



Projeto e construção de um medidor de corrente de  
elétrons emitidos no vácuo por campo elétrico para  
caracterização de catodos frios constituídos por  
nanotubos ou nanoestruturas

**Roberto Fonseca Iannini**

Tese apresentada na Faculdade de Engenharia  
Elétrica e de Computação da Universidade  
Estadual de Campinas para a obtenção do  
Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Vitor Baranauskas

Banca Examinadora

Prof. Dr. Vitor Baranauskas

Prof. Dr. Carlos Alberto dos Reis Filho

Prof. Dr. Márcio Fontana

Dr. Helder José Ceragioli

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Departamento de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação  
Universidade Estadual de Campinas

2005

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Ia6p	<p>Iannini, Roberto Fonseca</p> <p>Projeto e construção de um medidor de corrente de elétrons emitidos no vácuo por campo elétrico para caracterização de catodos frios constituídos por nanotubos ou nanoestruturas / Roberto Fonseca Iannini. --Campinas, SP: [s.n.], 2005.</p> <p>Orientador: Vitor Baranauskas Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.</p> <p>1. Elétrons – Emissão. 2. Nanotecnologia. 3. Instrumentação. 4. Microprocessadores. 5. Alta voltagem. I. Baranauskas, Vitor. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.</p>
------	--

Titulo em Inglês: Design and construction of a current meter for field emitted electrons in vacuum for the characterization for nano-tube or nano-structured cold cathodes

Palavras-chave em Inglês: Electron emission, Nanotechnology, Instrumentation, Microprocessors e High voltages

Área de concentração: Instrumentação e Controle

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Carlos Alberto dos Reis Filho, Márcio Fontana e Helder José Ceragioli

Data da defesa: 24/08/2005

# Agradecimentos

À minha família, pelo apoio e dedicação e acima de tudo a Deus.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Vitor Baranauskas.

Aos Drs. Helder José Ceragioli, Alfredo Carlos Peterlevitz e Márcio Fontana pelas oportunas discussões e sugestões.

Aos amigos Mauro Amorim e José Rojas pelo suporte durante os testes.

A todos aqueles, que contribuíram para a realização deste trabalho.

# Conteúdo

Resumo . . . . . vii

Abstract . . . . . vii

Preâmbulo . . . . . viii

## Capítulo I

Emissão de campo em nanotubos . . . . . 1

1.1 Tunelamento de elétrons . . . . . 1

1.1.1 Equacionamento e modelos matemáticos . . . . . 2

1.2 Algumas aplicações para emissão de campo . . . . . 3

1.2.1 Microscópio por emissão de campo . . . . . 3

1.2.2 Monitores de imagem por emissão de campo . . . . . 3

1.2.3 Aplicações médicas - Raio X . . . . . 5

1.3 Amostras utilizadas nos ensaios . . . . . 5

## Capítulo II

A câmara para aferição da emissividade . . . . . 6

2.1 Bombas de vácuo . . . . . 7

2.2 Posicionamento da amostra na câmara . . . . . 8

2.3 Ponta de prova . . . . . 9

2.4 Fonte de alta tensão . . . . . 9

2.5 Medição de corrente elétrica . . . . . 10

## Capítulo III

Topologia do medidor de corrente . . . . . 11

3.1 Alimentação do sistema . . . . . 11

3.1.1 Isolamento elétrico . . . . . 11

3.1.2 Durabilidade das pilhas . . . . . 12

3.1.2.1 Sinalização de bateria fraca . . . . . 12

3.1.3	Estabilidade da tensão elétrica . . . . .	13
3.1.3.1	Dobrador de tensão . . . . .	13
3.2	Microcontrolador . . . . .	14
3.2.1	Conversor Analógico/Digital . . . . .	15
3.2.2	Portas de entrada/saída. . . . .	15
3.2.3	Oscilador . . . . .	16
3.2.4	Módulo de comunicação serial USART . . . . .	17
3.3	Módulo de cristal líquido (LCD) . . . . .	17
3.4	Estágio analógico . . . . .	18
3.4.1	O amplificador diferencial INA118. . . . .	20
3.4.2	Proteção contra sobre-tensões . . . . .	21
3.4.3	Ajuste de ganho . . . . .	21
3.4.4	Considerações sobre a topologia escolhida. . . . .	22
3.5	Interface de comunicação serial (RS-232) . . . . .	23

## Capítulo IV

	Desenvolvimento de Firmware . . . . .	24
4.1	Ambiente de desenvolvimento . . . . .	24
4.2	Gravação de memória FLASH (ROM). . . . .	24
4.3	Descrição funcional do firmware . . . . .	26
4.3.1	Máquina de estados finitos. . . . .	26
4.3.2	Ajuste automático de escala. . . . .	27
4.3.3	Inicialização do módulo de cristal líquido (LCD) . . . . .	28
4.3.4	Interface serial padrão RS-232. . . . .	29
4.3.5	Rotina de serviço de interrupção (ISR) . . . . .	30
4.3.6	Estratégia do A/D. . . . .	30

## Capítulo V

	Desenvolvimento de software para o PC . . . . .	32
5.1	Osciloscópio . . . . .	32
5.2	Gravador de "logs" . . . . .	33
5.3	Estrutura do software . . . . .	33

## **Capítulo VI**

Construção do medidor de corrente .....	34
6.1 Ambiente de desenvolvimento de hardware .....	34
6.2 Diagrama elétrico .....	35
6.3 Confeção da placa de circuito impresso (PCI) .....	36
6.4 Arquivos para fabricação .....	37
6.5 A Placa de Circuito Impresso após a fabricação .....	37
6.6 Montagem dos componentes e gabinete .....	38
6.7 Utilização, durabilidade e atualização .....	40

## **Capítulo VII**

Ensaio na câmara de emissão de campo .....	41
7.1 Aferição de amostras de nanotubos de carbono .....	41

## **Capítulo VIII**

Considerações Finais .....	43
8.1 Sugestões para continuidade do trabalho .....	45

<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>46</b>
---	-----------

## **Apêndice A**

Detalhamento do software .....	48
--------------------------------	----

## **Apêndice B**

Terminologia .....	51
--------------------	----

## **Apêndice C**

Abreviações .....	52
-------------------	----

## Resumo

O progresso da pesquisa científica depende da qualidade e da disponibilidade de instrumentos confiáveis e de alta precisão, necessários para a exploração quantitativa de novos fenômenos, possibilitando a construção de modelos mais avançados e mais sofisticados. Um dos fenômenos que tem despertado grande interesse é a emissão de elétrons da superfície de catodos frios para o vácuo, sob a ação de campos elétricos externos. Para o estudo deste fenômeno, é necessária a medida de pequenas correntes em amostras que estão sob tensões elétricas relativamente altas. Nesta tese contribuímos com o projeto e construção de um medidor de corrente capaz de operar de maneira integrada à câmara de vácuo onde são analisadas as propriedades de emissão de nanotubos ou de materiais nanoestruturados. Foram desenvolvidos integralmente o *hardware*, *firmware* e *software*, com vistas à integração futura com outros instrumentos de controle e análise.

**Palavras Chave:** emissão de campo, nanoamperímetro, instrumentação, eletrônica, alta tensão.

## Abstract

The progress of scientific research depends of the quality and availability of reliable and high precision instruments, which are necessary for measurement of new phenomena, making possible the construction of advanced and sophisticated models. One phenomenon that has being studied is the field emission of electrons from cold cathodes in vacuum, under external electrical field influence. In order to perform this study, it is necessary to measure small electrical currents with the surface sample under high voltage. In this thesis, we have contributed with the project and construction of a electric current meter able to operate in a vacuum chamber environment where the field emission properties of sample materials (nanotubes or nanostructures) are analyzed. Both hardware, firmware and software were developed looking forward to future integration of the measurement and control equipments.

**Key-words:** field emission, nanoammeter, electronic, instrumentation, high voltage.

## Preâmbulo

O Laboratório de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica da Unicamp - LabSIF - produz e desenvolve amostras de nanodiamantes e nanotubos em geral, que são estudadas em uma câmara para análise de emissão de elétrons por efeito de campo.

Essa câmara apresentava algumas limitações, como por exemplo a ausência de processo direto para medição de corrente de elétrons através das amostras, bem como a ausência de controle automático entre a tensão aplicada e a corrente na amostra, o que demandava diversos ajustes que deveriam ser recalibrados a cada teste, além da possibilidade de erros de leitura, uma vez que diversos parâmetros tinham que ser coletados e seu cômputo realizado manualmente.

Nesta tese foi desenvolvida parte da instrumentação científica para controlar e coletar dados automaticamente, incluindo a geração de arquivos de dados, prontos para serem utilizados por uma ferramenta computacional de cálculo ou construção de gráfico, como o *software* Excel(R) ou o Matlab(R). Também foi desenvolvido *software*, para *Windows*, para visualização da corrente elétrica na amostra ao longo do tempo (osciloscópio).

O instrumento aqui implementado é um medidor de corrente elétrica DC com as seguintes características:

- Microcontrolador tipo RISC
- Visor alfanumérico de 2 linhas e 16 caracteres do tipo LCD
- Conversor analógico/digital de 10 bits
- Comunicação serial, eletricamente isolada (RS-232)
- Faixa de operação de 0  $\mu\text{A}$  a 1  $\mu\text{A}$ , com divisões de 1nA
- Alimentado por duas pilhas AA, proporcionando isolamento elétrica plena
- Amplificador diferencial para instrumentação de baixo ruído no estágio analógico

Para dar continuidade ao processo de automação da aquisição de dados, foi especificado um segundo instrumento: um controlador para uma fonte de alta tensão DC,

capaz de gerar tensões entre 0 e 5.000V, necessárias para a detecção de corrente de emissão nas amostras, com as seguintes características:

- Microcontrolador tipo RISC
- Conversor analógico/digital de 10 bits para leitura de tensão
- Conversor digital/analógico de 10 bits para geração de rampa
- Comunicação serial tipo RS-232 eletricamente isolada
- Integração com o medidor de corrente

Ambos os instrumentos aqui descritos comunicam-se com um computador do tipo PC para aquisição de dados e ajuste de parâmetros via *software* desenvolvido para *Windows 98*, em linguagem C.

Esta tese é composta por oito capítulos, sendo o primeiro uma introdução ao estudo de emissão de campo e suas aplicações. O segundo capítulo descreve o equipamento necessário à realização dos ensaios experimentais. Os capítulos III a VI descrevem as arquiteturas de *hardware* e *software* e construção adotadas para a construção do medidor de corrente de emissão de campo.

Os capítulos VII e VIII apresentam, respectivamente, os resultados de testes realizados em laboratório e considerações sobre a continuidade do trabalho.

# Capítulo I

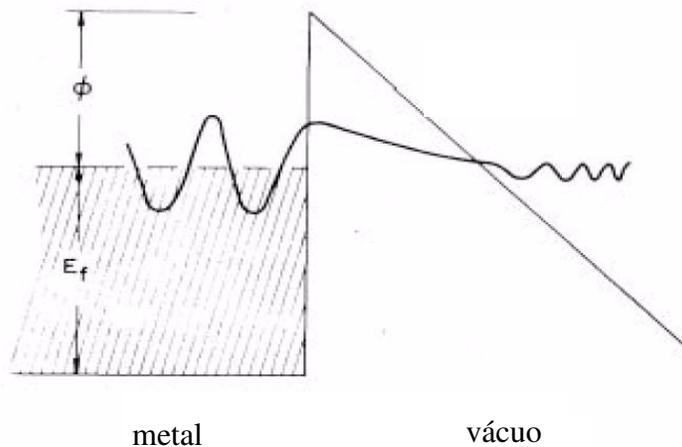
## Emissão de campo em nanotubos

Nos nanotubos de carbono ocorre emissão de elétrons por campo elétrico em temperatura ambiente e a corrente de emissão pode ser controlada através da tensão de excitação aplicada [1]. O instrumento desenvolvido nesta tese viabiliza tais medições.

