todos estavam equidistantes em 15mm. O polímero foi colado por cima dos cubos e logo após outros quatro cubos foram colados no polímero exatamente acima dos quatro primeiros, formando na região central um quadrado de polímero sem contato com o metal. Afastaram-se os pares de cubos em uma direção apenas até que a distância entre eles fosse de 75mm (400% da distância original), onde duas barras de nylon de mesmo comprimento e igual à distância desejada de 75mm foi colada entre os cubos de forma a manter a deformação constante. Logo após, os outros pares de cubos foram afastados na direção ortogonal à deformação inicial, à mesma distância desejada de forma a conseguir 400% de deformação em ambas as componentes x e y . Duas barras de alumínio foram coladas para manter esta

deformação como mostra a **Figura 16**. Com o auxílio de um pincel, a graxa condutora foi aplicada no centro do quadrado, de 75 x 75 mm de polímero livre dos metais, em forma de círculo com 15mm de diâmetro aproximadamente. Dois caminhos de graxa condutora foram feitos partindo do círculo até as barras de nylon. Um dos caminhos ligou o círculo pintado na parte de baixo do polímero a uma das barras de nylon e outro caminho ligou o círculo da parte de cima à outra barra de nylon oposta à primeira. Os eletrodos de alimentação foram então colocados um em cada barra de nylon. Dessa forma não há a possibilidade de arcos voltaicos entre os eletrodos pelo ar, e como os caminhos foram cuidadosamente pintados de forma a passarem pelo meio de cada barra de nylon, foi descartada também a possibilidade de arcos voltaicos entre o catodo e o cubo de alumínio (aterrado devido ao contato com o chão) já que distância entre eles era de $\frac{75}{2}mm$ e portanto maior que a distância máxima para o arco voltaico de uma ddp de 50kV (30mm aferidos experimentalmente).

Com a estrutura pronta foram colocados os eletrodos em contato com as barras de nylon pintadas com a graxa. Uma tensão de 50kV foi aplicada. Os resultados obtidos serão apresentados no próximo capítulo.

Outro teste com uma camada de polímero VHB 4905 foi feito para replicar os experimentos já feitos na área de atuadores poliméricos. Dessa vez conseguiu-se montar uma estrutura para esticar o polímero que consiste em quatro alicerces (no caso chaves de parafuso do tipo fenda) presos, um em cada lateral de uma mesa quadrada de 75cm de lado, por fitas (duas fitas: cada uma prendendo um par de chaves opostas) passando por baixo da mesa tensionadas por um par de chinelos. Para segurar o polímero foram preparados quatro pares de peças de LEGO envoltos pelo polímero VHB 4910 afim de não rasgar o material esticado com as quinas de plástico. Cada cubo de alumínio foi preso a uma peça de LEGO formando um T. O polímero foi então preso entre dois T's pressionados entre si com o grampo tipo C. Depois de esticado na primeira direção os grampos foram então ancorados por fios aos alicerces presos à mesa. O mesmo foi feito para esticar o polímero na outra direção. Uma circunferência de 30mm de diâmetro com a graxa condutora foi pintada em

cada lado do polímero com um fino caminho até a lateral para aplicar a tensão, dessa vez por volta dos 10kV como mostra a figura abaixo.

