

**LUIS HENRIQUE FERNANDES**

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA  
FONTE MICROCONTROLADA DE  
ALTA TENSÃO E DIMINUTAS  
DIMENSÕES COM INTERFACE  
COMPUTACIONAL ATRAVÉS DE  
PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO  
USB**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Escola de Engenharia de  
São Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em  
Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: Valentin Obac Roda

São Carlos  
2007

## **Sumário**

<b>Dedicatória</b>	<b>3</b>
<b>Agradecimentos</b>	<b>4</b>
<b>Resumo</b>	<b>5</b>
<b>Abstract</b>	<b>6</b>
<b>1. Introdução</b>	<b>7</b>
1.1. <b>Eletroforese Capilar</b>	<b>7</b>
1.2. <b>Instrumentação</b>	<b>8</b>
1.3. <b>Fonte de alta tensão</b>	<b>9</b>
<b>2. Desenvolvimento</b>	<b>11</b>
2.1. <b>Microfontes</b>	<b>11</b>
2.2. <b>Circuito de alimentação para as microfontes</b>	<b>12</b>
2.3. <b>Conversor digital/analógico</b>	<b>13</b>
2.4. <b>Circuito de medida da corrente</b>	<b>13</b>
2.5. <b>Microcontrolador</b>	<b>14</b>
2.6. <b>IHM</b>	<b>16</b>
2.7. <b>Hardware</b>	<b>17</b>
2.8. <b>Fonte de alimentação</b>	<b>18</b>
2.9. <b>Protocolo de comunicação</b>	<b>21</b>
2.10. <b>Programação do firmware</b>	<b>22</b>
2.11. <b>Características gerais do equipamento</b>	<b>22</b>
2.12. <b>Software de interface</b>	<b>23</b>
<b>3. Resultados</b>	<b>24</b>
<b>4. Conclusão</b>	<b>25</b>
<b>5. Referências bibliográficas</b>	<b>26</b>

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho aos meus queridos pais Josué e Roseli e a meu irmão Renato pela inestimada ajuda afetiva e financeira em todos os momentos da minha vida e ao meu grande amor Cinthia, que me ensinou o que é a felicidade.

## **Agradecimentos**

Agradeço a todos os professores pelo companheirismo e pelo aprendizado nestes cinco anos. Especialmente aos professores Veronese e Sartori pela ajuda com este trabalho. Agradeço aos amigos Cabeça, Velinho, Farelo, Tonho, Mori, Bicudo, Cabelinho, Panosso e Peninha pela troca de experiências, pela força nas horas difíceis e pelas cervejas no CAASO. Por fim, agradeço a todo o pessoal do Laboratório de Cromatografia pela convivência nos dois anos de iniciação científica, especialmente ao Renê pelo companheirismo e parceria no projeto e a meus orientadores Emanuel Carrilho, Nilson Assunção e Valentin Obac Roda por me incentivarem e acreditarem neste projeto.

## Resumo

Fontes de alta tensão em corrente contínua são largamente utilizadas como gerador de campo elétrico nos mais variados tipos de aplicação. Como exemplo, pode-se citar o seu uso em impressoras, máquinas geradoras de raio X, em dispositivos piezelétricos e como gerador de diferença de potencial elétrico em análises eletroforéticas. Dessa maneira, é encontrada uma grande variedade de fontes de alta tensão no mercado. Porém, as fontes comerciais existentes têm grande dimensões, custo muito elevado e na sua maioria só possuem controle e monitoramento analógicos, tornando-as pouco práticas quando utilizadas em ensaios repetitivos que necessitem de automatização. Este trabalho propõe a construção de uma fonte microcontrolada, de diminutas dimensões, que possua todo o seu controle e monitoramento feito através de interface computacional e que tenha custo bem menor do que as fontes comerciais analógicas. Além disso, a comunicação via USB e o *software* de interface da fonte desenvolvido em linguagem Java poderão conferir portabilidade e rapidez de configuração ao equipamento. Como prova de sua eficácia, o equipamento será ensaiado e comparado com os resultados obtidos de uma fonte comercial amplamente utilizada.

Palavras-chave: Fonte de alta tensão, Microcontroladores, USB, PIC, Conversor DC/DC, Eletroforese Capilar

## **Abstract**

High voltage suppliers with direct current are widely used as electric field generator in the most varied types of applications, at example in printers, x-ray machines, piezoelectric devices and in electrophoretical analysis. Thus, there are a large variety of suppliers in the market, but they are big and have high costs, besides they have just analogical control and monitoring, making them less practical when used in repetitive experiences that needs automation. This work proposes the construction of a micro-controlled high voltage supplier with small dimensions, digital control and measurement and smaller costs than commercial analogical suppliers. Moreover, the USB communication protocol and the interface software developed in JAVA gives portability and speed of the equipment configuration. As proof of its effectiveness, the equipment will be tested and compared with those obtained from a analogical and commercial supplier widely used.

Keywords: High Voltage supplier, Microcontrollers, USB, PIC, DC/DC converter, Capillary Electrophoresis

# 1. Introdução

## 1.1. Eletroforese Capilar

O fenômeno denominado eletroforese é definido como sendo a migração de espécies carregadas eletricamente, que ocorre quando as mesmas são dissolvidas ou suspensas em um eletrólito, através do qual uma corrente elétrica é aplicada. Esta técnica de separação foi desenvolvida pelo químico Arne Tiselius para o estudo de proteínas em soro e por este trabalho ele ganhou o prêmio Nobel em 1948 [1].

Este método, denominado solução livre, era bastante limitado devido à instabilidade do aparelho, e mais significativamente, pelos efeitos de difusão e aquecimento gerados pelo campo elétrico, os quais comprometiam a resolução (a separação) dos compostos. Estes efeitos foram minimizados com a introdução de suporte (gel ou papel) que ajudou a conter o movimento livre dos analitos, de forma que o efeito da difusão fosse diminuído. Entretanto este sistema oferecia um baixo nível de automatização, tempos de análise longos e, após a separação, a detecção era feita visualmente.

A eletroforese capilar (EC) é uma técnica que foi introduzida em 1981, por Jorgenson e Lukacs e tem sido cada vez mais aceita como um importante método analítico. Em sua forma mais simples a EC é uma aproximação da técnica original, descrita por Tiselius, porém emprega-se um tubo capilar preenchido com um eletrólito, conforme o próprio nome sugere.

A eletroforese capilar (EC) é uma técnica aplicável na determinação de uma grande variedade de amostras, incluindo hidrocarbonetos aromáticos, vitaminas hidro e lipossolúveis, aminoácidos, íons inorgânicos, ácidos orgânicos, fármacos, catecolaminas, substâncias quirais, proteínas, peptídeos e muitos outros. Uma característica que difere a EC das outras técnicas é a sua capacidade única para separar macromoléculas carregadas eletricamente de interesse tanto em indústrias de biotecnologia quanto em pesquisas biológicas. Por exemplo, o projeto Genoma Humano, que foi concluído recentemente, teve como meta obter a seqüência completa do DNA humano e para isso foi necessário distinguir os diversos polinucleotídeos, com massas molares por volta de 200 a 500 Daltons (Dalton = u.m.a.) que diferiam entre si por um único nucleotídeo. Somente a EC tem resolução suficiente para este tipo de separação. Além disso, o DNA humano contém cerca de 3 bilhões de nucleotídeos e as

altas velocidades de análises, obtidas pela EC, permitiram que milhares de nucleotídeos fossem seqüenciados em um único dia. [1]

## 1.2. Instrumentação

Geralmente o funcionamento de um equipamento de eletroforese capilar - EC (Figura 1) envolve a aplicação de alta tensão, tipicamente 1 a 30 kV em um capilar de diâmetro reduzido, gerando correntes na faixa de 1 a 1000  $\mu$ A. O uso do capilar apresenta várias vantagens, particularmente com respeito ao aquecimento Joule.

