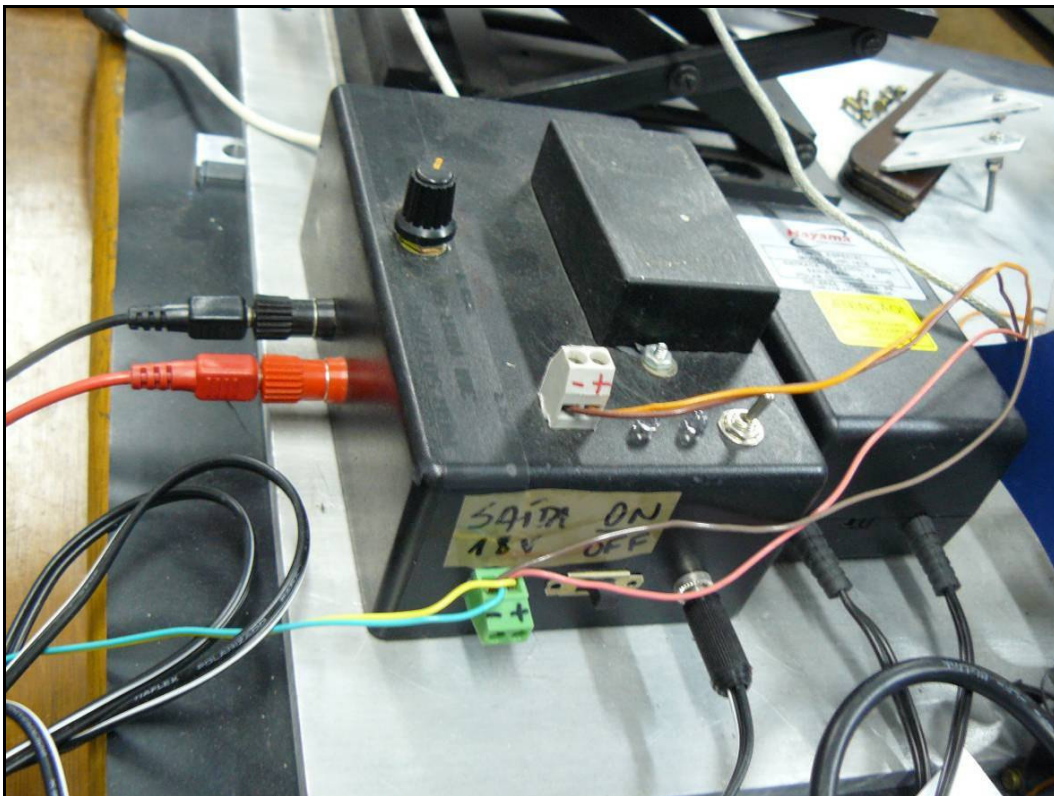


## 4 Sistema Elétrico de Acionamento

O princípio de funcionamento do atuador polimérico estudado envolve altas tensões, da ordem de 10kV, de forma que as forças eletrostáticas entre os condutores sejam suficientes para comprimir o polímero e produzir as deformações desejadas. O consumo de corrente do atuador é muito baixo (da ordem de 10 $\mu$ A) [Bar-Cohen, 2004]. Com isso, a potência necessária para excitar o atuador também é baixa (100mW) e pode ser obtida a partir de uma bateria comum de 9V. Um circuito oscilador seguido por um transformador (com uma razão 1000:1) e um retificador seria suficiente para gerar essas altas tensões. No entanto, componentes eletrônicos como capacitores e diodos, utilizados nos retificadores, que tolerem altas tensões não são facilmente obtidos. As poucas empresas que fornecem componentes para esses níveis de tensão são fornecedores de componentes para alta potência, que toleram não só tensões da ordem de kV mas também correntes da ordem de kA. Isso faz com que os componentes sejam extremamente grandes e caros.