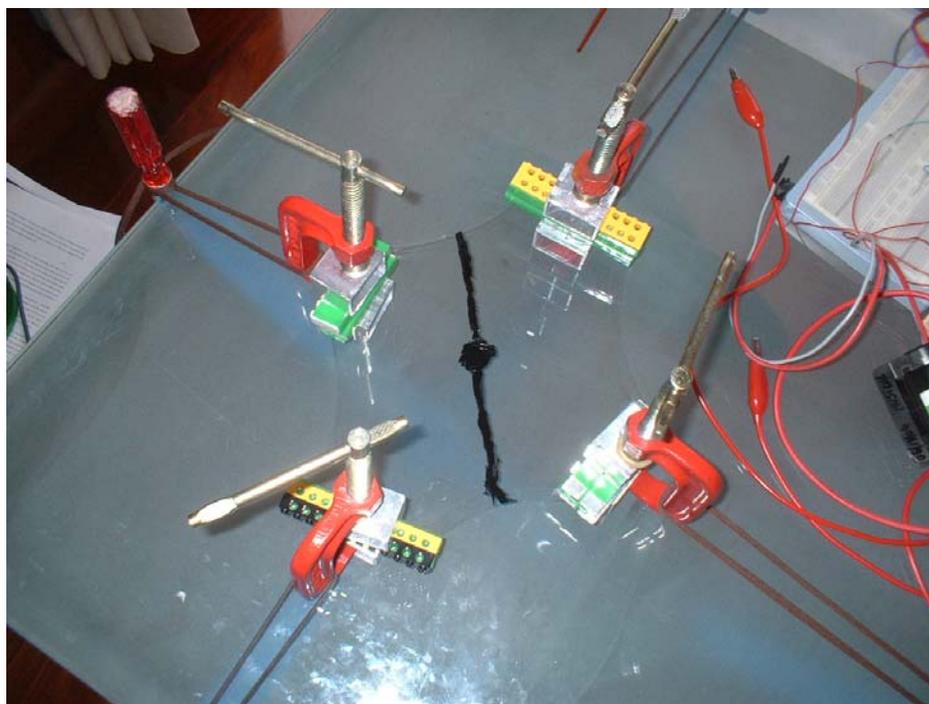


Figura 17: Armação do teste de moldura fixa.

5.2_ Quatro camadas de polímero VHB 4910

Pelos estudos feitos sobre o polímero, este experimento deveria ser de 5 camadas tendo em vista que cada camada responde a 10kV e a alimentação utilizada é de 50kV. No entanto, ao empilhar as camadas percebeu-se que quanto mais camadas eram sobrepostas, menos precisão ter-se-ia na deformação antes de ser aplicada a tensão, pois o polímero começou a ficar extremamente ondulado já que cada camada adicionada não possuía a mesma tensão ao ser manuseada. Logo, ao final de quatro camadas, mesmo antes de esticá-lo para aplicar a voltagem, o polímero encontrava-se com tensões residuais consideráveis. Outro problema encontrado foi o peso e a espessura final do material. Como o objetivo do trabalho é estudar atuadores menores e mais leves que apresentem uma grande relação entre força e deformação, empilhar mais de quatro camadas fugiria do escopo deste estudo. Por último esbarrou-se em problemas de quantidade limitada de material para estudo, tendo em

vista que para este trabalho estão disponíveis três rolos de polímeros: o primeiro rolo possui o polímero VHB 4905 de 0,5mm com 100mm de largura (ótimo para manusear e prender na armação com os cubos), o segundo rolo também é o VHB 4905 mas com apenas 25mm de largura (que impossibilita a armação apresentada no item acima com os oito cubos de alumínio) e o terceiro rolo possui o polímero VHB 4910 com 1mm de espessura e 18mm de largura (também impossibilita a armação acima). Como o primeiro e o segundo rolos não se encontram à venda no Brasil, tiveram que ser trazidos de fora e se encontram em pouca quantidade. Logo o teste com mais camadas foi feito com o terceiro rolo, disponível no país.

O experimento consiste em sobrepor quatro camadas de polímero de 1mm colados sobre dois cubos de alumínio com uma distância inicial de 15mm. Outros dois cubos foram colados exatamente acima dos dois primeiros, como mostra a **Figura 18**. Os pares de cubos foram afastados até que a deformação do polímero atingisse 400% da distância inicial. Duas barras de alumínio com o comprimento exato para gerar a deformação desejada foram colocadas entre os cubos para manter a deformação do material. Uma camada de graxa condutora foi adicionada com o pincel dos dois lados do polímero, na região central da parte deformada, na forma de uma elipse com diâmetros de 10 e 20mm. Uma faixa de graxa foi adicionada para o contato dos eletrodos, mas logo se viu que a distância entre os eletrodos e os cubos seria pequena demais, logo o contato dos eletrodos com a graxa foi feito segurando-se os mesmos e encostando-os na região central com o condutor.