A alta resistência elétrica do capilar permite a aplicação de campos elétricos altos pois gera um aquecimento mínimo, além disso o formato de capilar propicia uma dissipação eficiente do calor gerado. O uso de campos elétricos altos resulta em tempo de análise curto, alta eficiência e resolução.

Na eletroforese capilar, o capilar é preenchido com uma solução tampão e suas extremidades são mergulhadas em recipientes, que contém a solução tampão, e onde é aplicado um campo elétrico, que gera uma corrente no interior do capilar. Os eletrodos são feitos de um material inerte, tal como, platina, e são também mergulhados na solução para fechar o circuito. O capilar passa através de um detector, usualmente um detector espectrofotométrico de absorção no UV/Vis.

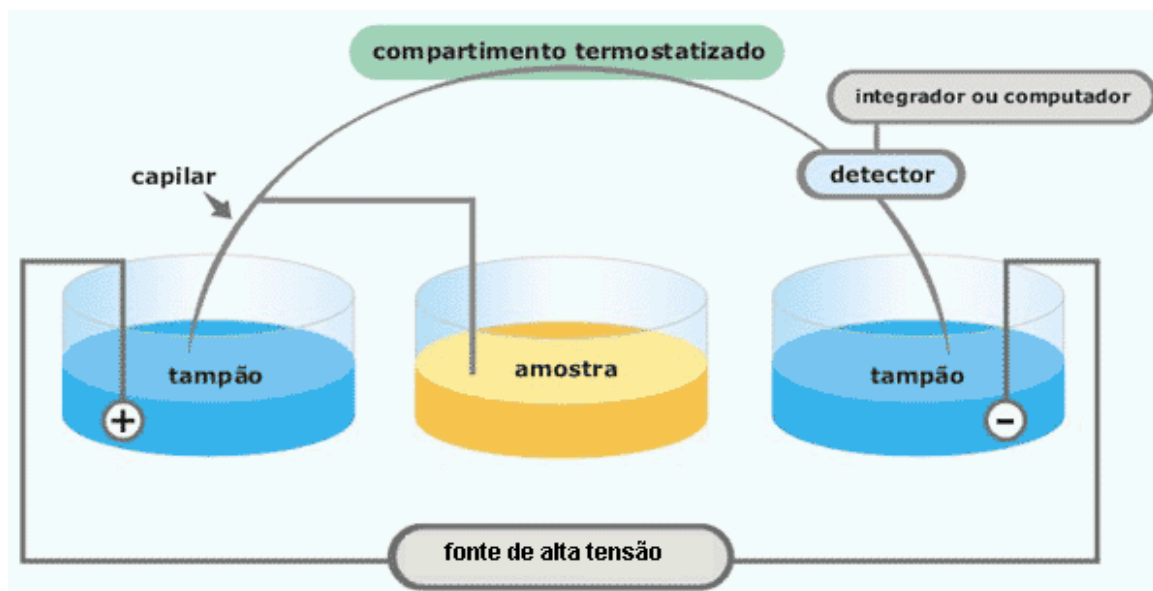


Figura 1 – Ilustração de um sistema de eletroforese capilar (EC).



Uma pequena quantidade de amostra é introduzida em uma das extremidades do capilar. A aplicação do campo elétrico provoca o movimento dos analitos em direção aos eletrodos. As separações em EC são baseadas na presença de um fluxo eletricamente induzido, denominado fluxo eletro-osmótico (FEO), um fenômeno eletroforético que gera o fluxo da solução dentro do capilar, que faz com que os solutos se movimentem em direção ao detector. Este fluxo pode reduzir significativamente o tempo de análise ou forçar um íon a reverter a sua tendência de migração em direção a um eletrodo, pelo qual está sendo atraído, devido ao sinal de sua carga. O gráfico gerado pelo detector, tempo em função de resposta do detector, é denominado eletroferograma (Figura 2) [2].

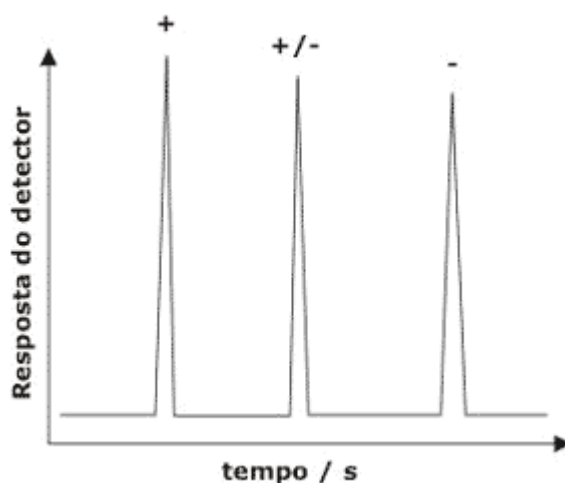


Figura 2 – Eletroferograma típico para uma análise de eletroforese Capilar (CE).

### 1.3. Fonte de alta tensão

A tendência para inovação nas análises de eletroforese capilar tem sido o desenvolvimentos de tecnologias para conferir portabilidade e automatização aos equipamentos e ao sistema como um todo para que seja possível realizar essas análises em campo, fora dos laboratórios. Para tanto, é necessário diminuir o tamanho dos equipamentos e facilitar as análises no âmbito operacional. Abaixo (figura 3) podemos observar um sistema de eletroforese capilar (EC) portátil.

Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma parte fundamental dos sistemas de eletroforese capilar segundo essas novas tendências: a construção de uma fonte de alta tensão de pequenas dimensões totalmente controlada por um computador.

Pequenas dimensões conferem portabilidade e o controle computacional confere a automatização necessária.