### 1.1 Tunelamento de elétrons

Nos metais os elétrons de valência formam uma nuvem de elétrons livres dentro do material e têm grande liberdade de movimento, o que está diretamente relacionado à capacidade de condução elétrica dos metais. Mesmo livres dos átomos, os elétrons não são capazes de deixar o metal para o vácuo, a não ser que recebam um adicional de energia, denominada de função de trabalho  $\phi$ . Isso acontece, por exemplo, quando se lança luz ultravioleta sobre o material: os elétrons que absorvem a energia cedida pela luz podem escapar, polarizando-o positivamente (efeito fotoelétrico). Os elétrons estão sujeitos a forças quando lhes é aplicado um campo elétrico, porém ele não altera essencialmente a energia dos elétrons de um metal, e sim modifica sua barreira de potencial para escape no vácuo, conforme ilustra a **Figura 1.1**.

Os elétrons de valência do metal, com energia igual ou inferior à energia de Fermi, podem atravessar a barreira de potencial e escapar, mesmo sem receberem energia adicional. Esse comportamento é conhecido como efeito túnel (ou tunelamento) e não é determinístico, mas probabilístico, ou seja, a mecânica quântica não determina quando e como ele ocorre: apenas calcula sua probabilidade. Como a chance de um elétron escapar depende fortemente da barreira de potencial, quanto mais intenso for o campo elétrico externo aplicado, menor será essa barreira e maior a ocorrência de tunelamento.



**Figura 1.1** Barreira de potencial na presença de um campo elétrico

### 1.1.1 Equacionamento e modelos matemáticos

Existem diversos modelos matemáticos possíveis para a análise do mecanismo de condução, conforme ilustra a **Tabela 1.1**. A escolha do modelo mais adequado depende do tipo de material e faixa de operação (tensão e corrente). Para o caso dos nanotubos de carbono caracterizados neste trabalho, o modelo comumente aplicado é o de Fowler-Nordheim.

Modelo para condução	Relação corrente/tensão	Eixo das ordenadas	Eixo das abscissas
Schottky	$i \sim e^{(a\sqrt{V})/(kT)}$	$\ln(i)$	$\sqrt{V}$
Fowler-Nordheim	$i \sim V^2 e^{(-a)/V}$	$\ln\left(\frac{i}{V^2}\right)$	$\frac{1}{V}$
<i>Space-Charge limited current (SCLC)</i>	$i \sim V$ (campos fracos) $i \sim V^n$ ( $n > 1$ , campos fortes)	$i$ $\ln(i)$	$V$ $\ln(V)$
SCLC com efeito Poole-Frenkel	$i \sim V^2 e^{(a\sqrt{V})/(kT)}$	$\ln\left(\frac{i}{V^2}\right)$	$\sqrt{V}$
Poole-Frenkel	$i \sim V \sinh \frac{a\sqrt{V}}{kT}$	$\operatorname{asinh}\left(\frac{i}{V}\right)$	$\sqrt{V}$
Poole-Frenkel with overlap of Coulombic potentials (Lei de Hill's)	$i \sim V \sinh \frac{aV}{kT}$	$\operatorname{asinh}(i)$	$V$

**Tabela 1.1** Modelamentos possíveis para emissão de campo

Uma discussão mais aprofundada da modelagem matemática empregada pode ser encontrado na literatura [2].

## **1.2 Algumas aplicações para emissão de campo**

A emissão de campo proporcionada por nanotubos pode permitir o desenvolvimento de diversos dispositivos práticos, como o microscópio por emissão de campo (FEM), monitores de vídeo e aplicações médicas.

De fato, os nanotubos são uma promissora fonte de emissão de elétrons em todas as áreas de aplicação, com a vantagem de serem muito menores e requererem muito menos energia para um mesmo valor de emissividade quando comparados com filamentos quentes para emissão de elétrons.

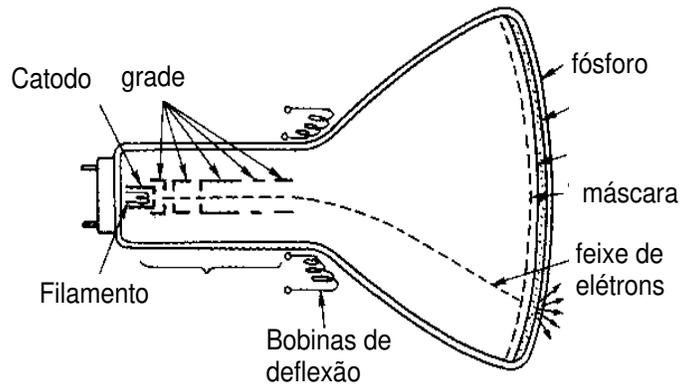
### **1.2.1 Microscópio por emissão de campo**

Em um microscópio de emissão de campo o campo elétrico é aplicado entre a ponta de um nanotubo e a amostra em teste. A variação de corrente durante a varredura da ponta de prova sobre a amostra (sem contato físico) proporciona a formação de uma imagem [3] com alta resolução. Ainda há diversos problemas associados com esse conceito, como por exemplo o sobre aquecimento da ponta de prova.

### **1.2.2 Monitores de imagem por emissão de campo**

Também conhecidos como *Field Emission Displays* (FEDs), estes dispositivos estão próximos de serem produzidos em larga escala. Atualmente alguns fabricantes já desenvolveram protótipos funcionais de monitores de vídeo utilizando nanotubos, mas o problema ainda é a fabricação em larga escala das telas.

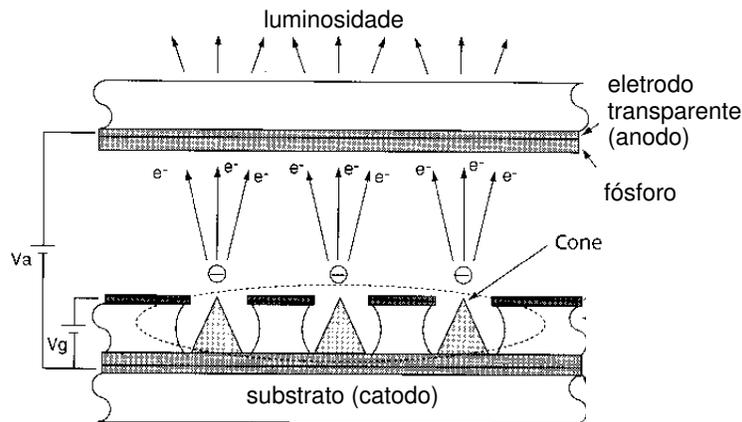
A fim de entender como funcionam os monitores de imagem baseados em nanotubos, é conveniente apresentar o funcionamento de um tubo de raios catódicos (CRT), conforme apresentado na **Figura 1.2**.



**Figura 1.2** Tubo de raios catódicos

O filamento (catodo) é aquecido, por efeito joule, de modo a ocorrer emissão de elétrons. A grade é responsável por acelerá-los, imprimindo-lhes uma direção de propagação conveniente e as bobinas de deflexão são responsáveis por colimar o feixe que é então direcionado para uma coordenada específica do anteparo de fósforo (tela) por capacitores no eixo X e no eixo Y. Quando o feixe de elétrons choca-se com o fósforo depositado na tela, faz com que átomos deste se excitem, liberando assim energia na forma de luz. A "imagem" formada sobre a tela de fósforo é o resultado de uma varredura do feixe de elétrons sobre a tela, limitando-se à resolução da máscara, que serve de guia para as regiões da tela as quais é permitida a iluminação pelo feixe de elétrons [4].

Um monitor de imagem por emissão de campo funciona de maneira similar, com a exceção de que não existe somente um feixe eletrônico e não há necessidade de deflexão para formar a imagem, pois há um gerador de feixes eletrônicos para cada ponto que se queira iluminar na tela, conforme ilustrado na **Figura 1.3**. Os catodos, formados por nanotubos, estão localizados de acordo com um gabarito, que determina a resolução da imagem e o tamanho mínimo de um ponto iluminável. Uma tela de fósforo é posicionada sobre os nanotubos, representando o anodo. A corrente de elétrons emitida pelo nanotubo deve ser alta para liberar luz suficiente através da excitação do fósforo da tela.



**Figura 1.3 Monitor de imagem por emissão de campo**

O problema atual está no desenvolvimento de técnicas para a construção e posicionamento dos nanotubos em escala industrial. Conceitualmente esses monitores já estão disponíveis, porém a um custo proibitivo.

### 1.2.3 Aplicações médicas - Raio X

Nanotubos também podem ter aplicações no processo de geração de raios X de maneira contínua e pulsada. Para gerar imagens de transparência das extremidades do corpo humano é necessária uma corrente de emissão de aproximadamente 180 mA. Em uma área de  $0,2 \text{ cm}^2$ , já foram obtidas emissões de até 28 mA, o que tornará possível a construção de aparelhos de raios X portáteis [5]. Chegou-se a observar emissões tão elevadas quanto  $1 \mu\text{A}$  em um único nanotubo de carbono, mas o problema é que a densidade de corrente cai drasticamente devido a problemas de uniformidade entre os nanotubos.

Um dos problemas para a massificação de tais aparelhos é a construção em série dos nanotubos na posição correta.

## 1.3 Amostras utilizadas nos ensaios

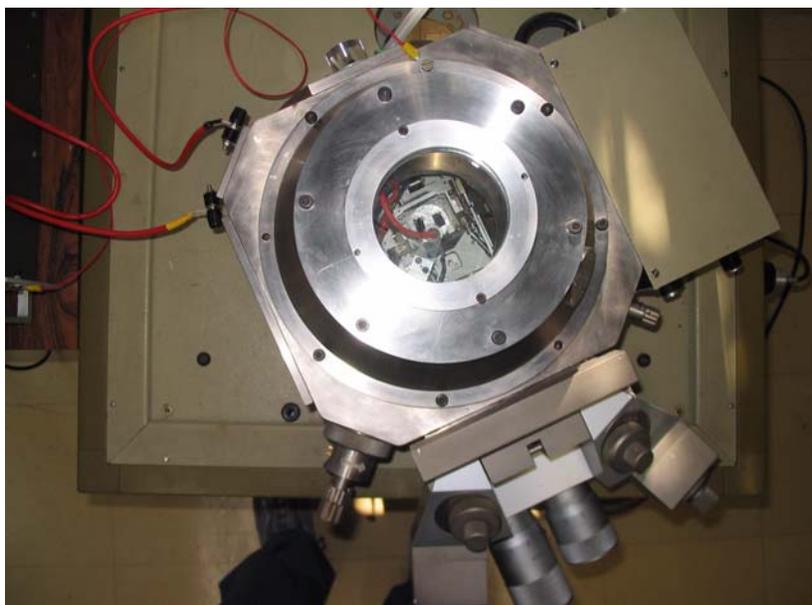
Para testes da corrente de emissão de campo, foram utilizadas amostras contendo nanotubos, produzidas neste laboratório [6], [7].

## Capítulo II

### A câmara para aferição da emissividade

O LabSIF dispõe de uma câmara para estudo de emissão de campo, ilustrada na **Figura 2.1**, com as seguintes características:

- Porta-amostras com cinco graus de liberdade
- Vácuo de até  $10^{-6}$  torr através de bomba difusora e armadilha gelada
- Tensão de até 2.000 V<sub>DC</sub> disponível para aplicação sobre a amostra
- Faixa de medição de corrente de 0  $\mu$ A a 1  $\mu$ A, com resolução de 1 nA

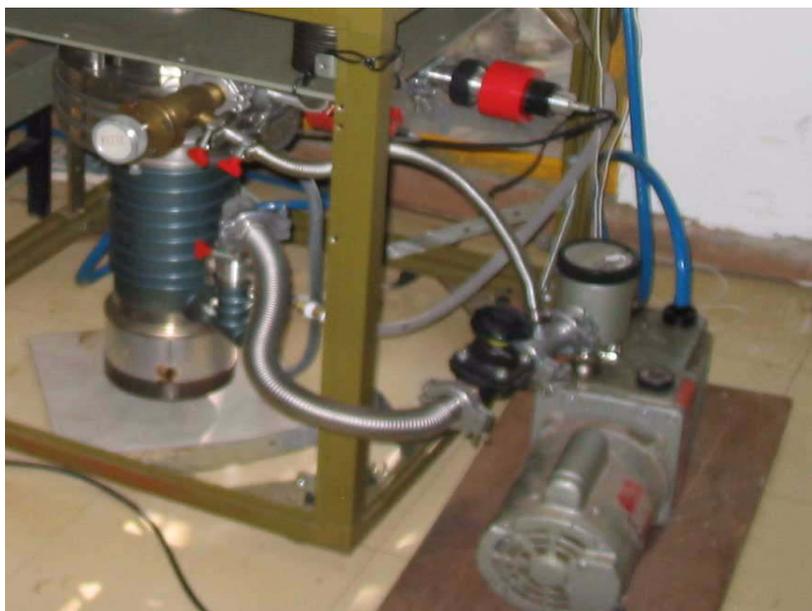


**Figura 2.1** Vista da câmara de emissão de campo do LabSIF

A câmara de emissão foi projetada e construída por diversos pesquisadores do próprio LabSIF, e passa por contínuos melhoramentos, sendo o medidor de corrente desenvolvido nesta tese uma delas. A seguir são apresentadas as diversas partes que compõem a câmara.