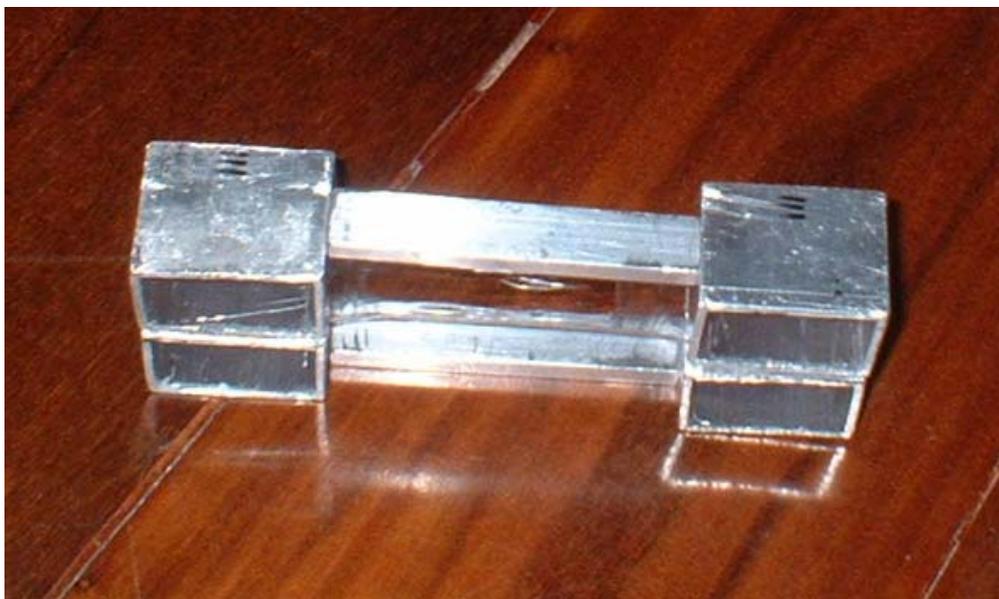


Figura 18: Segunda armação de teste da performance do atuador.

5.3_ Duas tiras lado-a-lado com quatro camadas de polímero VHB 4910

Para aumentar a região ativa do polímero, foi proposto que duas fitas de quatro camadas de polímero fossem unidas lado-a-lado. Para isso duas tiras com duas camadas cada foram coladas uma ao lado da outra em cima de dois cubos de alumínio com uma distância de 30mm entre eles. Uma terceira tira também com duas camadas foi colada em cima das outras duas com um deslocamento de 2mm para sobrepor a região que une as duas primeiras de modo a reforçar essa parte. A quarta e última tira foi então colada ao lado da última em cima das outras duas como mostra a **Figura 19**. Outros dois cubos de alumínio foram colados em cima dos dois primeiros. Dois grampos tipo C foram utilizados, um para cada par de cubos empilhados, de modo a aumentar a pressão exercida sobre o polímero para que ele ao ser esticado não saísse do meio dos cubos, já que a força para tracionar o polímero é aplicada nos cubos. Para esticar o polímero, prenderam-se mais dois grampos tipo C, um em cada lateral da mesa, que serviram de âncoras como mostra a **Figura 20**. Um fio foi amarrado em um dos grampos e em um dos pares de cubos empilhados, mantendo-o fixo e imóvel. O outro par de cubos foi preso também por um fio ao outro grampo, mas

com um nó ajustável, possibilitando assim a regulação da distância entre os pares de cubos e assim a deformação inicial do polímero.

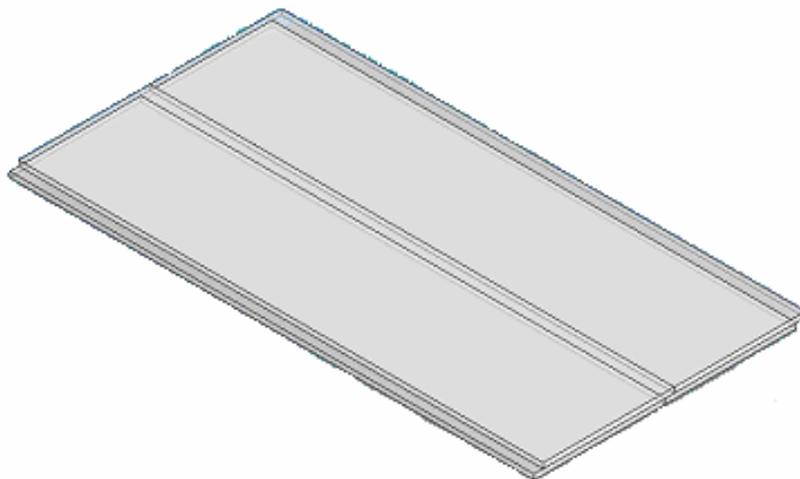


Figura 19: Disposição das quatro tiras de polímeros para o terceiro teste.