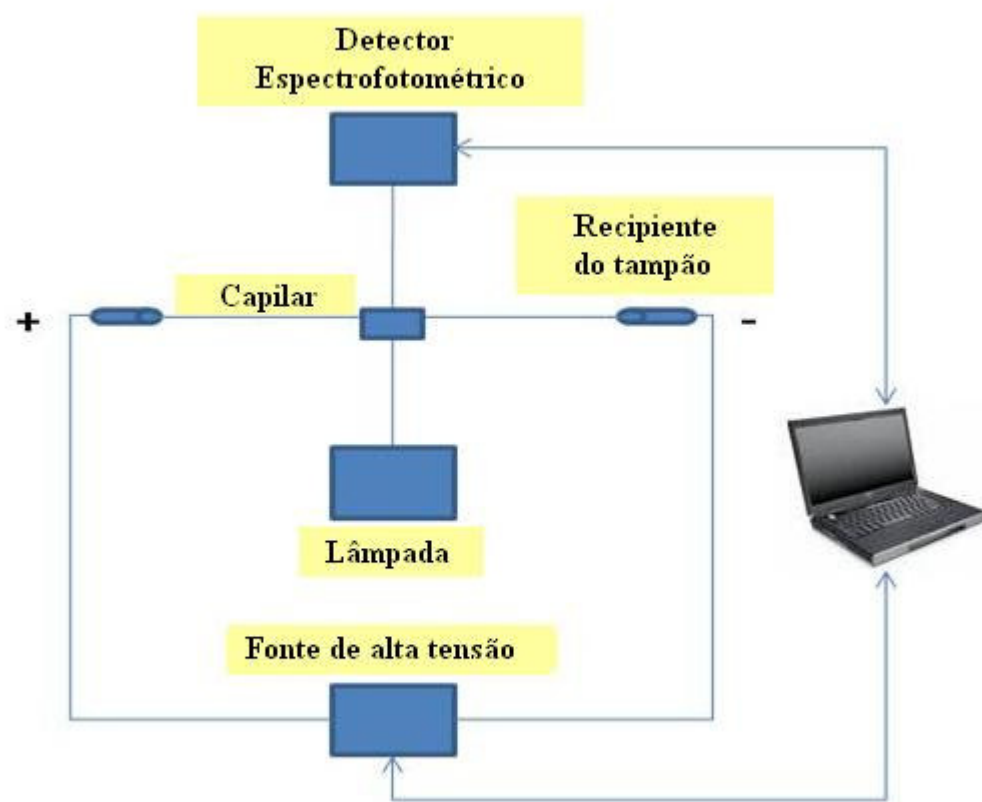


Figura 3 – Sistema de Eletroforese Capilar (EC) portátil.

Para o sistema proposto, foram definidas as características técnicas da fonte de alta tensão (Tabela 1).

CARACTERÍSTICA	FAIXA
Tensão	1kV a 6kV
Corrente máxima	160 $\mu$ A
Linearidade no ajuste de tensão e corrente	<2%
Resolução de ajuste de tensão	<20V
Resolução de ajuste de corrente	<1 $\mu$ A
Resolução de leitura da tensão	<20V
Resolução de leitura da corrente	<1 $\mu$ A
Velocidade de atualização de controle e monitoramento	<1ms

Tabela 1 – Características técnicas requeridas para a fonte de alta tensão.

O elemento elevador de tensão (conversor DC/DC) será um componente comercial. Portanto, o trabalho será mais focado no desenvolvimento do circuito de alimentação, controle e monitoramento desse componente. Será utilizado um microcontrolador para controlar todo o equipamento e se comunicar com a interface computacional. Como interface, será desenvolvido um software multiplataforma na linguagem de programação Java para se comunicar com a fonte. Esse software será capaz de traçar em forma de gráfico o comportamento das tensões e das correntes durante o período de aquisição, além de disponibilizar esses dados na forma de uma tabela de dados acessível a qualquer outro software para futuras análises dos dados obtidos.

Pensando na versatilidade do uso do equipamento, será desenvolvido uma interface homem-máquina (IHM) com teclado e display para a operação do equipamento quando desconectado do computador.

## **2. Desenvolvimento**

### **2.1. Microfontes**

Inicialmente foram adquiridos dois elementos conversores de tensão em corrente contínua da fabricante EMCO HIGH VOLTAGE CORPORATION, o Q30-5 com saída de 0 a 3kV e o Q30N-5 com saída de 0 a -3kV. Ambos os componentes podem ser alimentados por tensões em corrente contínua de 0 a 5V, sendo as suas saídas aproximadamente lineares em relação às entradas a partir de 0,7V de entrada, que é a mínima tensão de alimentação do circuito comutador interno do conversor. O ganho para estes dois conversores comutados é de aproximadamente 600 vezes e possuem corrente máxima de saída de 160 $\mu$ A.

Esses componentes elevadores de tensão foram escolhidos pela compatibilidade dos valores de tensão e corrente em relação ao necessário em análises eletroforéticas, pela facilidade de alimentação e controle e pelo seu tamanho reduzido, que irá conferir diminutas dimensões ao equipamento final. Cada fonte tem dimensões de 1,27 x 1,27 x 1,27 cm e pesa cerca de 4,25 gramas (Figura 4).

O fator de ondulação para este componente é menor que 0,5%. Ele possui proteção para curto-circuito e isolamento entre entrada e saída. A corrente de alimentação com máxima carga é de 200mA e a frequência de comutação do circuito interno pode variar entre 100kHz a 225kHz.

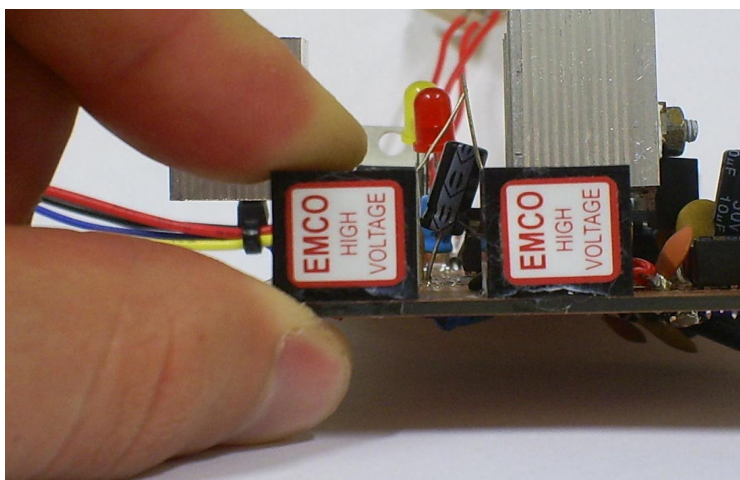


Figura 4- Microfontes.

## 2.2. Circuito de alimentação para as microfontes

Como a tensão de alimentação também é a tensão de controle das microfontes, foi necessário utilizar um *driver* de corrente para alimentar cada uma delas. Esse driver foi construído utilizando-se um amplificador operacional de potência, o OPA547 da Texas Instruments. Este amplificador tem corrente máxima de saída de 500mA. O amplificador foi alimentado com tensões de +12V e -12V, pois como não é *rail to rail*, se fosse alimentado com 0V e 12V, sua saída nunca chegaria a 0V, tensão necessária para desligar as microfontes com segurança. O amplificador foi montado na configuração seguidor de tensão. Há um circuito limitador de corrente no amplificador operacional (Figura 5) que foi utilizado para eliminar possíveis problemas de sobre-corrente no circuito. Através de um potenciômetro, a máxima corrente foi ajustada para 200mA, corrente máxima requisitada pelas microfontes em operação normal.