A solução encontrada foi adquirir um equipamento que convertesse uma tensão DC baixa (de 0 a 15V) para as altas tensões necessárias para o projeto (de 0 a 10kV também DC). O equipamento escolhido foi o conversor DC-DC da *Emco High Voltage Corporation* ([www.emcohighvoltage.com](http://www.emcohighvoltage.com)) modelo E101 (ver *datasheet* no Apêndice), que recebe uma tensão de 0 a 15V na entrada, drenando uma corrente de até 300mA (dependendo da carga utilizada no lado da alta tensão), e fornece uma tensão de saída proporcional à entrada linear a partir de 0,7V. Sua tensão de saída chega até a 10kV com uma corrente máxima de 0,2mA. Esse equipamento fornece uma saída com uma oscilação de até 1,5% (*ripple* pico-a-pico) com uma frequência de aproximadamente 5kHz. O ideal era que essa tensão de saída fosse constante como a entrada, no entanto, como o tempo de resposta do atuador é alto (da ordem de 0,1s), comparada com a frequência do equipamento, essas oscilações de alta frequência não interferem na movimentação do músculo.

De forma a operar o atuador através do computador, foi preciso desenvolver um circuito que compatibilizasse a potência da saída do micro PC com a da entrada do conversor DC-DC. Como os sistemas de aquisição típicos fornecem uma tensão de saída de baixa potência (de 0 a 10V com no máximo 1mA de corrente), desenvolveu-se um circuito capaz de fornecer a potência necessária ao conversor de alta tensão. Para fins de testes rápidos, que não necessitem do computador para fornecer formas de ondas controladas, o circuito desenvolvido também possui um módulo que regula as altas tensões através de um *knob*. Dessa forma, o atuador pode ser ativado utilizando-se ora o computador, ora um potenciômetro, escolhidos através de uma chave seletora de dois estados (ver Figura 24).



**Figura 24:** “Caixa preta” desenvolvida contendo o circuito de alta tensão desenvolvido. A saída de alta tensão encontra-se na parte de trás.

O circuito foi então desenvolvido da seguinte maneira: os sinais de referência do computador e do potenciômetro são ligados nas duas primeiras portas de um multiplexador analógico, e a sua saída é conectada a um *buffer* de potência. Este último por sua vez é composto de um amplificador operacional e de um transistor. Como as entradas são tensões de referência que variam de 0 a 10V

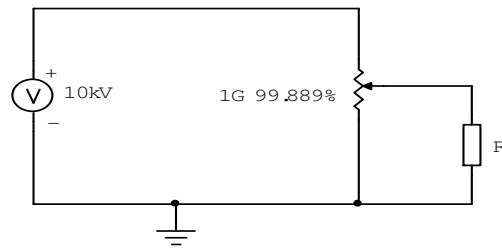
e o conversor DC-DC recebe uma tensão de 0 a 15V, o amplificador operacional foi ajustado de forma a ter um ganho de 1,5. Para que o usuário saiba qual das entradas está selecionando no multiplexador, foram colocados também dois LED's de cores diferentes que são acesos alternadamente de acordo com a chave seletora (vermelho para o computador e verde para o potenciômetro). A lógica de acionamento dos LED's foi feita utilizando-se transistores no modo de chaves comutadoras. Os *datasheets* dos componentes utilizados encontram-se no Apêndice.

Problemas foram encontrados durante a implementação do circuito. Alguns deles foram sanados e outros foram atenuados. Devido às altas tensões utilizadas na pesquisa e à baixa potência envolvida, a corrente que circula no circuito, do lado da alta tensão, é muito baixa. Isso faz com que pequenas variações nas grandezas dos elementos utilizados, ruídos, flutuações na linha de alimentação do laboratório, dentre outros fatores, causem grandes variações na atuação dos músculos. A seguir serão enumerados e esclarecidos os problemas mencionados.