Primeiramente esticou-se o polímero 300% do seu comprimento quando em repouso. Aplicou-se no centro a graxa condutora com o pincel, formando um círculo de 15mm de diâmetro. A partir do círculo foram feitos dois caminhos com a graxa, cada um por um lado do polímero, em sentidos opostos até uma distância de 35mm do respectivo par de cubos. Os eletrodos foram conectados no final desses caminhos e a tensão foi aplicada. Outras duas pré-deformações foram testadas, 450% e 600%. Quando tentou-se gerar uma deformação ainda maior o polímero arrebentou.

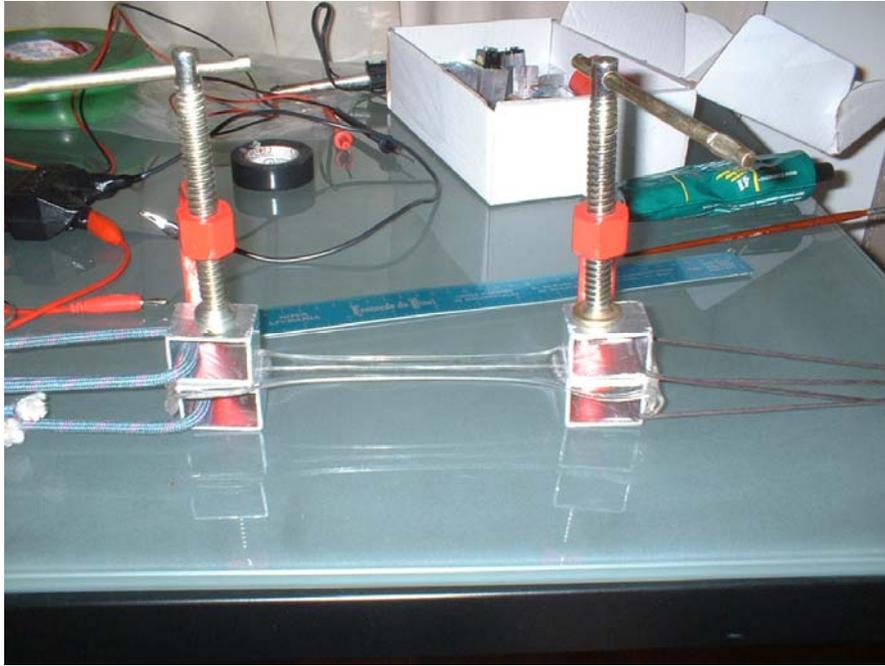


Figura 20: Terceira armação de teste da performance do atuador.

6_ Resultados Obtidos e Discussões

No primeiro teste com uma camada de polímero VHB 4905, ao aplicar a tensão de 50kV, nada aconteceu. Ao afastar um pouco (aproximadamente 10mm) um dos eletrodos do ponto de contato na barra de nylon, pôde-se perceber que o arco voltaico estava se formando entre o eletrodo e a graxa condutora. Afastou-se então o outro eletrodo da mesma distância do outro eletrodo e observou-se que o arco voltaico também se formara, confirmando assim que a tensão havia passado através do polímero rompendo o dielétrico.

No outro teste com uma camada de VHB 4905 e uma tensão aplicada bem menor, com o circuito DC-DC desenvolvido, pôde-se observar que a circunferência formada pela graxa teve o seu diâmetro aumentado de 30mm para 45mm causando uma deformação de 112% da região ativa do polímero como mostra a seqüência da **Figura 21** e **Figura 22**.