## 2.1 Bombas de vácuo

A bomba mecânica de vácuo atinge um pressão de  $10^{-3}$  torr em aproximadamente 20 minutos, e em seguida a bomba difusora atinge uma pressão de  $10^{-5}$  torr 3 horas de funcionamento contínuo. A **Figura 2.2** ilustra seu aspecto, e a **Figura 2.3** ilustra o detalhe da armadilha gelada, utilizada para se atingir pressões de  $10^{-6}$  torr.



**Figura 2.2 Difusora à esquerda e bomba mecânica à direita**

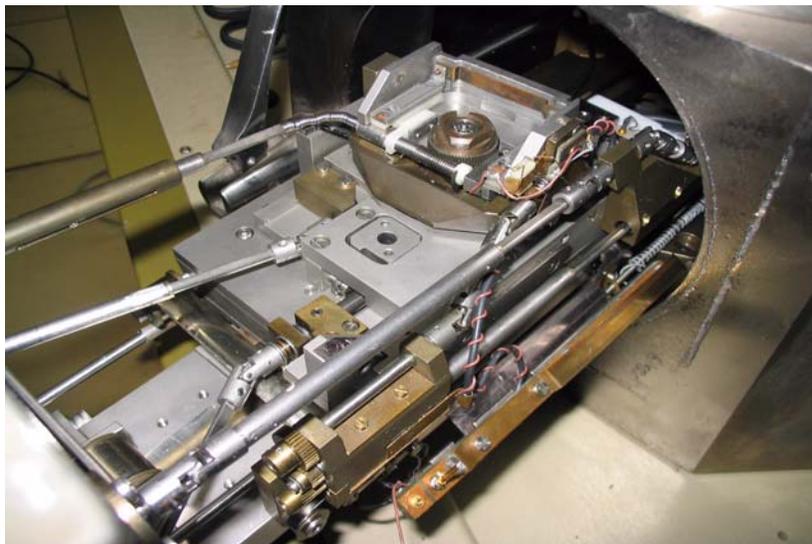
A armadilha gelada consiste em uma serpentina ao redor do corpo da câmara. O nitrogênio líquido é então inserido dentro da serpentina de maneira a diminuir a temperatura interna da câmara, fazendo com que a energia das moléculas de gás dentro da câmara diminua, proporcionando assim uma queda extra de pressão.



**Figura 2.3** Armadilha gelada ( $10^{-6}$  torr)

## **2.2 Posicionamento da amostra na câmara**

O posicionador interno permite a movimentação em  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\theta$  e  $\varphi$ , permitindo que diferentes regiões da amostra sejam aferidas sem a necessidade de interferência mecânica externa. A **Figura 2.4** apresenta uma visão geral deste posicionador com a câmara aberta.



**Figura 2.4** Posicionador da câmara

## **2.3 Ponta de prova**

A ponta de prova ou anodo é um elemento importante do sistema de aferição de medição de campo, pois a corrente medida depende diretamente de sua área. A câmara possui um anodo móvel de área circular. A área do anodo é utilizada no cálculo da densidade de corrente na amostra [6].

## **2.4 Fonte de alta tensão**

A fonte de alta tensão utilizada é a HP-6522A, capaz de fornecer uma tensão de até 2.000V em corrente contínua. Sua regulação provou-se suficientemente boa para a corrente exigida nos testes, pois não apresentou variação superior a 5% durante os testes realizados.

Cuidados extras devem ser tomados para o ajuste de corrente desse equipamento, devendo ser incrementado apenas até o ponto onde o miliamperímetro analógico do painel acuse uma corrente próxima a zero, pois caso esse ajuste esteja completamente fechado (giro máximo para a esquerda), a tensão de saída será bem mais baixa que a realmente lida pelo ajuste decádico de tensão. Também deve-se tomar o cuidado de não se elevar demais esse ajuste, pois uma corrente excessivamente alta poderia danificar o medidor de corrente desenvolvido nesta tese, apesar de ter se mostrado resistente a descargas de até 10 mA.

O risco de choque elétrico existe quando a fonte está em funcionamento, uma vez que seus conectores são do tipo BNC e os conectores da câmara são do tipo "pino banana", não oferecendo nenhuma proteção especial para altas tensões. Os conectores do medidor de corrente são mais seguros, mas mesmo assim não devem ser manuseados quando em funcionamento.

Esta fonte de tensão só permite ajustes manuais, o que limitou a aquisição de dados a algumas dezenas de pontos durante a realização de ensaios para a caracterização de nanotubos.

## 2.5 Medição de corrente elétrica

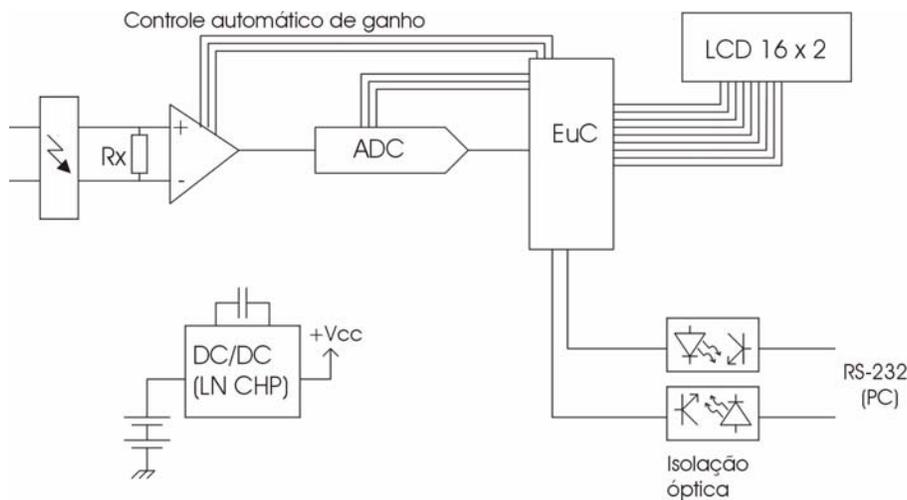
Para garantir o correto funcionamento da fonte de alta tensão, uma carga resistiva de valor elevado ( $1M\Omega$ ) foi conectada à saída da fonte de alta tensão, drenando uma corrente máxima de 2 mA, em paralelo com a câmara de emissão de campo. Caso essa carga resistiva seja removida, a tensão de saída demoraria muito tempo para estabilizar quando o ajuste decádico do painel fosse decrementado. Essa carga resistiva é composta por vários resistores em série, recobertos por borracha termo-retrátil, o que afasta o risco de choque elétrico.

A medição de corrente elétrica é realizada de maneira direta na tela do medidor de corrente ou diretamente no computador conectado à aquisição de dados, conforme descrito no Capítulo III.

# Capítulo III

## Topologia do medidor de corrente

Com base na disponibilidade de componentes e diversos testes realizados, chegou-se à topologia da **Figura 3.1**, capaz de efetuar medidas entre  $0 \mu\text{A}$  a  $100 \mu\text{A}$ , em 3 escalas, com resolução de  $1 \text{ nA}$  na escala de maior sensibilidade.



**Figura 3.1 Diagrama em blocos do medidor de corrente implementado**

Os diversos blocos que compõem o sistema são descritos a seguir.

### 3.1 Alimentação do sistema

A alimentação desse instrumento é crítica, pois deve apresentar isolação elétrica entre as partes sujeitas à alta tensão e ao restante do circuito, ser econômica e apresentar regulação melhor que 5% para que o conversor analógico/digital funcione dentro da faixa de precisão descrita pelo fabricante.

#### 3.1.1 Isolação elétrica

Devido à alta tensão utilizada na alimentação da amostra em estudo dentro da câmara, o circuito eletrônico do medidor de corrente, em série com a amostra, apresentaria risco de

formação de arco voltaico entre sua fonte de alimentação e a fonte de alta tensão, caso não houvesse isolação elétrica suficiente.

A não disponibilidade comercial de conversores DC/DC com alto nível de isolação forçou a escolha de alimentação por pilhas, o que proporciona uma isolação elétrica integral, mas leva a problema de regulação. Para que isso seja contornado, é necessário um dobrador de tensão, que também apresenta problemas de regulação de tensão, mas que pode ser resolvido com um regulador linear na faixa de tensão necessária para a alimentação das partes analógicas e digitais do circuito eletrônico.

### **3.1.2 Durabilidade das pilhas**

Por ser alimentado por pilhas, é fundamental que o circuito consuma o mínimo possível de energia, maximizando assim o tempo de operação ininterrupta do instrumento.

O projeto do circuito foi concebido dentro desta restrição, assim como o *firmware* que é executado pelo microcontrolador. Foram implementadas estratégias para minimização de consumo por parte do processador e seus periféricos, eventualmente forçando o microcontrolador para um modo de baixo consumo (*sleep mode*).

O instrumento atinge seu consumo máximo quando a comunicação serial com o PC é acionada, uma vez que os opto-isoladores, responsáveis pela isolação entre o computador e o instrumento, consomem uma corrente significativa devido aos seus LEDs internos.

De acordo com medições realizadas no circuito durante a fase de desenvolvimento, o segundo maior consumidor de corrente é a tela de cristal líquido (LCD), mas seu valor é baixo o suficiente para não haver necessidade de desligá-la via *firmware*.

#### **3.1.2.1 Sinalização de bateria fraca**

O circuito integrado responsável pela alimentação em 5 Volts gera um sinal de saída todas as vezes que a tensão nas pilhas não é suficiente para garantir a regulação de tensão. Esse sinal é então encaminhado a um pino de I/O do microcontrolador e, via *firmware*, uma rotina desabilita a operação do conversor analógico/digital e gera, na tela de cristal líquido,

uma mensagem de advertência indicando que as pilhas estão muito fracas para garantir uma medida precisa.

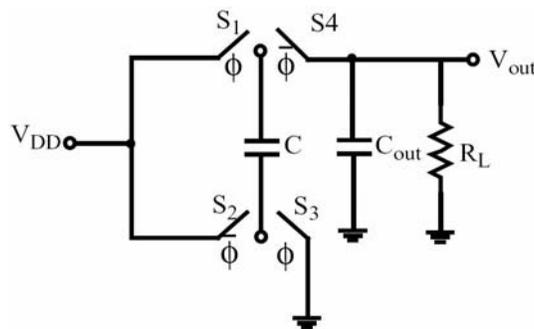
### 3.1.3 Estabilidade da tensão elétrica

A energia armazenada pelas pilhas decai com o uso, e conseqüentemente a tensão em seus terminais diminui [8].

Para contornar esse problema foi utilizada a seguinte técnica: a tensão das duas pilhas (2.4 volts) é quadruplicada por um circuito do tipo *charge pump* e entregue a um regulador linear para então serem fornecidos os 5 volts necessários ao microcontrolador, tela de cristal líquido e demais componentes.

#### 3.1.3.1 Dobrador de tensão

A **Figura 3.2** ilustra o circuito básico de um dobrador de tensão [9]. Seu funcionamento é simples: as chaves  $S_1$  e  $S_3$  são acionadas simultaneamente, carregando o capacitor. Em seguida, as chaves  $S_1$  e  $S_3$  são abertas e as chaves  $S_2$  e  $S_4$  são fechadas, o que faz com que  $V_{out}$  seja igual a  $V_{DD} + V_{capacitor}$ . Dessa maneira a tensão vista pela carga  $R_L$  é aproximadamente  $2xV_{DD}$ .



**Figura 3.2** Esquema de um dobrador de tensão (*charge pump*)

A implementação prática deste circuito está disponível na forma de circuitos integrados que contêm chaves de baixa impedância e circuito de controle, além de vários estágios dobradores em cascata, permitindo assim a obtenção de tensão várias vezes superior à tensão de alimentação de entrada ( $V_{DD}$ ).