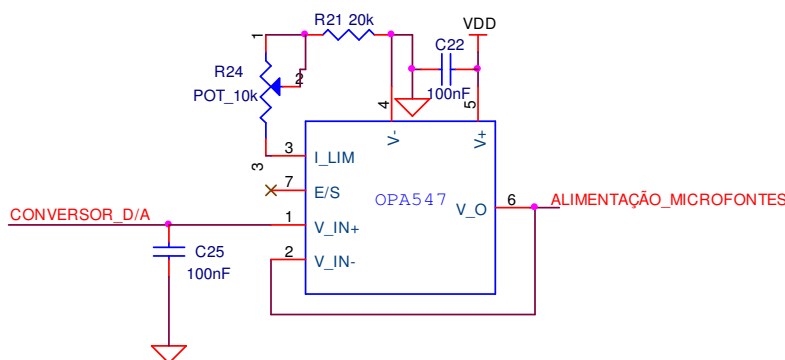


Fig. 5- Configuração de montagem do amplificador operacional OPA547.

### 2.3. Conversor digital/analógico

Para regular a tensão das microfones a partir de um sinal digital proveniente da interface computacional foi necessário o uso de um conversor digital / analógico. Neste projeto, utilizamos o conversor D/A (digital/analógico) de 8bits TLC7226 (Figura 6). Esse componente integrado tem 4 saídas independentes e interface paralela de comunicação. Neste projeto utilizou-se duas saídas, uma para cada microfone. O sinal de tensão varia de 0 a 5V em passos de 19,5mV. Esta tensão é enviada ao driver de corrente, que possui ganho 1, e depois entregue às microfones com a corrente necessária, pois a saída do conversor D/A possui alta impedância e não é suficiente para alimentá-las.

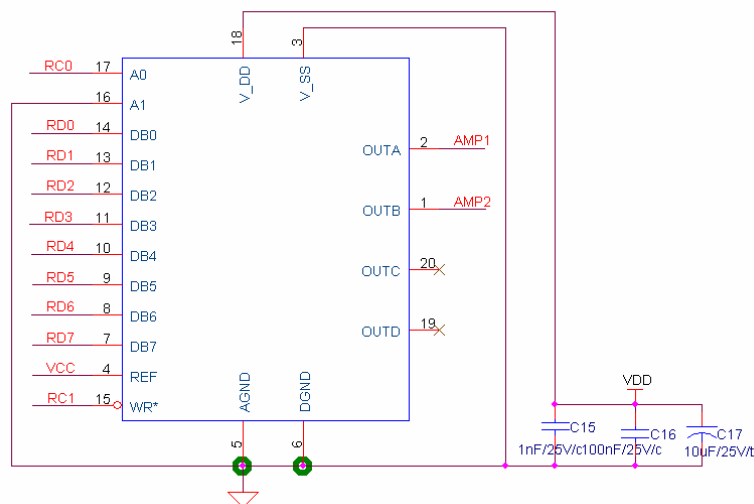


Figura 6 - Conversor digital analógico TLC7226CDW.

### 2.4. Circuito de medida da corrente de alimentação das microfones

Neste projeto, é de fundamental importância o monitoramento da corrente fornecida pelas microfones. Porém, a medição da corrente na lado de alta tensão das microfones é quase impossível, uma vez que ao altos valores de potencial não são suportados pelos circuitos de medição. Como saída para esse problema, foi instalado um circuito de medição na entrada das microfones, onde o nível de tensão varia de 0 a 5V. O circuito consiste basicamente de um resistor de baixa resistência (0,1 Ohm) e de um circuito integrado multiplicador de tensão, o MAX4377 da Maxim. Assim, a corrente

consumida pela microfona passa pelo resistor de baixa resistência e gera uma diferença de potencial proporcional à esta corrente.

Essa pequena diferença de potencial sobre o resistor é então multiplicada por 100 pelo circuito integrado MAX4173 e depois lida por um conversor A/D (analógico/digital). Como a microfona entrega no máximo 160µA e consome no máximo 200mA, teremos sobre o resistor a tensão máxima de  $(200\text{mA} \times 0,1\Omega) 20\text{mV}$ . Uma vez que o circuito integrado multiplica a tensão por 100, a máxima tensão de saída será de 2V.

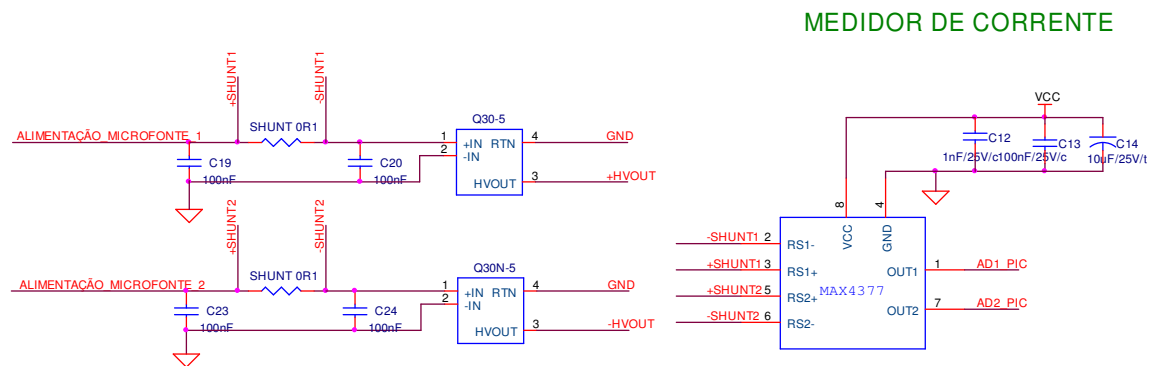


Fig. 7- Circuito de medição da corrente consumida pelas microfones.

Medindo-se a corrente que a microfona consome, sabendo-se a relação de transformação de tensões e a tensão ajustada, pode-se calcular a corrente de saída das microfones com precisão de aproximadamente 0,8µA.

## 2.5. Microcontrolador

Foi escolhido o microcontrolador PIC18F4550 da Microchip para controlar todo o equipamento e se comunicar com a interface computacional pelos motivos listados abaixo [4]:

- Comunicação USB;
- Grande número de pinos e funções (40);
- Conversores A/D de 10 bits;
- Memória de programa grande (32Kb);
- Programação em linguagem C;

- Neste equipamento, o microcontrolador é responsável por:

- O microcontrolador foi montado com um cristal de 20MHz, requisito para que a comunicação USB funcione corretamente. No seu circuito (Figura 8), há duas chaves que servem para reinicia o microcontrolador ou colocá-lo em modo de programação. Uma das preocupações no projeto foi com a filtragem do sinal de alimentação, já que a fonte utilizada é chaveada. Por este motivo foi utilizado um grande número de capacitores desacopladores.