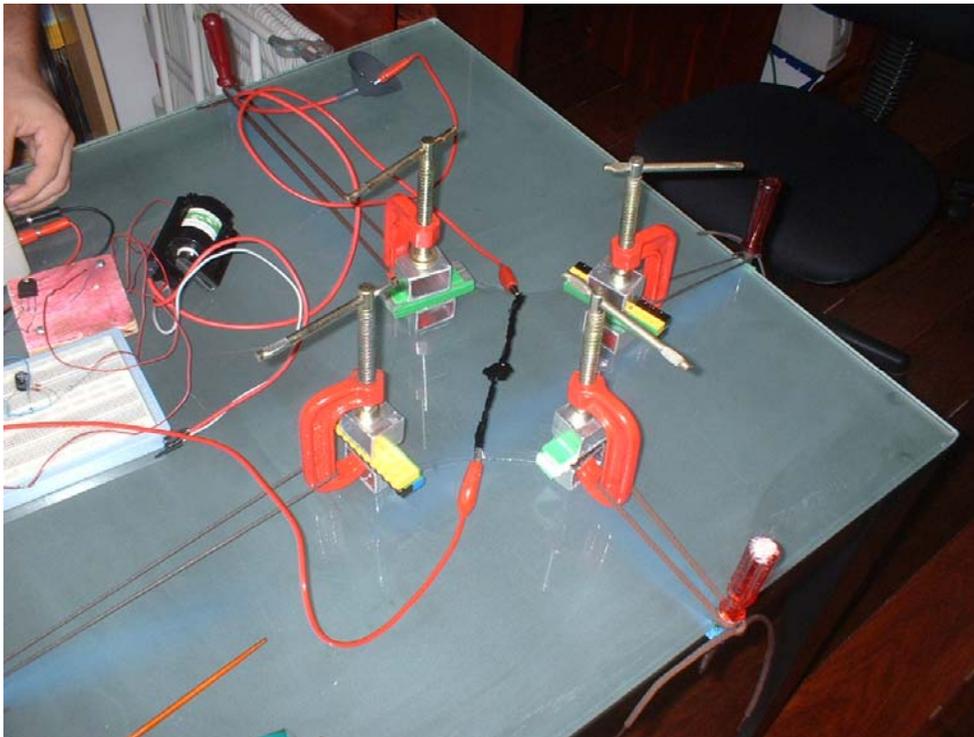


Figura 21: Teste de moldura fixa sem tensão aplicada.



Figura 22: Teste de moldura fixa com tensão de aproximadamente 6,5kV aplicada.

O experimento foi repetido por 10 vezes até que o dielétrico rompeu, inutilizando a região. Em seguida, ainda com o mesmo polímero, manteve-se a deformação de 400% em ambas as direções e pintou-se uma nova região ativa. Repetiu-se o experimento com uma tensão um pouco mais baixa por várias vezes até o polímero rasgar em uma das bases que mantinham o material esticado. Tendo em vista que a experiência executada seguiu as orientações de deformação e material utilizado (polímero e graxa condutora) de outros trabalhos para a sua realização, podemos dizer que como a deformação encontrada foi maior que a relatada (107% [Wingert A., 2002] sob uma tensão de 6,5kV) a tensão aplicada foi maior que 6,5kV, para uma tensão de entrada no flyback de 18V. Em seguida diminuiu-se a tensão de alimentação do flyback para 17,5V. Esta alteração não causou mais o rompimento do dielétrico, mas implicou em uma diminuição da deformação da região ativa para 89%.

Para o teste com quatro camadas de polímero VHB 4910 pôde-se observar que ao aplicar uma tensão de 50kV, um arco voltaico fechou-se pela lateral do polímero, pois ao esticar o polímero, sua largura e espessura diminuem muito devido à equação 1 de

conservação do volume. Como o ar oferece menos resistência ao curto-circuito do que o polímero, nada aconteceu com o polímero ao ser aplicada a tensão, tendo em vista que a diferença de potencial necessária entre as aplicações de graxa foi anulada pelo arco voltaico.

Para a experiência com duas tiras de quatro camadas de polímero VHB 4910 foram testadas três deformações iniciais para o polímero, cada deformação com um polímero novo. Para todas as três deformações houve o curto-circuito através do polímero sob 50kV, não permitindo, portanto, que houvesse a atração eletrostática entre as aplicações de graxa mantendo o polímero com a sua deformação inicial. Deformações de até 600% foram testadas a fim de aumentar a rigidez dielétrica do polímero. No entanto, ainda assim não foi suficiente para conter uma diferença de potencial de 50kV.

Testes com duas camadas de polímero VHB 4910 foram realizados com o conversor DC-DC, capaz de gerar menores voltagens. No entanto a tensão máxima fornecida pelo flyback não foi suficiente para causar deformações visíveis neste teste, sugerindo que é necessário uma tensão ainda maior. Foi testada uma camada de polímero VHB 4910. Conseguiu-se deformações bastante visíveis como mostra a seqüência das Figuras 23 e 24.