Os capacitores para a implementação desse circuito devem apresentar baixa ESR, pois contribuem para o aumento da impedância da fonte de alimentação. Comercialmente, os capacitores que apresentam a menor ESR são os do tipo "X7R", que podem apresentar capacitância de até 10  $\mu\text{F}$  em encapsulamento cerâmico SMD [10].

O fornecimento de alimentação para o medidor de corrente é realizado através do novo circuito integrado do tipo *charge pump* de baixo ruído e baixa tensão da *Texas Instruments*, o TPS60141, capaz de fornecer 5 Volts com regulação suficiente para esta aplicação.

### 3.2 Microcontrolador

O microcontrolador escolhido para a implementação do circuito foi o PIC16F877, da *Microchip*. Trata-se de um componente suficientemente completo, possuindo em seu encapsulamento os seguintes módulos:

- Memória FLASH de 8 kB (faz o papel da "ROM")
- Circuito oscilador
- Memória RAM de 368 bytes
- Conversor Analógico/digital de 10 bits
- Módulo de comunicação serial (USART)
- 3 timers de propósito geral
- Módulos de modulação de pulso (PWM)

A programação foi realizada em C, com base em [11] e [12], utilizando-se o compilador da *Hi-Tech* específico para a família PIC. O Capítulo IV apresenta maiores detalhes sobre o processo de programação.

Alguns dos módulos do microcontrolador não foram utilizados nesse projeto. A descrição dos módulos relevantes é dada a seguir.

### 3.2.1 Conversor Analógico/Digital

O conversor A/D está embutido no mesmo chip do microcontrolador, compartilhando seus barramentos internos. Dessa maneira, o acesso ao conversor, isto é, aos seus registros de controle e dados, é feito como se esses fossem posições de memória interna, não requerendo nenhum tipo de inicialização especial ou protocolo de comunicação.

A taxa de amostragem foi programada para 480 amostras por segundo, apesar de o sinal observado possuir freqüências muito mais baixas, da ordem de décimos de Hz. A sobre-amostragem é necessária, pois o ruído elétrico induzido pela rede elétrica (60 Hz) pode interferir no estágio de amplificação analógica, descrito no item 3.4.1.

Dessa maneira, garante-se que freqüências até 240 Hz estão sendo representadas com fidelidade pelo conversor A/D (sem *aliasing*) [13], tornando possível a implementação de um filtro digital passa-baixas, para a remoção do ruído inserido pelo ambiente durante a leitura.

### 3.2.2 Portas de entrada/saída

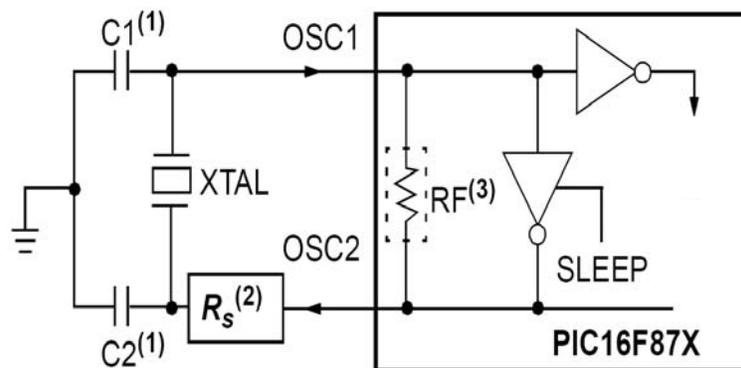
O microcontrolador escolhido neste projeto possui 5 portas de entrada e saída (I/O), assim organizadas:

- Porta A: 6 bits - seus pinos podem ser programados como entrada para o conversor A/D, sobrescrevendo a porta digital. Neste projeto, o bit A0 foi utilizado como entrada de sinal analógico e os bits A2 e A3 como entradas analógicas para as referências de tensão negativa e positiva para o conversor A/D, respectivamente;
- Porta B: 8 bits - o bit B0 foi utilizado como entrada para a sinalização de bateria baixa gerada pelo circuito integrado responsável pela regulação de tensão, e os bits B1 a B3 foram utilizados para implementar o controle de ajuste automático de ganho para a amplificação analógica;

- Porta C: 8 bits - os bits C4 e C5 foram utilizados para o controle de sinalização de dados/comandos para o módulo de cristal líquido. Os bits C6 e C7 foram utilizados como saída e entrada para a USART, responsável pela comunicação serial com o PC;
- Porta D: 8 bits - todos os bits foram utilizados para implementação do barramento de comunicação com o módulo de cristal líquido. Por esse barramento são enviados os comandos (posição do caracter, linha, etc) e os caracteres a serem apresentados na tela;
- Porta E: 3 bits - não foi utilizada.

### 3.2.3 Oscilador

O oscilador, necessário para gerar o relógio para o microcontrolador, está embutido no chip [14]. Somente um cristal de quartzo e capacitores para estabilidade conectados aos pinos OSC1 e OSC2 são necessários ao seu funcionamento, conforme ilustrado pela **Figura 3.3**.



**Figura 3.3 Oscilador integrado ao chip do microcontrolador**

A configuração de oscilador é selecionada durante a programação do microcontrolador, em que um registro é responsável por selecionar entre 3 topologias distintas de oscilador, que necessitam de componentes externos diferentes, podendo ser do tipo RC, XT (cristal de quartzo) ou HS (oscilador externo de alta velocidade). Devido a alta

velocidade necessário ao funcionamento do conversor A/D e da comunicação serial, foi selecionado o tipo XT.

### **3.2.4 Módulo de comunicação serial USART**

A comunicação serial com o PC é feita pelo módulo USART - *Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter*, presente no microcontrolador. Sua utilização é similar à do módulo de conversão A/D, ou seja, os registros de entrada e saída de dados estão mapeados em memória, e não necessitam de nenhum protocolo especial para se iniciar a transmissão ou recepção de dados [15].

## **3.3 Módulo de cristal líquido (LCD)**

A **Figura 3.4** apresenta a tela de cristal líquido, de 16 caracteres em cada linha, utilizada para a visualização dos dados gerados pelo instrumento. Esse componente utiliza o controlador embutido HD44780: seus barramentos de dados e controle são unificados, e um sinal auxiliar (RS) é necessário para distinguir qual destas duas possibilidades será acessada (dados ou controle). Há também um outro sinal auxiliar (EN) que serve para habilitar o LCD, fazendo com que o dado presente no barramento seja processado. Existe um terceiro sinal de controle (R/W) que não é utilizado nesse projeto, e que serve para leitura, através do mesmo barramento, do conteúdo de cada caracter presente na tela. Essa função seria útil caso houvesse mais de um microcontrolador operando no mesmo barramento.



**Figura 3.4** Tela de cristal líquido (LCD)

O LCD deve ser inicializado antes de se enviar qualquer caracter de dados, pois possui diferentes modos de operação e interface (4 ou 8 bits), conforme observado em [16].

Para barramentos de 8 bits, é necessária uma seqüência de inicialização que indique explicitamente a largura de barramento utilizada, bem como o formato de caracteres desejado (5x7 ou 5x8 *pixels*). Também há a possibilidade de comando para o deslocamento horizontal da mensagem presente nas linhas da tela, limpeza de tela e outros. O item 4.3.3 apresenta maiores detalhes.

### 3.4 Estágio analógico

Para medir a corrente que flui por um circuito, um amperímetro deve ser conectado em série com a carga, de maneira a interferir o mínimo possível na impedância do circuito. Idealmente, um amperímetro deve apresentar impedância igual a zero ohms.

Dependendo da ordem de grandeza de tensão e corrente envolvidas no circuito, pode-se utilizar um circuito realimentado (parte "a") ou a topologia *shunt* (parte "b"), conforme ilustrado na **Figura 3.5**.

O circuito realimentado é indicado para medição de correntes tão baixas quanto 1 fA [17]. Devido à configuração inversora do amplificador operacional, o terminal de entrada é forçado a zero volts pelo resistor de realimentação  $R_F$ , resultando em uma resistência

série equivalente muito próxima a zero ohms, ou seja, essa topologia interfere pouco no comportamento da corrente no circuito. O valor de  $R_F$  pode ser relativamente grande, pois o amplificador está conectado na configuração inversora, forçando "0V" no terminal não inversor. Dessa maneira a queda de tensão deste circuito quando em série com a carga é desprezível, mesmo sendo o valor de  $R_F$  relativamente alto.

Já na topologia *shunt*, a corrente do circuito deverá ser suficientemente alta para produzir uma tensão significativa no terminal não-inversor do amplificador operacional, porém essa tensão ainda deverá ser muito menor que a tensão sobre o circuito em teste, para que a presença do resistor *shunt* não interfira no funcionamento do circuito. O valor de  $R_{SHUNT}$  deve ser pequeno em relação à impedância da carga mas grande o suficiente para permitir uma leitura significativa de tensão ( $E_{IN}$ ) em seus terminais.

No caso particular de medição de corrente de emissão de campo em nanotubos, pode-se utilizar a configuração *shunt*, com uma resistência em torno de  $5\text{ k}\Omega$ , pois é um valor pequeno quando comparado com o valor da impedância da carga (*gap* da câmara), que é da ordem de gigaohms. Nessas condições, observa-se uma tensão de alguns milivolts na entrada do amplificador operacional, sendo suficiente para excitá-la de maneira linear, desde que se utilize componentes de baixo ruído e alto valor de CMRR.

Para isto, foi selecionado um amplificador diferencial de instrumentação com vários estágios integrados, o INA 118, da *Burr-Brown* [18], de modo a garantir baixo ruído e balanceamento preciso entre as entradas positiva e negativa do diferencial.

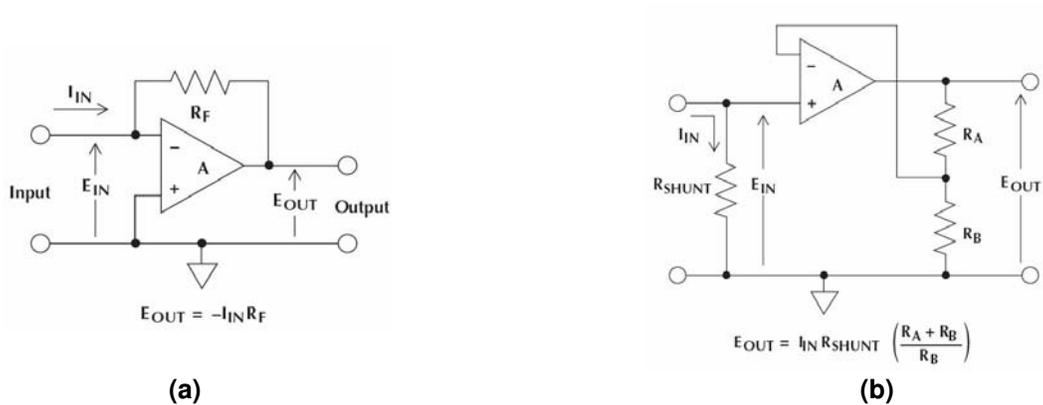


Figura 3.5 Topologia para medição de corrente

### 3.4.1 O amplificador diferencial INA118

Trata-se de um amplificador de instrumentação de baixo ruído e alto ganho. Sua estrutura interna é apresentada na Figura 3.6.

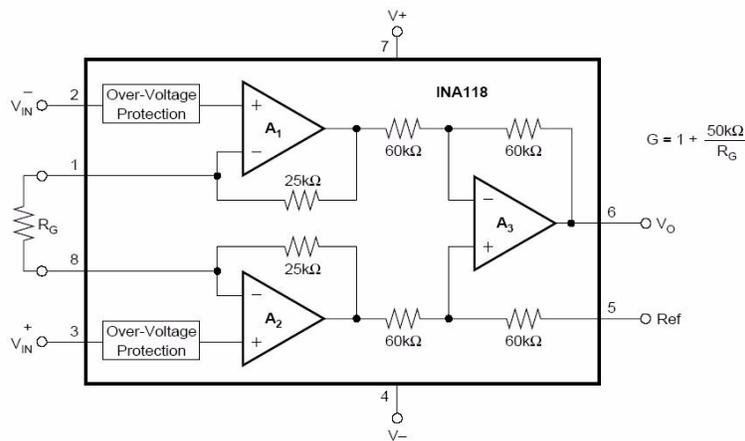


Figura 3.6 Amplificador de instrumentação INA118

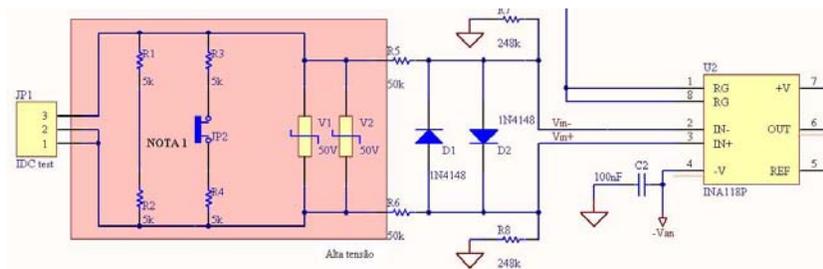
As entradas  $V_{in+}$  e  $V_{in-}$  são protegidas contra sobre-tensão (até 40 Volts). Essa característica é importante, pois caso haja formação de arco voltaico dentro da câmara de emissão de campo, a diferença de potencial elétrico sobre o resistor *shunt* será próxima à tensão de alimentação do teste, que pode chegar a 2.000 V<sub>DC</sub>.