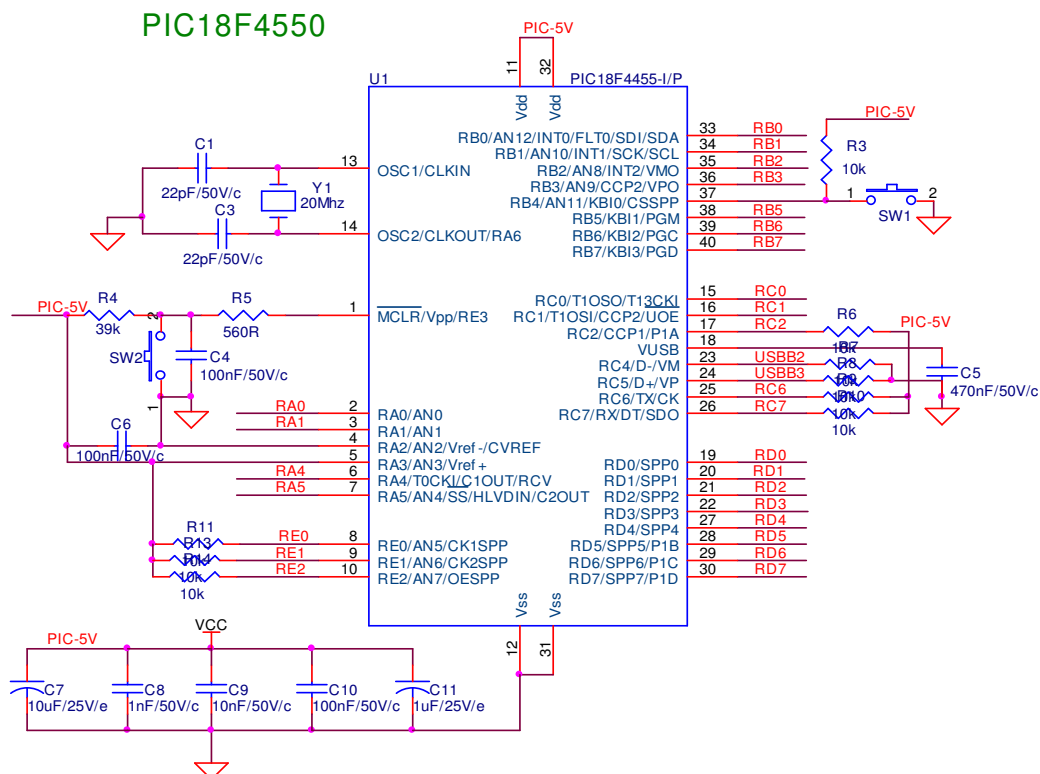


Figura 8 - Circuito de ligação do PIC.

## 2.6. IHM

O equipamento possui uma interface computacional e uma IHM (Interface homem-máquina). A IHM é constituída por um teclado de 6 teclas e por um display alfa-numérico de 2x16 dígitos. Para economizar o uso dos pinos do microcontrolador, o circuito do teclado foi projetado em forma de matriz (Figura 9). Assim, teve-se a economia de um pino em relação ao modo normal de ligação [5].

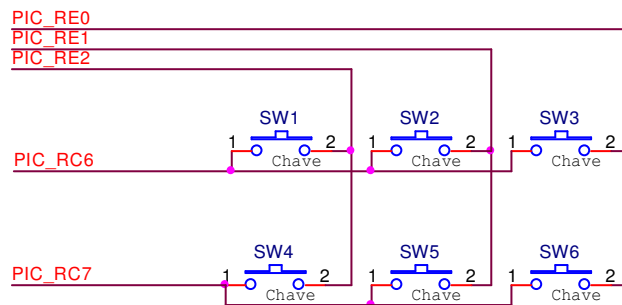


Figura 9 - Circuito de ligação do teclado ao microcontrolador.

Neste modo de ligação, é necessário desenvolver um procedimento em firmware onde dois sinais em forma de pulso complementares são aplicados nos pinos RC6 e RC7 e são comparados com os sinais lidos nos pinos restantes. Assim, é possível saber qual tecla está sendo pressionada.

O display foi ligado ao microcontrolador através de um *shift register*, circuito integrado 74HC164 da Fairchild, onde a informação a ser mostrada no display chega de forma serial através de 3 pinos (Figura 10). Assim, economizou-se 7 pinos em relação à ligação em paralelo.



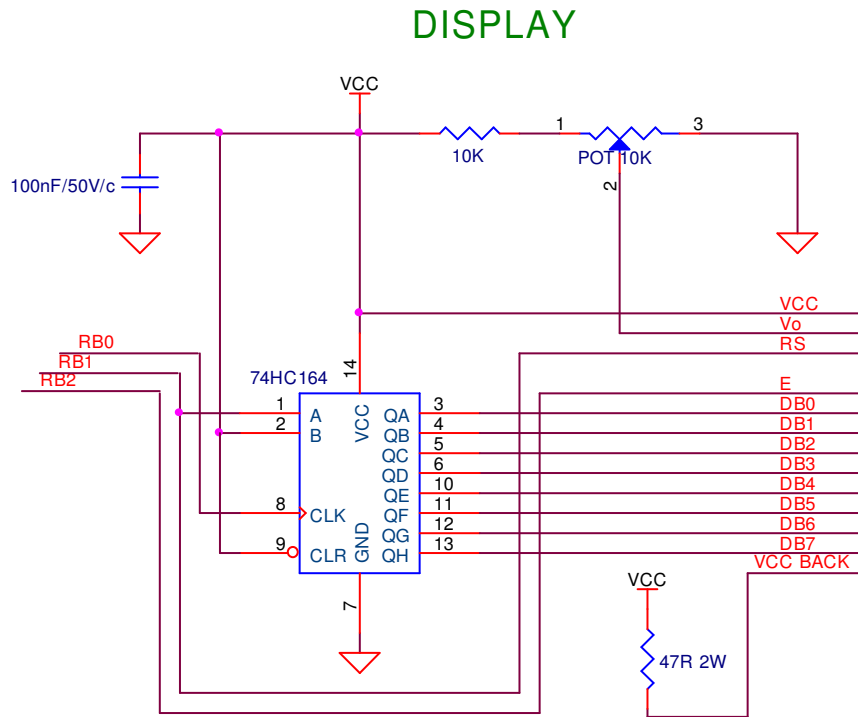


Figura 10 - Circuito de ligação do display.

## 2.7. Hardware

O hardware foi primeiramente projetado esquematicamente (Figura 11) e depois desenvolvido através do software ORCAD 9.1 (Figura 12 e 13). A placa do circuito (Figura 14) foi construída por uma fresadeira, que utiliza o software CircuitCam 3.1 para importar os arquivos do ORCAD e configurar a máquina.

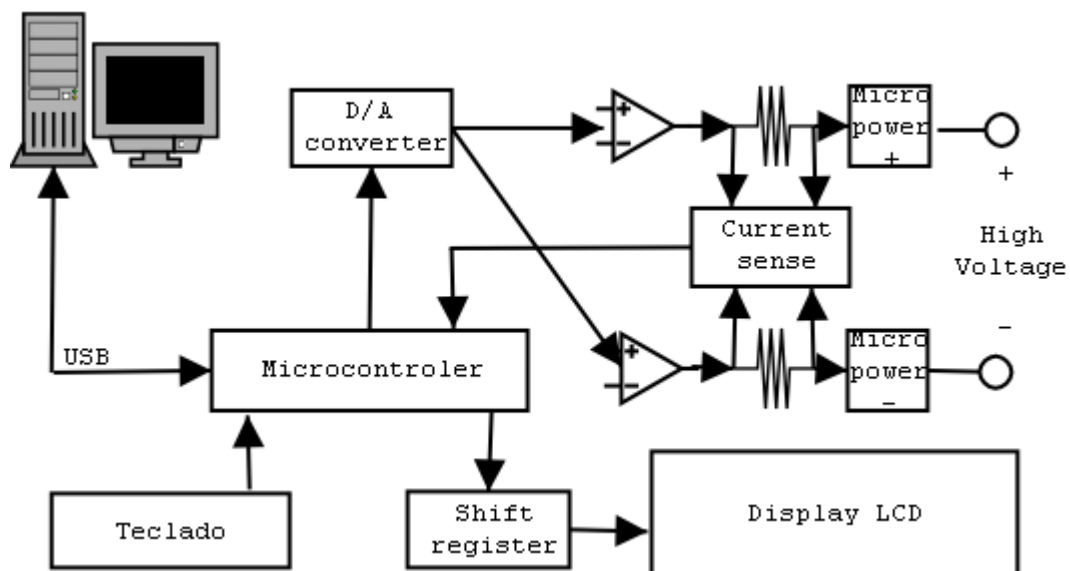


Figura 11- Diagrama do hardware.