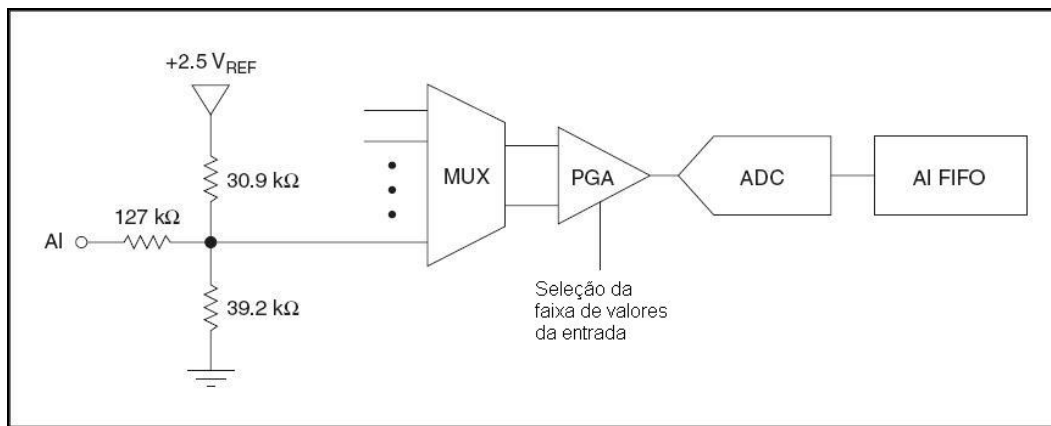
#### 4.1

##### **Impedância de entrada do equipamento de leitura da tensão**

O sensor de alta tensão (descrito na seção 5.4) possui uma impedância de saída de  $1,11\text{M}\Omega$ . É preciso um medidor de tensão com uma impedância de entrada de  $10\text{M}\Omega$  para que esses dois valores, em paralelo, resultem em uma resistência equivalente de  $1\text{M}\Omega$ . A razão entre a resistência total do divisor ( $999,89\text{M}\Omega$ , alterada pelo equipamento de leitura da tensão) e essa resistência equivalente fornece um fator de divisão de 999,89. No entanto, o equipamento de leitura de tensões de baixo custo disponível (USB-6009) possui uma impedância de entrada de  $144\text{k}\Omega$  (ver *datasheet* no Apêndice) onde o circuito da entrada analógica é mostrado na Figura 26. Esse tipo de entrada causa não só uma atenuação maior que a especificada pelo sensor, como de alguma forma, alterava o comportamento do sinal aplicado na leitura. A Figura 25 mostra o circuito de leitura dos sinais de alta tensão, onde o divisor de tensão de  $1\text{G}\Omega$  a 99,889% representa o sensor de alta tensão, a impedância R representa a placa de aquisição (USB-6009) e a fonte de tensão de 10kV representa a tensão aplicada no sistema.



**Figura 25:** Diagrama da leitura de alta tensão aplicada no sistema.



**Figura 26:** Circuito da entrada analógica do sistema de aquisição USB-6009.

Para corrigir esse problema, foi desenvolvido um pequeno circuito com um amplificador operacional, preparado de forma a ter um ganho unitário, para que fosse simulada uma entrada com impedância infinita vista pelo sensor. Como não foi possível comprar um resistor de  $10\text{M}\Omega$  para que a impedância sentida pelo mesmo fosse compatível com a determinada pelo fabricante, o sinal lido pelo equipamento corresponde à tensão aplicada no polímero atenuada por um fator de 900,9, que é a razão entre  $1,11\text{M}\Omega$  e  $1\text{G}\Omega$  (resistores constituintes do sensor de alta tensão).

## 4.2 Ruído na leitura da tensão aplicada

O sinal lido pelo equipamento aparecia no computador com uma oscilação cuja amplitude e frequência variavam, aparentemente, proporcionais à tensão aplicada. Para uma tensão de aproximadamente  $4\text{kV}$ , lida no computador como  $4,44\text{V}$ , aparecia uma oscilação de aproximadamente  $2\text{V}$  pico-a-pico, o que, na alta tensão, representa uma variação em torno de  $2\text{kV}$  pico-a-pico. É bastante plausível

crer que esse comportamento não ocorre na alta tensão, devido às informações dadas pelo fabricante do conversor DC-DC. Esse fenômeno não foi esclarecido, cogita-se a hipótese de que isso poderia ser resultado de uma falha no aterramento da malha elétrica do laboratório.