Outra característica importante desse amplificador diferencial é a seleção de ganho através de um único componente externo - o resistor  $R_G$ . Esta característica possibilitou a implementação de um sistema de ajuste ganho utilizando-se chaves eletrônicas de baixo ruído para a seleção digital de seu valor.

### 3.4.2 Proteção contra sobre-tensões

Para que o amplificador de instrumentação sobreviva a uma eventual formação de arco voltaico dentro da câmara de emissão de campo, um varistor externo foi conectado em suas entradas. Desta maneira, sempre que a tensão no varistor for maior que 30 Volts haverá condução, evitando assim a destruição do amplificador de instrumentação. Em paralelo com o varistor há também dois diodos retificadores de sinal, conectados em oposição um ao outro, de maneira a entrar em condução sempre que o valor da tensão de entrada for próximo ao valor de tensão de *threshold*. A **Figura 3.7** ilustra o estágio de entrada para o amplificador de instrumentação.

A interferência desses componentes adicionais sobre o valor da tensão percebida na entrada do amplificador de instrumentação é mínima, pois em regime de operação normal, a tensão de entrada é de alguns milivolts, o que está bem abaixo do ponto de condução de qualquer um dos componentes de segurança presentes no circuito.



**Figura 3.7** Estágio de entrada para o amplificador de instrumentação

### 3.4.3 Ajuste de ganho

O circuito de amplificação analógico foi implementado com uma sofisticação extra: um seletor automático de resistor de ganho ( $R_G$ ), conforme ilustrado pela **Figura 3.8**.

Esse seletor consiste na utilização de chaves eletrônicas de baixa resistência, em torno de  $1,25 \Omega$ , e baixo ruído, próprias para esse tipo de controle, disponíveis sobre o nome comercial de MAX4690. O *firmware* descrito no capítulo seguinte contém a estratégia para comutação desse seletor.

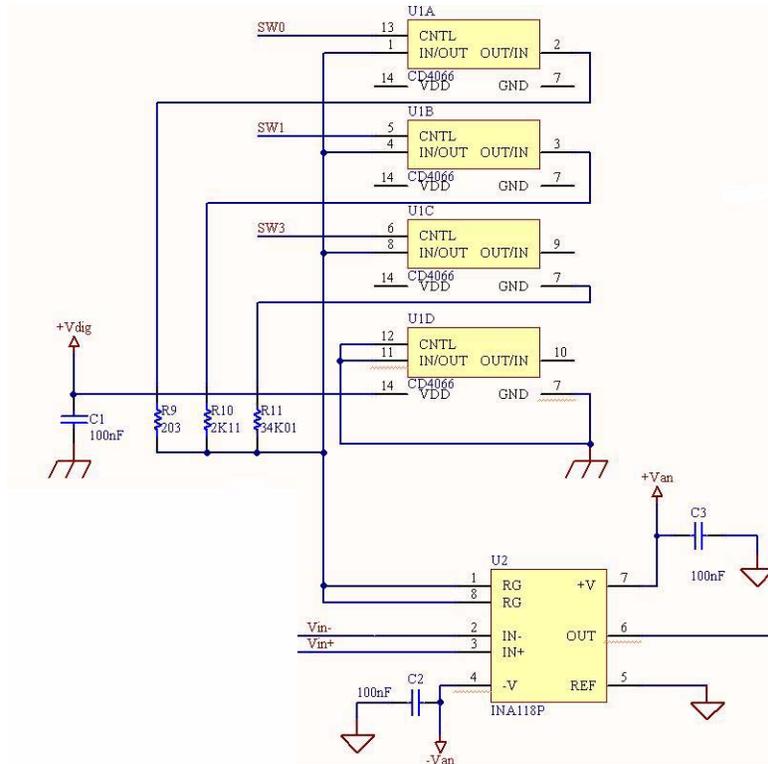


Figura 3.8 Seletor eletrônico do resistor de ganho

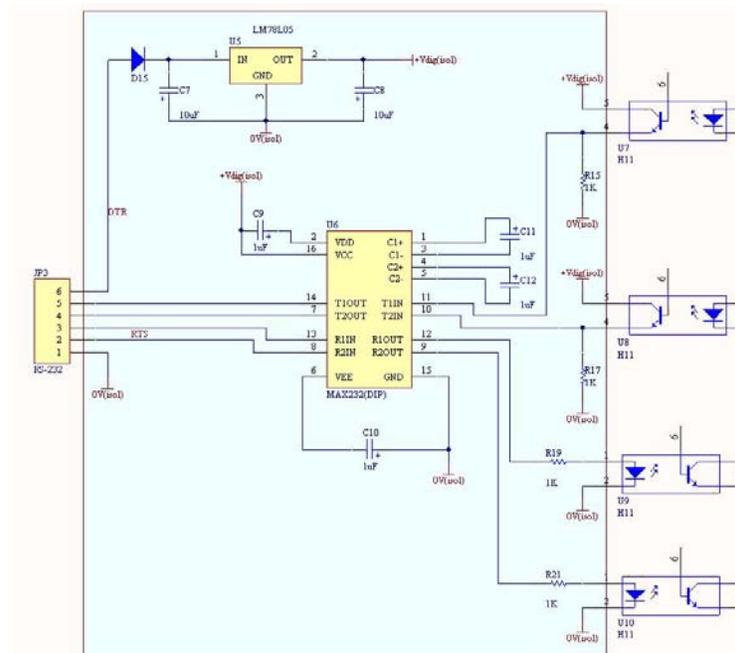
### 3.4.4 Considerações sobre a topologia escolhida

O estágio analógico para um medidor de corrente na ordem de grandeza de nanoampères pode ser implementado de acordo com as topologias apresentadas na **Figura 3.5**, mas a presença de picos de alta tensão durante a formação de arcos voltaicos, dentro da câmara de emissão de campo, acaba por restringir as possíveis topologias [17]. Isto implica na escolha do *shunt*, pois se obtém leitura de tensão significativa mantendo-se a menor impedância possível durante a formação de arcos voltaicos, o que aumenta a robustez do instrumento.

### 3.5 Interface de comunicação serial (RS-232)

A interface de comunicação serial deve ser eletricamente isolada do restante do circuito, pois ela se conecta ao computador PC para aquisição dos dados, que não suportaria uma descarga de alta tensão proveniente da fonte de alta tensão.

A implementação da comunicação serial faz uso dos sinais Tx e Rx da porta serial RS-232, sendo que o sinal DTR, advindo do PC, deve estar em nível lógico alto, pois é utilizado como alimentação elétrica para o *driver* (U6) e para os optoisoladores dos sinais Tx (U7 e U8), conforme ilustrado pela **Figura 3.9**.



**Figura 3.9** Interface de comunicação serial

Este artifício elimina a necessidade de uma fonte de alimentação auxiliar para o funcionamento da comunicação serial, economizando assim componentes e cabos.

# Capítulo IV

## Desenvolvimento de *Firmware*

O microcontrolador executa um programa (*firmware*) responsável pelo controle e temporização de todos os módulos e funcionalidades do projeto. Para uma melhor portabilidade do código, isto é, possibilidade de reuso em outros casos, optou-se por escrevê-lo em linguagem C.

### 4.1 Ambiente de desenvolvimento

Como ferramentas para o desenvolvimento e depuração, foram selecionados os seguintes programas (todos para *Windows 98*):

- Editor de texto *TextPad*, versão 4.73 - Utilizado para edição dos arquivos em C;
- Compilador C para a família PIC, *PICC* da *Hi-tech*, versão 7.83 - Responsável pela compilação e montagem dos arquivos de baixo nível para gravação;
- Programa gravador *Epic*, versão 2.45 - Efetua a gravação na memória do microcontrolador.

A depuração foi feita no próprio microcontrolador durante a execução normal do código, visto que não há simuladores para o microcontrolador e periféricos adotados nesse projeto.

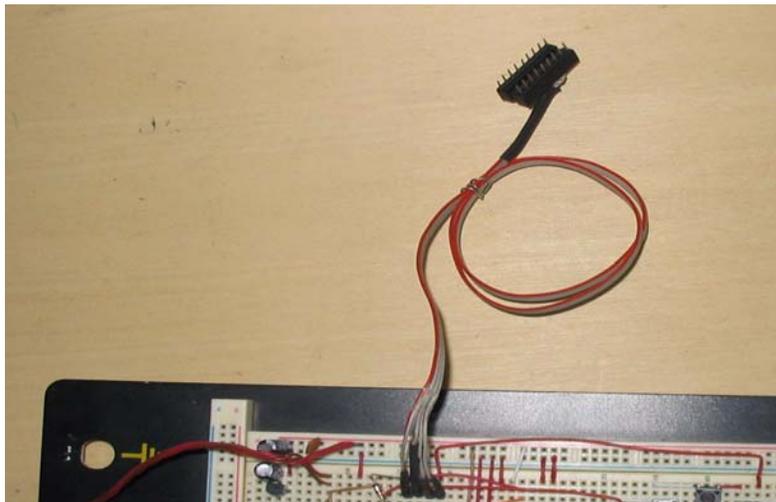
### 4.2 Gravação de memória *FLASH* (ROM)

Para que a gravação do microcontrolador pudesse ser efetuada, foi construído também um periférico dedicado, com comunicação através da porta paralela do PC. A **Figura 4.1** ilustra o aspecto final deste gravador.



**Figura 4.1 Gravador para a família PIC construído para este projeto**

Este gravador de memória serve também ao propósito de reprogramar o microcontrolador sem a necessidade de remover o chip do projeto. Para isso, foi construído um cabo adaptador para programação *in-circuit*, conforme ilustrado pela **Figura 4.2**, reduzindo significativamente o tempo de depuração.



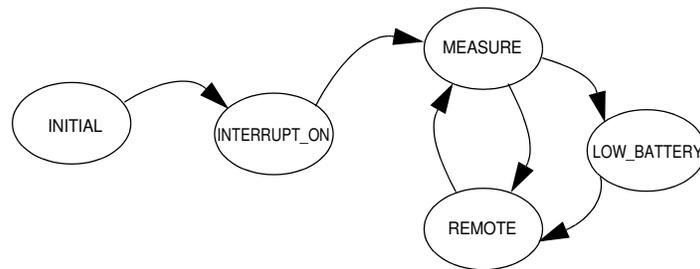
**Figura 4.2 Cabo para reprogramação *in-circuit***

### 4.3 Descrição funcional do *firmware*

A estratégia do *firmware* é baseada em uma máquina de estados finitos, onde cada estado possui sub-rotinas para disparo seqüencial de eventos, conforme apresentado a seguir.

#### 4.3.1 Máquina de estados finitos

A **Figura 4.3** ilustra a estrutura da máquina de estados finitos implementada para o controle do medidor de corrente.



**Figura 4.3** Máquina de estados finitos do medidor de corrente

O estado *INITIAL* é responsável pela inicialização dos módulos do microcontrolador (temporizador, conversor A/D, porta serial e portas de I/O). Além disso, o módulo de cristal líquido requer inicialização própria, que é feita através do envio de sinais através das portas de I/O que o conectam. Uma mensagem de texto de abertura é apresentada no LCD durante a inicialização.

Uma vez terminada a inicialização, a máquina de estados move-se automaticamente para o estado *INTERRUPT\_ON*. Nesse novo estado são habilitados sinalizadores de controle de interrupção. A mudança de estados ocorre de maneira automática novamente, entrando-se no estado *MEASURE*.