## 2.8. Fonte de alimentação

Foi utilizada uma fonte chaveada comercial para alimentar o equipamento. A fonte entrega tensões DC de +12V e -12V com capacidade de 2 amperes por saída. No equipamento foi instalado um regulador de tensão de 5 volts, uma vez que alguns CI's necessitam desse nível de tensão. Também foram instalados capacitores para filtrar as tensões de alimentação, evitando assim possíveis ruídos e interferências provenientes da fonte chaveada.

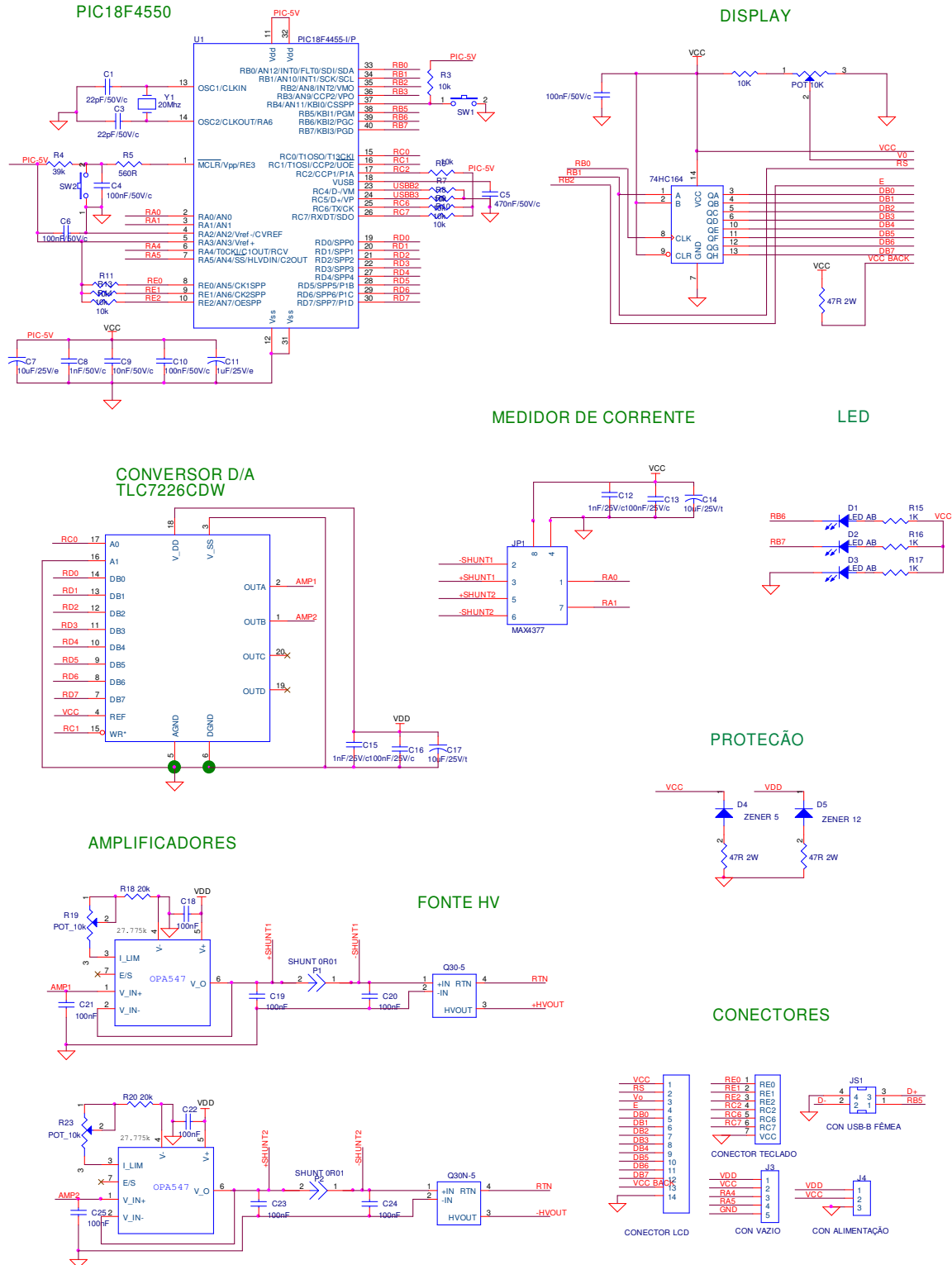


Figura 12- Esquemático do hardware.

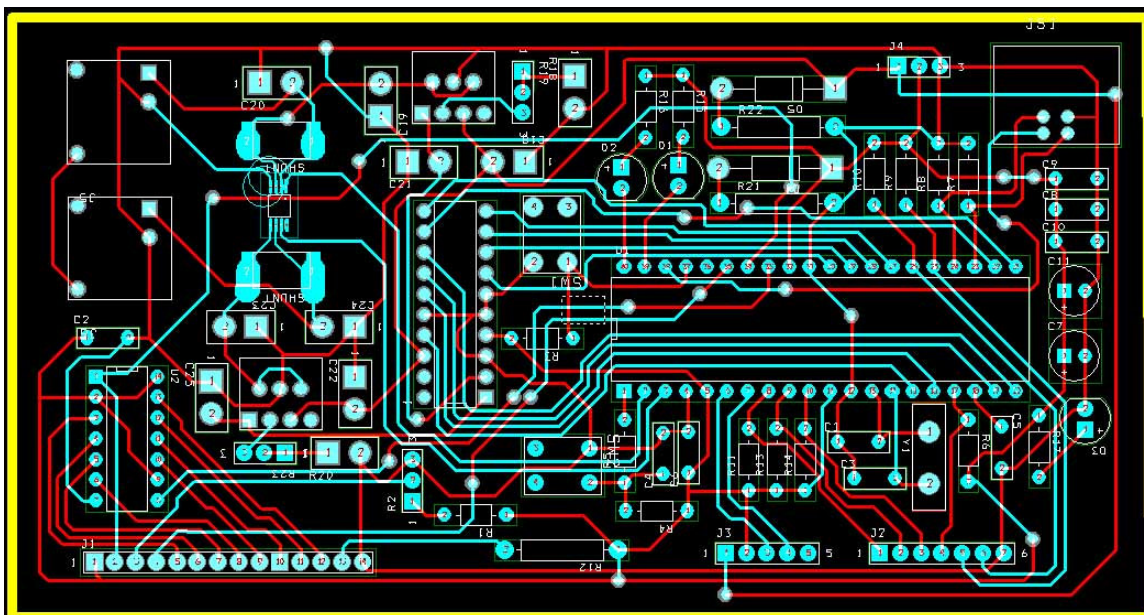


Figura 13- Layout do hardware.