Na falta de uma explicação melhor, decidiu-se trabalhar com essa hipótese. Como refazer o aterramento do laboratório seria inviável, a solução encontrada foi inserir um filtro entre o sensor de alta tensão e o equipamento de leitura. Foi colocado então um capacitor entre a entrada do amplificador operacional e o terra para que altas frequências fossem filtradas.

### 4.3

#### **Sinal de comando intolerante a variações de grandes amplitudes**

Outro problema identificado foi que quando era dado o comando via software para que a saída do equipamento de atuação utilizado, um CompactDAQ da National Instrument Inc., variasse de 0V para 6V ou mais, sua saída chegava no máximo a aproximadamente 2V e a corrente drenada pelo circuito desenvolvido aumentava de valores da ordem de  $\mu\text{A}$  para 1,2mA. Para que o sistema voltasse a funcionar, era preciso zerar a tensão de saída do módulo. No entanto, quando esse degrau era feito com passos intermediários (de 2 em 2V por exemplo), o problema não ocorria. Esse efeito impossibilitava os ensaios de resposta aos degraus de grandes amplitudes e atrapalhava os controladores testados no sistema. A explicação encontrada para este problema é que o módulo de atuação NI-9263 do CompactDAQ utilizado pode fornecer no máximo 1mA. Como o sistema drenava 1,2mA, a tensão fornecida era atenuada para um valor limite onde a potência fornecida pelo módulo era máxima. No entanto, o motivo pelo qual o sistema drenava altas correntes, quando grandes degraus eram aplicados, não foi identificado. Cogitou-se a hipótese de que um indutor, que provavelmente exista no conversor DC-DC, responda com uma força contra-eletromotriz grande o suficiente para esses degraus mencionados de forma a ativar a proteção contra curtos-circuitos do módulo de atuação. Provavelmente, uma vez armada essa proteção, é necessário zerar a tensão de saída para que esta seja desativada.

A solução encontrada foi implementar um filtro entre a saída do módulo de atuação e o circuito de atuação do polímero de forma a suavizar a transição dos sinais de comando. O filtro foi implementado com um capacitor de  $0,1\mu\text{F}$  e uma resistência de  $24\text{k}\Omega$ , para que as transições ocorressem um pouco mais suavemente.

#### 4.4

#### Tensões aplicadas no polímero abaixo das esperadas

Sabendo-se a relação de amplificação do sinal de comando e o fator de divisão do sensor de alta tensão do sistema, pode-se ter uma estimativa da tensão que será lida no computador para uma dada tensão de comando. Essa relação pode ser encontrada da seguinte maneira:

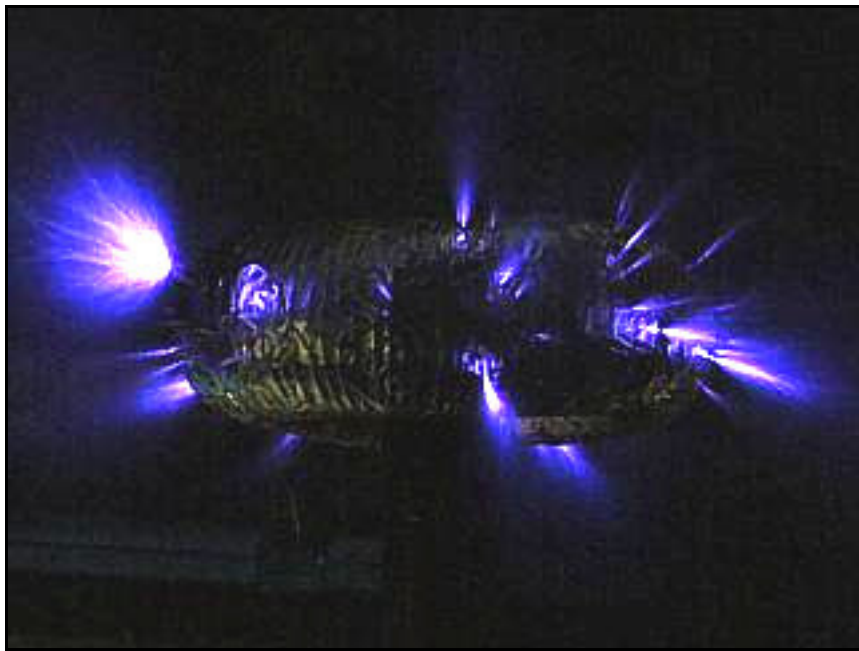
$$V_L = \frac{(V_C \cdot 1,5 \cdot 666,7)}{900,9} \quad (4.1)$$