Nessa nova condição, o microcontrolador sofre interrupções do temporizador a uma taxa de 480Hz. A cada interrupção, é calculado o valor médio das últimas 64 leituras do conversor A/D e a tela de cristal líquido é atualizada com o novo valor. Caso o instrumento esteja conectado a um computador PC e seja recebido, através da interface serial, um

pedido de envio de dados, a máquina de estados muda para o estado *REMOTE*, que é essencialmente igual ao estado *MEASURE*, com a diferença de que o valor calculado também é enviado pela porta serial para processamento pelo PC. Esse estado faz com que o circuito consuma mais energia, pois ativa os optoisoladores da porta serial. Por isso é recomendado que a comunicação seja realizada somente quando necessária, para evitar a redução da vida útil das pilhas.

A qualquer momento, durante a operação, o microcontrolador pode receber um sinal de bateria fraca do sistema de alimentação. Este sinal força uma mudança estado, conduzindo-o para *LOW\_BATTERY*, onde as interrupções são suspensas e a conversão analógico/digital também. Uma mensagem de bateria fraca é então apresentada no LCD, evitando que leituras errôneas sejam tomadas pelo operador da câmara.

Os Estados *MEASURE* e *REMOTE* implementam ainda um sistema de ajuste de escala automática para 3 faixas de corrente de medição, conforme detalhado a seguir.

### **4.3.2 Ajuste automático de escala**

O valor da leitura do conversor analógico/digital é utilizado como parâmetro para o ajuste do valor do resistor de ganho da parte analógica, conforme descrito no item 3.4.3. A **Figura 4.4** apresenta detalhes do código, escrito em C, para controle de ajuste de escala.

O conversor A/D é de 10 bits, isto é, sua leitura máxima é de 1023. Determinou-se, de maneira empírica, para o caso de medições de corrente de emissão de campo, que o sistema de ajuste automático de escalas poderia ser alterado para mais ou para menos sempre que o valor obtido pelo conversor A/D fosse maior ou menor que as margens *AD\_MAX* ou *AD\_MIN*, respectivamente. Essas constantes foram determinadas ao longo da utilização do instrumento com conseqüente atualização do *firmware*.

```

leitura próxima ao fundo de escala → if ( (adres_mean > AD_MAX) || (adres_mean < AD_MIN) ) // sempre operar
// com o
// valor medio de ADRES
{
  if (SCALE_CNT_1uA)
  {
    SCALE_CNT_1uA = 0;
    SCALE_CNT_10uA = 1;
    SCALE_CNT_100uA = 0;
  }
  else if (SCALE_CNT_10uA)
  {
    SCALE_CNT_1uA = 0;
    SCALE_CNT_10uA = 0;
    SCALE_CNT_100uA = 1;
  }
  else if (SCALE_CNT_100uA)
  {
    SCALE_CNT_1uA = 0;
    SCALE_CNT_10uA = 0;
    SCALE_CNT_100uA = 1;
    scale_over = 1;
  }
};

ajuste de escala {
leitura próxima ao zero de escala → else if ( (adres < (AD_OFFSET+AD_MIN)) &&
(adres > (AD_OFFSET-AD_MIN)) )
{
  if (SCALE_CNT_10uA)
  {
    SCALE_CNT_1uA = 1;
    SCALE_CNT_10uA = 0;
    SCALE_CNT_100uA = 0;
  }
  else if (SCALE_CNT_100uA)
  {
    SCALE_CNT_1uA = 0;
    SCALE_CNT_10uA = 1;
    SCALE_CNT_100uA = 0;
  }
};
}
else if (SCALE_CNT_100uA) // operacao dentro da faixa
{
  scale_over = 0;
};

```

**Figura 4.4 Ajuste de escala**

### 4.3.3 Inicialização do módulo de cristal líquido (LCD)

Conforme mencionado anteriormente, o módulo de cristal líquido requer inicialização específica, incluindo-se tempo para *reset* interno, largura de barramento (4 ou 8 bits) e resolução dos caracteres (nesse caso, 5x7 pixels). A **Figura 4.5** apresenta a rotina de inicialização implementada para o LCD.

```

void
lcd_init(void)
{
    LCD_RS = 0;
    DelayMs(250);
    DelayMs(250);
    DelayMs(250);
    LCD_BUS = 0x38;
    LCD_STROBE;
    DelayMs(30);
    DelayMs(30);
    DelayMs(30);
    LCD_STROBE;
    DelayMs(30);
    DelayMs(30);
    DelayMs(30);
    LCD_STROBE;
    DelayMs(30);
    DelayMs(30);
    DelayMs(30);
    LCD_BUS = 0x0C;
    LCD_STROBE;
    DelayUs(50);
    DelayUs(50);
    DelayUs(50);
    LCD_BUS = 0x01;
    LCD_STROBE;
    DelayMs(50);
    DelayMs(50);
    DelayMs(50);
    LCD_BUS = 0x06;
    LCD_STROBE;
    DelayMs(50);
    DelayMs(50);
    DelayMs(50);
    LCD_RS = 1;
};

```

*// inicializacao no modo de 8 bits*  
*// RS = 0 para se escrever comandos*  
*// atraso necessario para o HD44780*  
*// atraso necessario para o HD44780*  
*// atraso necessario para o HD44780*  
*// 0x28 = 5x7 ou entao 0x34 =*  
*5x9pixels*

*// 0x0F = cursor ligado e piscando*

*// RS = 1 para se escrever caracteres*

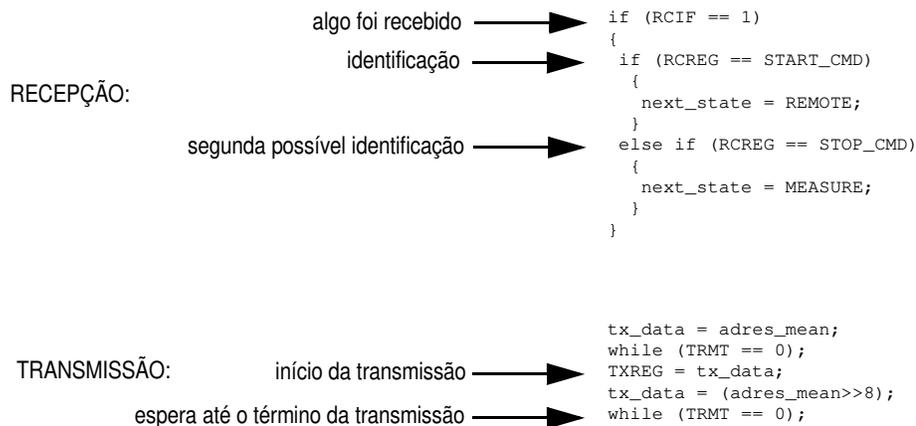
**resolução do LCD** → **5x9pixels**

**estado do cursor** →

**Figura 4.5 Inicialização do módulo de cristal líquido**

### 4.3.4 Interface serial padrão RS-232

Por se tratar de um módulo fisicamente implementado no chip do microcontrolador, a comunicação serial torna-se simples do ponto de vista de programação, bastando apenas o controle de leitura e escrita nos registros de recepção e transmissão e seus respectivos bits de sinalização. A **Figura 4.5** apresenta exemplos de envio e recepção de dados.



**Figura 4.6 Operação de recepção e envio serial para o PC**

### 4.3.5 Rotina de serviço de interrupção (*ISR*)

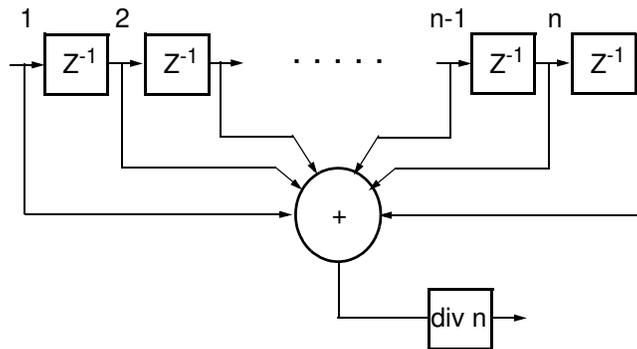
Na maior parte do tempo, o código opera por interrupção, sendo que somente os dois primeiros estados operam por *polling*. Isso é necessário devido à restrição de tempo para o correto funcionamento do conversor A/D, isto é, todas as operações (cálculo, atualização do LCD e comunicação serial) são executadas no intervalo entre uma amostra e outra do conversor A/D.

Durante a interrupção, o temporizador (TIMER\_1) é atualizado, o conversor A/D é lido, a média das últimas amostras é então calculada e enviada para o PC. Também é tomada a decisão do ajuste de escala para a próxima leitura.

Fora da rotina de interrupção ocorre a atualização do LCD, o que consome pouco tempo.

### 4.3.6 Estratégia do A/D

A parte analógica está sujeita a interferências elétricas de diversas fontes. Para minimizar seus efeitos, implementou-se um filtro de valor médio para eliminar picos [19]. Trata-se do cálculo da média entre as últimas 64 leituras, conforme ilustrado pela **Figura 4.7**.



**Figura 4.7 Filtro digital implementado em *firmware***

Sua implementação consiste de um somatório, em uma variável de 32 bits, de 64 amostras do conversor A/D (cada uma contendo 10 bits) em seguida o valor é dividido por 64, retornando um valor de 10 bits novamente, que é então apresentado na tela de cristal líquido e também enviado pela porta serial para o PC.

Utilizando-se uma variável temporária de 32 bits garante-se que o somatório nunca excederá este tamanho, pois o maior valor possível é  $64 \times 3FF_{\text{hex}} = FFC0_{\text{hex}}$ , que é menor que  $FFFFFF_{\text{hex}}$  (32 bits).

Dessa maneira, os ruídos elétricos de maior potência são eliminados pelo filtro digital, resultando em um sinal mais próximo do valor real esperado para a medida, além de possibilitar a implementação futura de outros filtros digitais dentro do *software*.

# Capítulo V

## Desenvolvimento de *software* para o PC

O instrumento desenvolvido opera de maneira autônoma, mas também pode ser conectado a um computador, pois foi desenvolvido um *software* para PC. Dessa maneira, é possível visualizar a curva de corrente ao longo do tempo.

A linguagem utilizada foi a C++ e o ambiente de desenvolvimento foi o Borland C++ builder 3.0.

### 5.1 Osciloscópio

O *software* desenvolvido apresenta graficamente o comportamento da corrente ao longo do tempo, como um osciloscópio adaptado para medição de corrente elétrica ao invés de tensão, conforme ilustrado pela **Figura 5.1**.



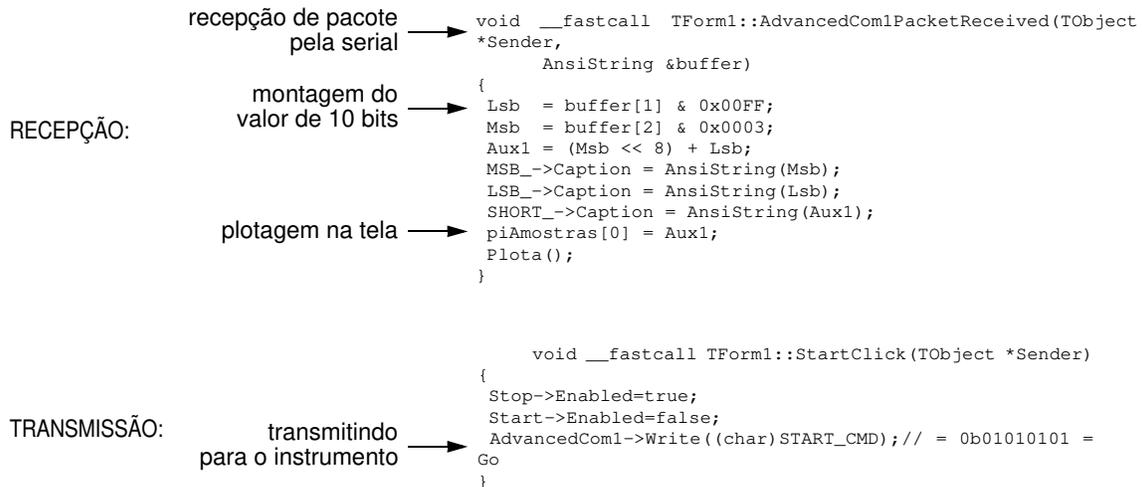
**Figura 5.1** Osciloscópio digital implementado para *Windows*

## 5.2 Gravador de "logs"

Esse *software* gera um arquivo do tipo texto (*log*) contendo os resultados de todas as amostras enviadas pelo *hardware*, de modo a possibilitar uso futuro em programas como o *Excel(R)*, *Matlab(R)* e outros.