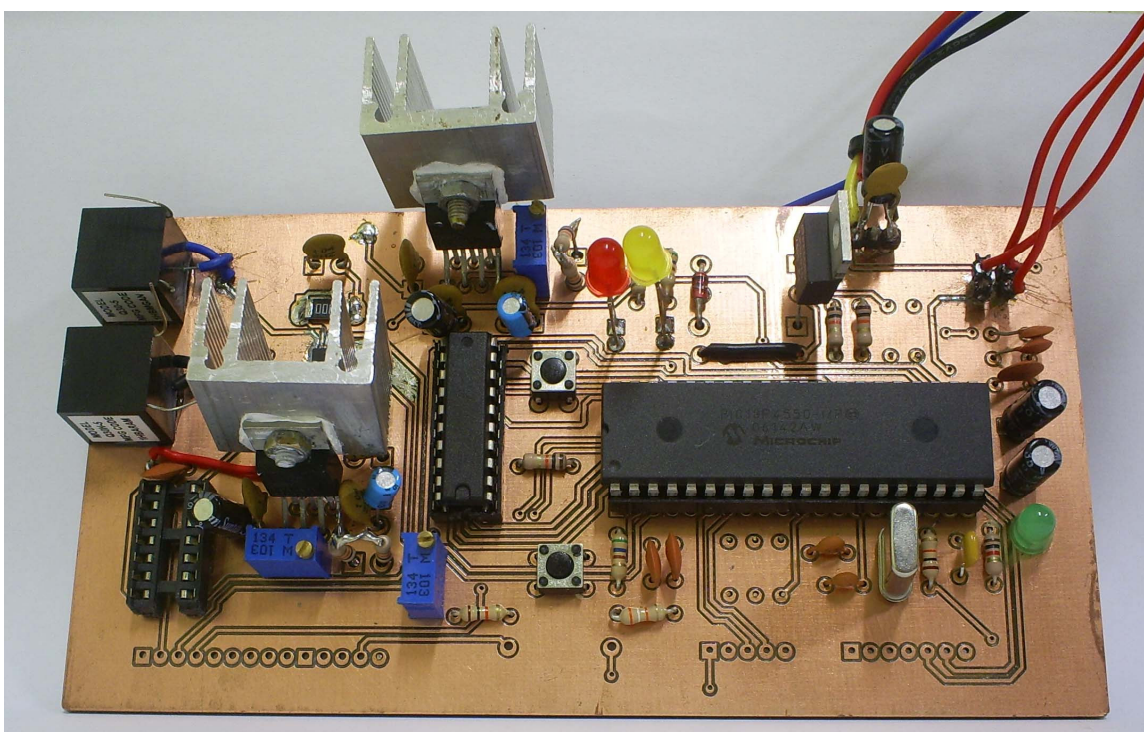


Fig. 14- Aspecto final da placa.

## 2.9. Protocolo de comunicação

Para que o equipamento se conectasse ao computador e mantivesse comunicação com o software, foi necessário desenvolver um protocolo. Para enviar um comando ao equipamento deve-se enviar 2 bytes, sendo que os dois primeiros bits do primeiro byte (Tabela 2) são utilizados como marcador (01 para indicar início de um comando) e os outros 6 bits para indicar o próprio comando (Tabela 3), e o segundo byte para passagem do parâmetro do comando. O retorno é feito através de 2 bytes com os valor da tensão e de mais 2 bytes com o valor da corrente em cada microfonte.

Envio:

Byte de comando							
7	6	5	4	3	2	1	0

Tabela 2 – Byte de comando.

- Para retorno do *status* do equipamento, deve ser enviado o byte 0xFF (11111111). O microcontrolador enviará o valor da tensão em 10bits (2 bytes) e o valor da corrente em 10 bits (2 bytes), sendo os últimos 6 bits do segundo byte o *checksum*.
- Para realizar o teste de comunicação, deve ser enviado o byte 0x1B (00011011). O microcontrolador retornará o byte 0x0F (00001111) para teste realizado com sucesso.
- Demais comandos:

7	6	5	4	3	2	1	0	COMANDO	CÓDIGO
0	1	0	0	0	0	0	0	Desliga fontes	64
0	1	1	0	0	0	0	0	Fontes acopladas	96
0	1	0	1	0	0	0	0	Fontes desacopladas	80
0	1	0	0	1	0	0	0	Seta tensão +	72
0	1	0	0	0	1	0	0	Seta tensão -	68
0	1	0	0	0	0	1	0	Seta corrente +	66
0	1	0	0	0	0	0	1	Seta corrente -	65

Tabela 3 – Comandos do protocolo.

## 2.10. Programação do firmware

Todo o *firmware* foi desenvolvido em linguagem C através do software MPLab e do compilador C18 [3]. Uma grande facilidade conseguida para a programação foi o uso de um *bootloader* fornecido pela própria Microchip. O *bootloader* é um *firmware* que possibilita reprogramar o microcontrolador sem tirá-lo do seu circuito e sem utilizar um equipamento programador, utiliza-se somente o *software* de programação e a comunicação USB.

## 2.11. Características gerais do equipamento

Há duas maneiras de controlar o equipamento: através de um software via comunicação USB ou através de sua IHM. Quando o cabo da comunicação USB não está conectado a um computador, a IHM comanda o equipamento. Quando o cabo é conectado, automaticamente a IHM é desativada, só permanecendo o controle via software.

A saída de alta tensão possui dois bornes para o terra, que estão interligados, e um borne para cada uma das duas microfones (Figura 15). O controle das microfones é independente, podendo ser ajustados diferentes valores de tensão ou corrente para cada uma. As duas microfones também podem ser interligadas para fornecer um maior valor de tensão (Tabela 4).

O equipamento pode trabalhar como uma fonte de tensão ou de corrente, pois para cada microfone, podem ser ajustados o valor da tensão ou da corrente requeridas. O valor da tensão é ajustado diretamente a partir do conversor D/A. Para ajustar a corrente existe uma rotina iterativa no *firmware* que ajusta a tensão e monitora a corrente repetidamente até encontrar um valor próximo ao requerido.

FONTE	FAIXA DE TENSÃO	CORRENTE MÁXIMA
Microfonte positiva	420V a 3kV	160μA
Microfonte negativa	-420V a -3kV	160μA
Microfontes acopladas	840 a 6kV	160μA

Tabela 4 – Configurações do equipamento.



Fig. 15- Aspecto final do equipamento.

## 2.12. Software de interface

O Software MICSENS (Figura 16) foi desenvolvido em linguagem JAVA pelo aluno de Engenharia da Computação Renê de Souza Pinto, para controlar e monitorar o equipamento. Através dele pode-se ajustar tensões e correntes em períodos programáveis, além de construir gráficos da variação das tensões e correntes no tempo. Pode-se salvar os dados adquiridos pelo programa em um arquivo de texto, assim como também salvar a figura do gráfico traçado. Por ser desenvolvido em JAVA, o *software* é multi-plataforma, conferindo grande portabilidade ao sistema.