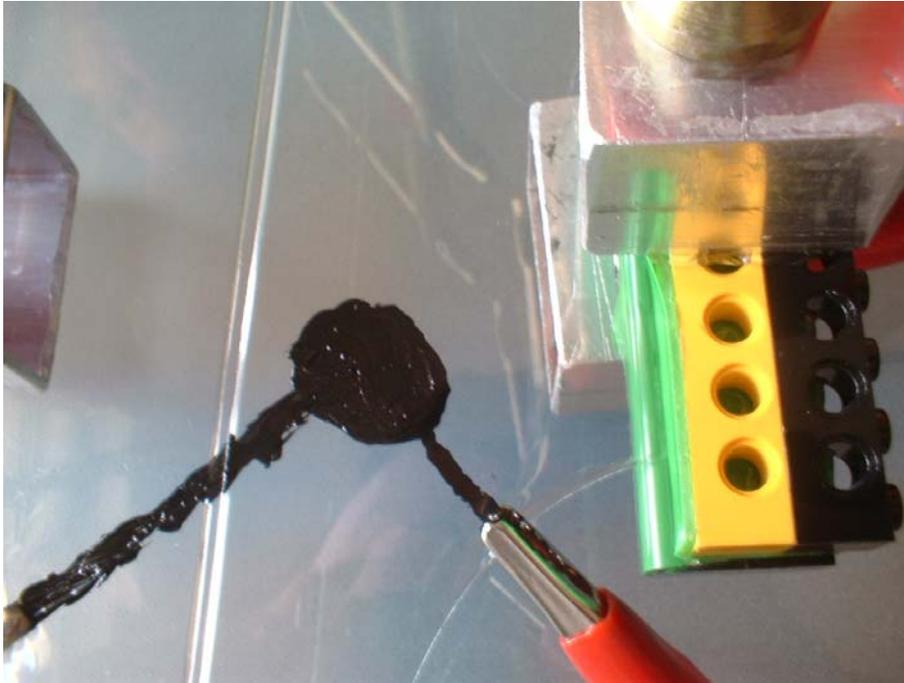


Figura 23: Teste de moldura fixa com VHB 4910 sem tensão aplicada.

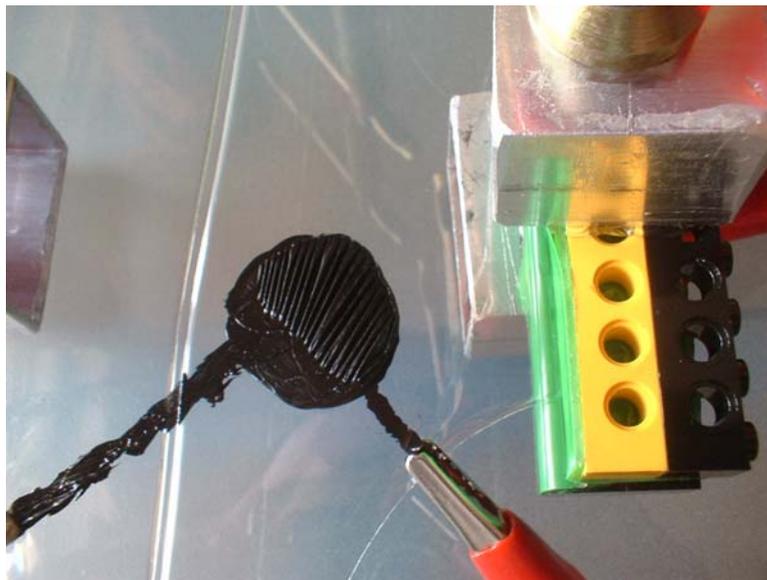


Figura 24: Teste de moldura fixa do VHB 4910 com tensão aplicada.

A deformação relativa não foi reportada devido à incorreta aplicação da graxa, vista na Figura 24, onde após a aplicação da tensão apenas uma parte da circunferência dilata, sugerindo que apenas nessa região havia graxa aplicada no outro lado do polímero. Na Figura 25 conseguiu-se fotografar o exato momento em que o dielétrico se rompeu

destruindo assim o polímero. A tensão (na entrada do flyback) necessária para romper o dielétrico foi de 24V, enquanto que para o polímero VHB 4905 essa tensão não passou de 19V.



Figura 25: Momento em que o dielétrico se rompe devido a alta tensão.

7_ Conclusões e Trabalhos Futuros

Foi desenvolvido e implementado um conversor de tensão DC-DC que, alimentado por uma fonte de 30V DC, foi capaz de fornecer tensões superiores a 6,5kV. Conseguiu-se reproduzir testes básicos de deformação do polímero VHB 4905 com molduras fixas, achando-se valores de deformações de até 112%, superiores aos 107% relatados em outros trabalhos. Conseguiram-se também deformações significativas com o polímero VHB 4910. Verificou-se que polímeros mais espessos respondem a tensões maiores. Não foi possível, no entanto, reproduzir o mesmo experimento com camadas mais grossas de polímero sob tensões da ordem de 50kV, pois a excitação era muito alta para o polímero, que era facilmente atravessado pela alta tensão.