## 5.3 Estrutura do *software*

Foram utilizados componentes do tipo VCL, disponíveis comercialmente, para plotagem, para temporizador, recepção e transmissão serial (RS-232), restando ao programador a responsabilidade de controlá-los de acordo com o protocolo de comunicação atribuído ao medidor de corrente. A **Figura 5.2** apresenta o fragmento de código responsável pela aquisição dos dados no PC, de modo a ilustrar uma das rotinas de recepção e outra de envio de dados.



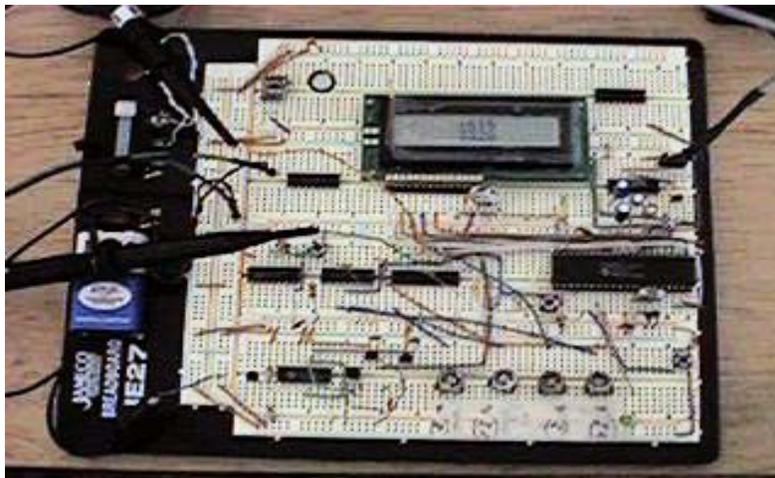
**Figura 5.2** Operação de recepção e envio para o PC

A listagem detalhada do *software* está disponível no Apêndice A.

# Capítulo VI

## Construção do medidor de corrente

Durante o desenvolvimento deste instrumento, foram construídas, em placa experimental tipo *proto-board*, todas as partes do circuito à exceção do circuito de alta tensão, que somente foi testado depois de produzida a placa de circuito impresso definitiva. A **Figura 6.1** apresenta a montagem experimental para testes de conceitos e topologias.



**Figura 6.1** Montagem em proto-board para aferição de conceitos

### **6.1 Ambiente de desenvolvimento de *hardware***

Uma vez definida a topologia e detalhes elétricos do circuito, procedeu-se à confecção de biblioteca de componentes para o programa *Protel DXP*, uma poderosa ferramenta para desenvolvimento de placas de circuito impresso e desenho de diagramas elétricos.

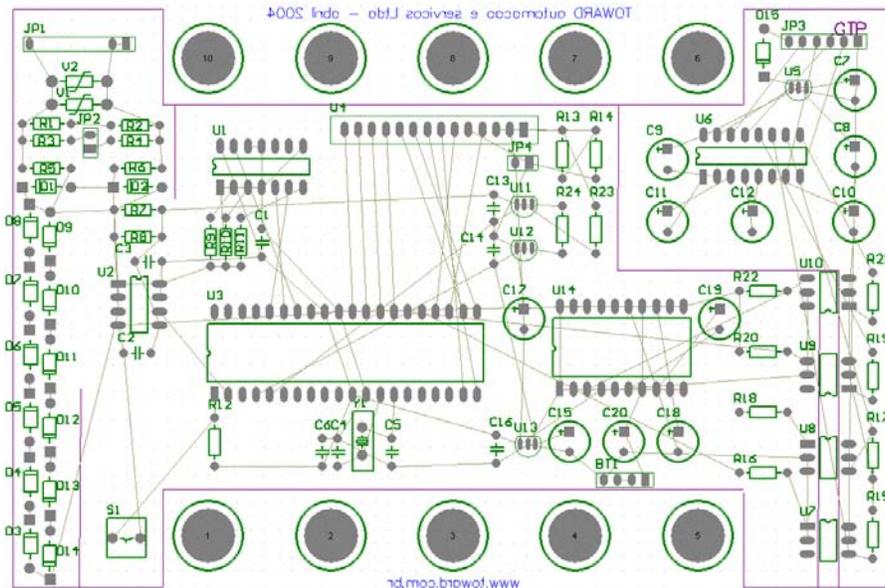
A necessidade de desenvolvimento de biblioteca surgiu da constatação de que as dimensões das bibliotecas-padrão de componentes desse programa são otimizadas para montagem por processo industrial com máquinas automáticas de *pick-and-place* e fornos de soldagem. Para uma montagem manual, foi necessário redesenhar parte da biblioteca de componentes com dimensões maiores para as ilhas de solda.



Foi desenhado o diagrama elétrico, conforme ilustra a **Figura 6.2**. Esse diagrama está integrado ao *layout* dos componentes e também ao *layout* da placa de circuito impresso, de modo que cada um dos componentes presentes teve que ser modelado individualmente. Essa exigência surge do *Protel DXP*, que trata o desenho de circuitos elétricos de maneira integrada em todas as esferas (diagrama elétrico, simulação, disposição de componentes, roteamento e arquivos para fabricação da placa de circuito impresso).

### 6.3 Confeção da placa de circuito impresso (PCI)

A partir do diagrama do circuito, extrai-se o *rat's nest*, conforme a **Figura 6.3**.

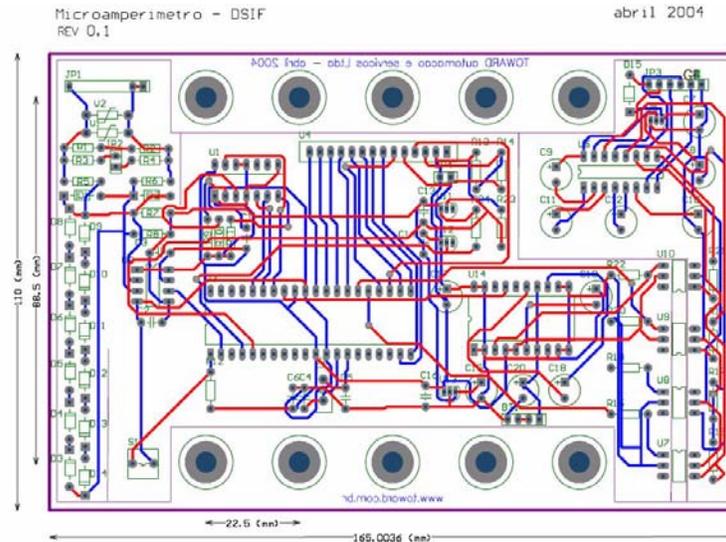


**Figura 6.3** Posicionamento dos componentes pré-roteados

Nesse ponto, define-se as regras para roteamento (*design rules*) [20], a saber:

- Espessuras máximas e mínima de trilha
- Tipos de *pads* para interconexão entre camadas
- Estratégia de roteamento
- Áreas de distanciamento (importantes para as partes sujeitas à isolamento de alta tensão)

Após o roteamento, obteve-se o *layout* final da placa de circuito impresso, conforme a **Figura 6.4**.



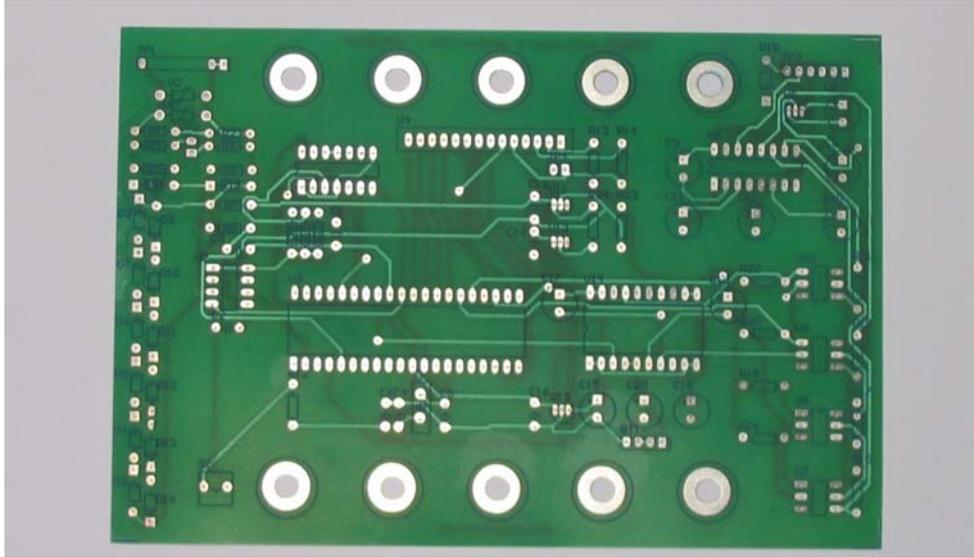
**Figura 6.4** *Layout* final da placa de circuito impresso

## 6.4 Arquivos para fabricação

Em seguida, foram gerados os arquivos tipo CAM (*Computer Aid Machine*) para fabricação industrial, que são basicamente descrições textuais e espaciais (formato *gerber*) para controle de máquinas de manufatura de circuito impresso. Esses arquivos foram enviados a um fabricante de placas.

## 6.5 A Placa de Circuito Impresso após a fabricação

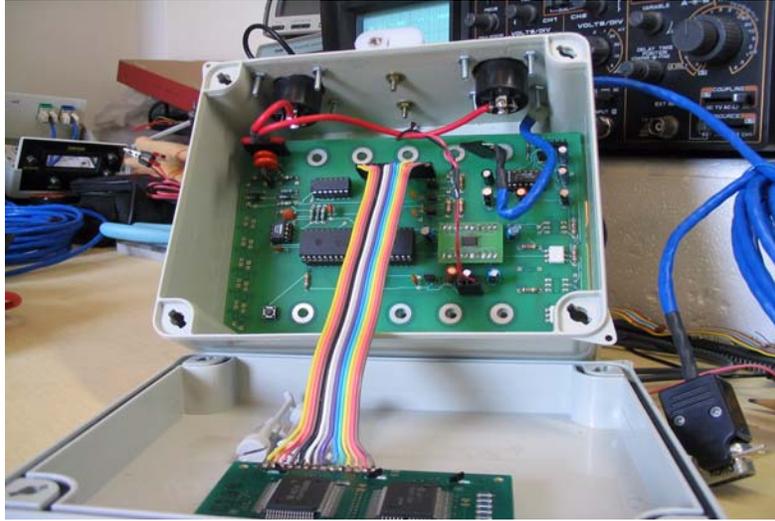
A placa de circuito impresso foi entregue depois de um mês, nos moldes exatos para a montagem e finalização do circuito, conforme ilustrado na **Figura 6.5**.



**Figura 6.5** Placa de circuito impresso pronta

## **6.6 Montagem dos componentes e gabinete**

Procedeu-se à soldagem dos componentes, furação do gabinete, confecção dos painéis e instalação dos conectores, permitindo um encaixe mecânico preciso e sem danos. A alimentação do circuito foi posicionada de maneira a ficar o mais protegida possível, evitando assim risco de choque acidental durante a operação conjunta com a fonte de alimentação de alta tensão. As pilhas se localizam entre os conectores de entrada e saída. A **Figura 6.6** apresenta o aspecto final do gabinete aberto, e a **Figura 6.7** apresenta o gabinete fechado, já com nota de advertência de segurança quanto a riscos de choques.



**Figura 6.6** Aspecto final (gabinete aberto)



**Figura 6.7** Aspecto final (gabinete fechado)

Depois de fechado o gabinete, não restam partes metálicas expostas, minimizando o risco de choque elétrico.