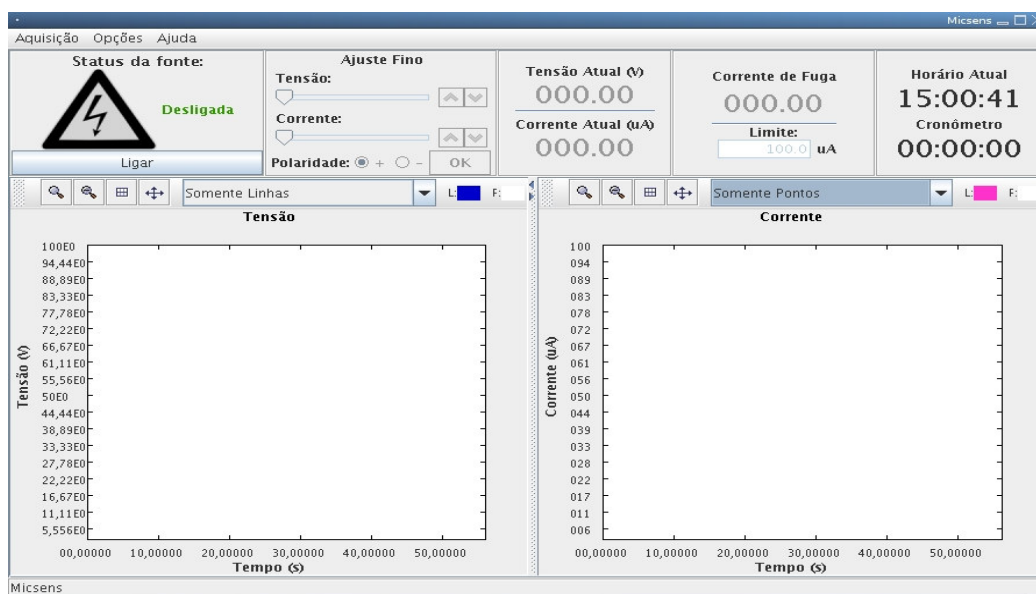


Figura 16 – Software MICSSENS.

### 3. Resultados

Para provar a funcionalidade e a qualidade do equipamento desenvolvido, foi realizado um experimento com o equipamento e uma fonte comercial, a Spellman CZE2000. O experimento se resume em conectar uma carga às fontes, variar a tensão e adquirir o sinal da corrente. A “carga” utilizada foi uma solução de Tetraborato de sódio 50mM e pH 9,0. Para este experimento as microfontes foram acopladas, entregando assim uma tensão máxima de 6kV (3kV + 3kV).

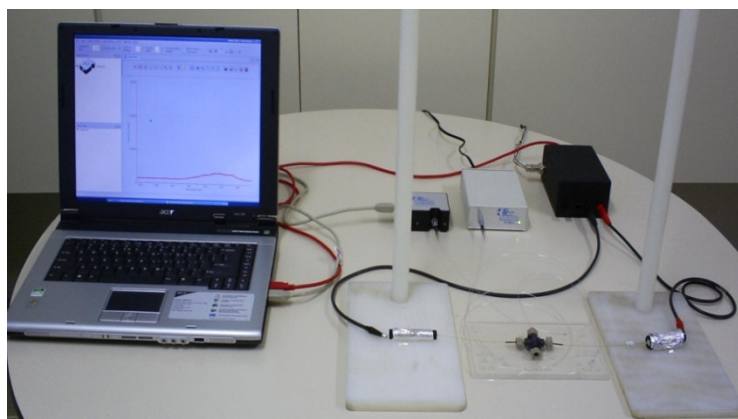


Fig. 17 – Sistema de eletroforese capilar montado com as microfontes.



Os sinais de tensão e corrente foram adquiridos para o equipamento e para a fonte comercial, variando-se a corrente em passos de  $1\mu\text{A}$  (Figura 18).

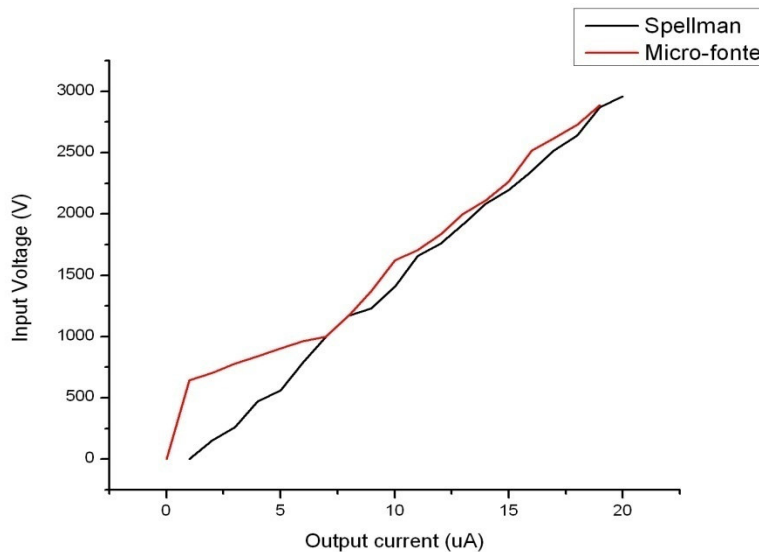


Figura 18 – Comportamento da tensão versus corrente para as microfontes e a fonte Spellman.

## 4. Conclusão

Analisando o gráfico obtido no experimento, pode-se observar uma região de não linearidade para a curva obtida com as microfontes, que se encontra entre 0V e aproximadamente 840V e acontece porque, com tensões abaixo de 420V, o circuito interno dos conversores comutados ainda não estão alimentados com tensão suficiente. Como elas estão acopladas, somente depois de 840V ( $420\text{V} + 420\text{V}$ ) é que entrarão na região linear. A não linearidade da tensão nessa região é bem acentuada e a fonte não deve operar nessa faixa. Para tensões acima de 840V, ouve um desvio de no máximo 2% entre os valores obtidos utilizando o equipamento e utilizando a fonte comercial, representando um valor tolerável segundo o projeto.

Conclui-se assim que o equipamento pode ser utilizado com grande confiabilidade na faixa de tensões de 800V a 6kV para o modo acoplado e de 420V a 3kV no modo desacoplado.

Em relação ao custo de construção do equipamento, foi gasto aproximadamente R\$600,00 no desenvolvimento do protótipo, enquanto a fonte comercial similar sem uma interface digital custa não menos que U\$2000,00.

## 5. Referências Bibliográficas

- [1] Skoog, D. A., Holler, F. J. e Nieman T. Principles of Instrumental Analysis, Saunders College Publishing, Philadelphia, 1998.
- [2] Settle, F. Handbook of Instrumental Techniques for Analytical Chemistry, Prentice-Hall International Inc., New Jersey, 1997.
- [3] Pereira, F. Microcontroladores PIC: Programação em C, Editora Erica, São Paulo, 2003.
- [4] Smith, D. W. PIC in practice, Oxford, Newnes, 2005.
- [5] Cipelli, A. M. V. Teoria e desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos, Editora Erica, São Paulo, 1990