Futuros trabalhos nessa área poderão explorar atuadores com uma relação força deformação ainda maior, tendo em vista que mais camadas suportam maiores tensões. Portanto, como quanto maior a diferença de potencial entre dois pontos maior é a força eletrostática entre eles, atuadores com polímeros igualmente elásticos e mais espessos poderão gerar forças de atuação maiores.

Bibliografia

- Bar-Cohen Y., “Electro-active Polymers: Current Capabilities and Challenges”, in *Smart Structure and Materials 2002: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, Yoseph Bar-Cohen, Editor, Proceedings og SPIE Vol. 4695, pp.1-7.
- Bastos A., Fernandes S., “Manutenção de Fontes Chaveadas”, Rio de Janeiro, Antenna Edições Técnicas Ltda, 2004.
- Bogart T., Dispositivos e Circuitos Eletrônicos Volume1”, traduzido por Romeu Abdo e revisado por Antônio Pertence Júnior, São Paulo, Makron Books, 2001, título original: Eletronic Devices and Circuits.
- Brites P., “Flybacks & Circuito de Deflexão Horizontal”, Rio de Janeiro, Antenna Edições Técnicas Ltda, 2002.
- Choi H., Ryew S., Jung K., Jeon J., Kim H., Nam J., Takanishi A., Maeda R., Kaneko K., Tanie K., “Biomimetic Actuator Based on Dielectric Polymer”, in *Smart Structure and Materials 2002: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, Yoseph Bar-Cohen, Editor, Proceedings og SPIE Vol. 4695, pp.138-149.
- Dow Corning internet site, <http://www.dowcorning.com/>, 2004.
- EMCO High Voltage Corporation internet site <http://www.emcohighvoltage.com/>, 2002.
- 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.
- ITM internet site, <http://www.itmi.com.br/>, 2004.
- Matsusada Precision Inc. Internet site, <http://www.matsusada.com/>, 2000.
- McMaster-Carr internet site, <http://www.mcmaster.com/>, 2002.
- Mendonça R.,”Da Possibilidade de Inserção das Pessoas com Deficiência nos Quadros das Empresas de Vigilância Patrimonial e de Transporte de Valores”, internet site, <http://www.vemconcursos.com.br/arquivos/download.phtml?arquivo=aula138> .
- 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.

Sedra A., Smith K., “Microeletrônica”, traduzido e revisado por prof. Dr. Antônio Carlos Seabra, prof. Dr. Márcio Lobo Netto, prof. Dr. Sebastião Gomes dos Santos Filho e prof. Dr. Wilhelmus Adrianus Maria Van Noije, São Paulo, Makron Books, 2000, título original: Microeletronic Circuits – Fourth Edition.

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 SPIE Vol. 4695, pp.158-166.

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.

Apêndices



www.fairchildsemi.com

LM555/NE555/SA555 Single Timer

Features

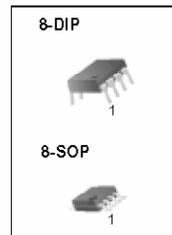
- High Current Drive Capability (200mA)
- Adjustable Duty Cycle
- Temperature Stability of 0.005%/°C
- Timing From μSec to Hours
- Turn off Time Less Than $2\mu\text{Sec}$

Applications

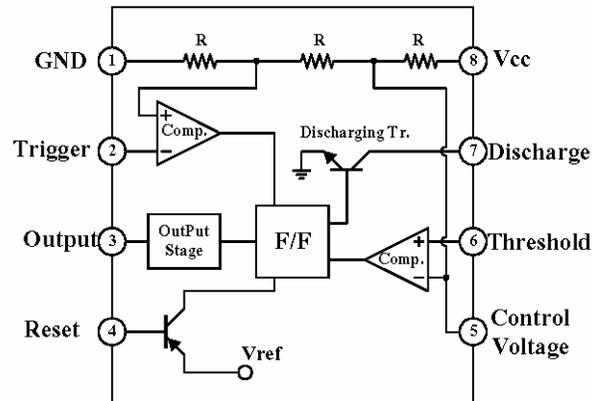
- Precision Timing
- Pulse Generation
- Time Delay Generation
- Sequential Timing

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