onde  $V_L$  é a tensão lida no computador e  $V_C$  é a tensão de comando enviada pelo módulo de atuação NI-9263. O fator 1,5 corresponde ao ganho implementado no amplificador operacional do circuito multiplexador, 666,7 é o fator multiplicativo do conversor DC-DC e 900,9 é o fator de atenuação do divisor de tensão. O que se percebia é que algumas vezes a tensão lida era consideravelmente menor que a suposta. Isso não acontecia sempre, variava de experimento para experimento. Era possível escutar um som baixo quando essa diferença era maior e via-se que a tensão não ficava estável, com uma variação pequena (da ordem de 500V) mas com uma frequência irregular. Descobriu-se que dois fenômenos característicos da alta tensão estavam ocorrendo ao mesmo tempo. Um deles é a perda de energia por efeito corona, e a outra é a perda de energia pelo contato entre fios encapados dentro do circuito que conduziam uma alta tensão, mas que não possuíam um isolamento adequado.

A falta de isolamento dos fios fazia com que parte da carga migrasse de um fio para o outro, causando uma queda na tensão de saída. A solução implementada foi manter os fios longe uns dos outros dentro da caixa. Seria

melhor se fios com o isolamento adequado fossem usados, mas não foi possível encontrá-los no mercado nacional.

O efeito corona por sua vez é uma bainha de ar ionizado em torno de um condutor cilíndrico que aumenta de raio de acordo com a tensão. A resistência à ruptura do ar antes da quebra, sujeita às restrições de pressão e umidade, é de aproximadamente 30kV/cm. A tensão necessária para produzir esse gradiente ou campo elétrico depende da geometria do condutor. A tensão sob a qual o efeito corona começa a ocorrer para uma dada geometria é chamada de tensão limite de corona,  $V_{th}$ . Este efeito é dominante nas atenuações e distorções das linhas de transmissão e nos impulsos nos níveis de tensão acima dos limites de ionização. A resistência corona,  $R_{LOSS}$ , é uma resistência em série responsável por perdas cíclicas causadas por esses impulsos que caminham pela linha de transmissão. As conseqüências desses impulsos incluem falhas e danos em equipamentos, arcos voltaicos entre contatos e abertura de disjuntores [Ovick, N. L., Kusic, G. L., 1984]. A Figura 27 mostra um exemplo da perda de energia por efeito corona em um toróide.



**Figura 27:** Foto mostrando a perda de energia por efeito corona nas imperfeições da superfície de um toróide [<http://www.sky-chaser.com/tcpart7.htm>, acessado em 22/08/2007].

Para solucionar esse problema, foi necessário aumentar o isolamento das partes desencapadas dos fios e contatos de todo o sistema. Os principais pontos de

perda de energia foram identificados como sendo os contatos (folhas de alumínio) entre a alta tensão e o polímero, a solda entre a saída do conversor DC-DC e o sensor de alta tensão, e os fios da saída de alta tensão do circuito, que foram retirados de um *flyback* (componente que gera altas tensões, existente nas televisões), que quando encostados permitiam a passagem de carga entre eles. Nos contatos foram colocadas duas camadas de fita acrílica VHB4910, e os fios foram separados por suportes de borracha. O ideal seria que fosse colada uma camada de VHB4910 também nos fios, no entanto isso aumentaria a rigidez dos mesmos. Como estes ficam pendurados no atuador, uma maior rigidez poderia alterar significativamente os resultados colhidos.