## 6.7 Utilização, durabilidade e atualização

Esse instrumento foi projetado e construído tendo-se em mente sua utilização contínua no LabSIF, servindo a diversas pesquisas e também à integração com sistemas futuros. De fato, a interface com o PC hoje é um acessório quase dispensável, uma vez que a movimentação mecânica da amostra e o controle automático da fonte de tensão não estão disponíveis ainda, o que ainda impede a confecção automática de gráficos e tabelas. É importante notar que agora as medidas de corrente de emissão de campo são obtidas diretamente e de maneira mais confiável. Além disso, o instrumento é de fácil manutenção e seu *firmware* pode ser atualizado a qualquer momento, devido à utilização de memória *FLASH*, inserindo-se ou removendo-se funcionalidades de acordo com a experiência adquirida ao longo de sua utilização.

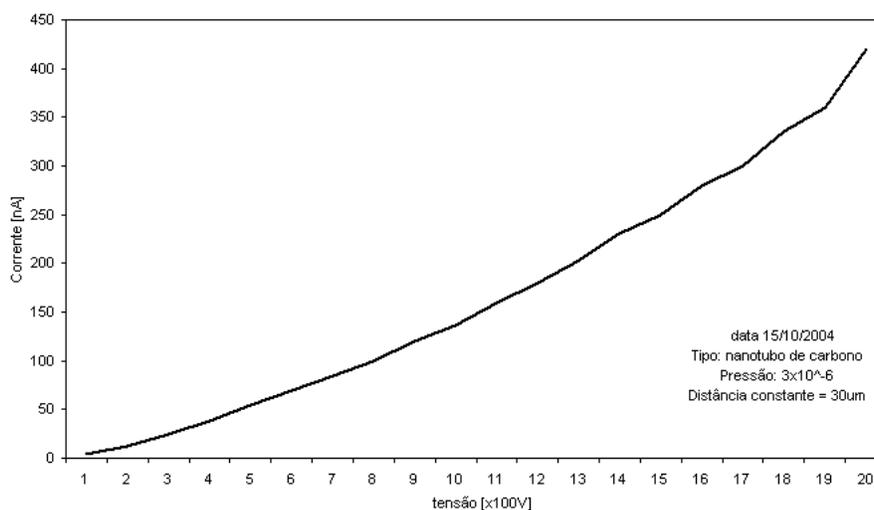
# Capítulo VII

## Ensaio na câmara de emissão de campo

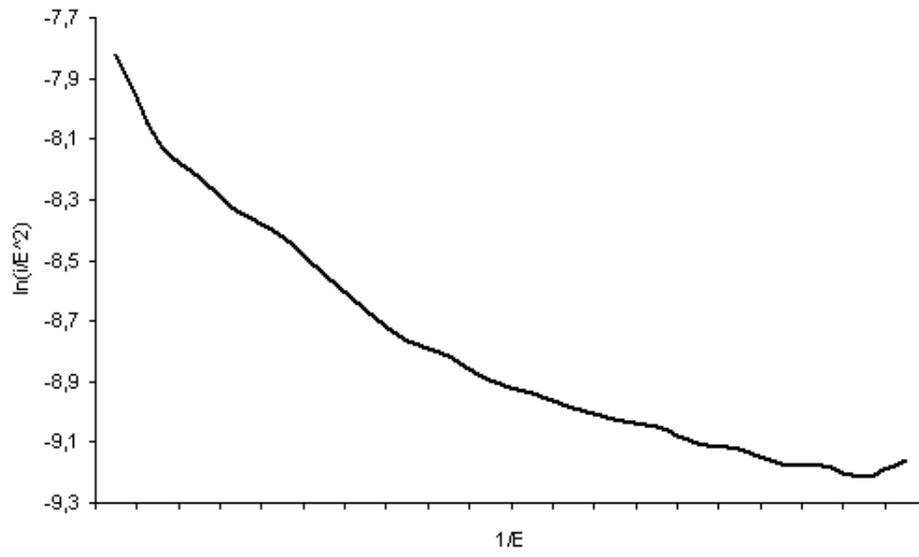
Uma vez concluída a construção e aferição do medidor de corrente, procedeu-se aos ensaios práticos na câmara de emissão de campo na qual o equipamento foi instalado.

### 7.1 Aferição de amostras de nanotubos de carbono

A cada ensaio, a câmara foi equipada com uma amostra, em seguida foi lacrada e então iniciou-se o processo de vácuo e refrigeração. Uma vez atingida a pressão de teste (por volta de  $10^{-6}$  torr), a distância entre eletrodo e amostra e a tensão de excitação foram variadas, mantendo-se a corrente de emissão aproximadamente constante. Também foram realizados ensaios em que a distância foi mantida fixa e somente a tensão variada, tomando-se nota do comportamento da corrente de emissão. Como exemplo, o resultado do ensaio com a amostra A1 é ilustrado pelas **Figura 7.1** e **Figura 7.2**.



**Figura 7.1** Resultado obtido em ensaio com a amostra A1



**Figura 7.2 Gráfico de Fowler-Nordheim para a amostra A1**

# Capítulo VIII

## Considerações Finais

Esse instrumento possibilita que os ensaios de emissão de campo nas instalações do LabSIF possam ser realizados com maior precisão e velocidade, sem abrir mão da segurança, além de dispensar qualquer calibração prévia, uma vez que os componentes responsáveis pelas referências internas são do tipo *System-On-a-Chip (SoC)*, isto é, possuem em seu encapsulamento todos os dispositivos para garantir uma calibração precisa ao longo do tempo, corrigindo-se também variações devido à temperatura.

A disponibilidade de tal instrumento na bancada de ensaios para aferição de corrente de emissão de campo reduziu significativamente o tempo de aquisição de dados, uma vez que não são necessários mais ajustes a cada ensaio nem cálculos a cada ponto obtido.

A produção de arquivos de *log* automáticos abre caminho para um universo de automação similar ao existente em processos industriais, e elevará ainda mais a confiabilidade dos ensaios e afirmações realizadas nesse laboratório.

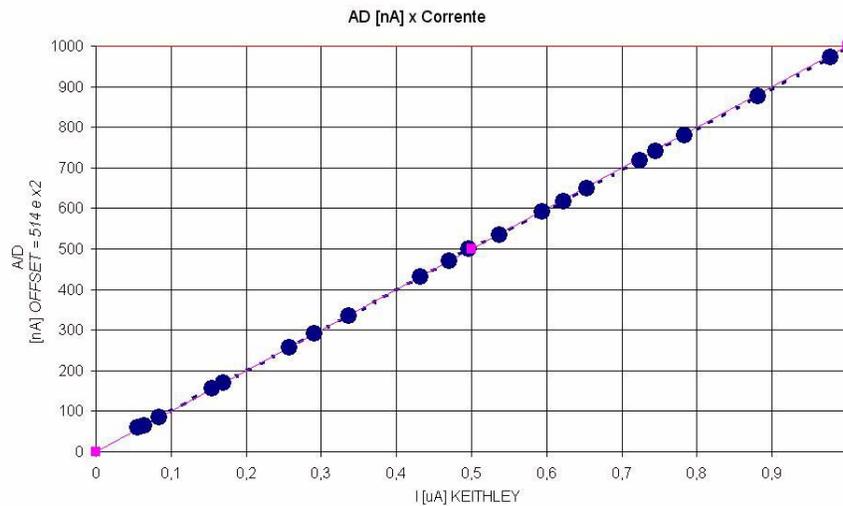
Também, a repetibilidade do processo de aferição já começa a se tornar factível, e atingirá sua plenitude quando houver interação entre os sistemas de geração de alta tensão, medição, aquisição de dados e posicionamento mecânico da amostra, além de supervisão de parâmetros auxiliares, como a pressão interna da câmara.

A **Figura 8.1** ilustra o medidor de corrente conectado ao restante da bancada de testes. Essa é a estrutura atualmente disponível para ensaios de emissão de campo em amostras de nanotubos.



**Figura 8.1** Instalação final do medidor de corrente à bancada

A título de aferição, foi elaborado um gráfico de comparação entre o instrumento aqui desenvolvido e o amperímetro Keithley 485, observando-se boa linearidade de ponta a ponta da escala, conforme ilustra a **Figura 8.2**.



**Figura 8.2** Linearidade do medidor de corrente desenvolvido

## 8.1 Sugestões para continuidade do trabalho

Este trabalho é parte do esforço de desenvolvimento de instrumentação dedicada para o Laboratório de Semicondutores, Instrumentação e Fotônica - LabSIF, que, dessa maneira, amplia sua gama de especialistas e capacidade técnica.

Como continuidade para este projeto, sugere-se o desenvolvimento e construção do controlador para a fonte de alta tensão, de maneira integrada ao medidor de corrente aqui desenvolvido. Isso possibilitará a confecção totalmente automática de gráficos de corrente *versus* tensão, com centenas ou milhares de pontos em uma única varredura, além de uma dramática diminuição no tempo de aquisição destas curvas. Sugere-se para tal, a aquisição de uma nova fonte de alta tensão com capacidade para controle externo, como a MJ5P3000, da *Glassman High Voltage Inc.*, capaz de fornecer tensões DC entre zero e 5.000 Volts. Tal equipamento é de simples aquisição e baixo custo, conforme apurado ao longo deste trabalho.

Uma fase seguinte incluirá a implementação de um controle automático para o posicionador dentro da câmara, através de 5 motores de passo, controlando-se os eixos  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\theta$  e  $\varphi$ . Sugere-se também a inclusão de um sensor de imagem dentro da câmara, para inspeção visual do estado da amostra e ponta de prova, pois na ocorrência de arcos voltaicos a amostra pode ser destruída pontualmente. Tais conceitos são preliminares e sujeitos a alterações ao longo de novas discussões, ficando aqui registrado um esboço do que poderá ser implementado futuramente.

## Referências Bibliográficas

- [1] Y. Cheng, O. Zhou, C. R. Physique 4 (2003) 1021–1033
- [2] P. W. May, S. Hohn, and M. N. R. Ashfold, N. Wang, N. A. Fox, T. J. Davis, and J. W. Steeds, *Journal of Applied Physics*, vol 84, no. 3, aug, 01, 1998
- [3] J. M. Bonard, J. P. Salvetat, T. Stöckli, L. Forró, A. Châtelain, D'épartement de Physique, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Switzerland (1999), *Field emission from carbon nanotubes: perspectives for applications*.
- [4] W. I. Milne, K. B. K. Teo, G. A. J. Amaratunga, P. Legagneux, L. Gangloff, J.-P. Schnell, V. Semet, V. Thien, *Journal of Materials Chemistry* b314155c, *Carbon nanotubes as field emission sources*
- [5] Z. Yue, Q. Qiu, B. Gao, Y. Cheng, J. Zhang, H. Shimoda, S. Chang, J.P. Lu and O. Zhou, *Appl. Phys. Lett.* (in press), *Generation of continuous and pulsed diagnostic imaging x-ray radiation using a carbon-nanotube-based field-emission cathode*
- [6] M. Fontana, Síntese e Caracterização de Filmes Porosos de Carbono, Sílicio e Óxido de Estanho, tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Unicamp, 2004.
- [7] H. J. Ceragioli, Influência de gases nobres no crescimento de diamante e de nanoestruturas de carbono pelo método de deposição química a partir da fase vapor (CVD), tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Unicamp, 2001.
- [8] Gottlieb, M. Irving, *Regulated Power Supplies*, 4ed, Mc Graw Hill, 1992.
- [9] A. I. Pressman, *Switching Power Supply Design*, 2ed, Mc Graw Hill, 1998.
- [10] Texas Instruments, TPS60140, TPS60141, *Low power DC/DC converter*, doc. no. SLVS273, Feb. 2000
- [11] P. D. Hennesy, *Organização e Projeto de Computadores: A Interface hardware/Software*. Livros Técnicos e Científicos – LTC – 1992.
- [12] B. W. Kernighan and D. M. Ritchie. *The C Programming Language, Second Edition*. Prentice Hall, Inc., 1988.
- [13] L.W. Couch II, *Modern Communication Systems Principles and Applications*, , Prentice-Hall, 1995.
- [14] Microchip Technology Inc, *Embedded Control Handbook*, 1994.
- [15] J. Campbell, *C Programmer's Guide to Serial Communication*. Sams Publishing, 1994.
- [16] Hantronix Inc, *Crystal Clear and Visibility Superior LCD Modules*.
- [17] Keithley, *Application Note Series, No. 100, Low Current Measurements*

- [18] Burr-Brown, *INA 118 Precision, Low Power Instrumentation Amplifier*
- [19] A. Oppenheim and R. Schaffer, *Discrete-time signal processing*. Prentice Hall, 1989.
- [20] Altium Inc. *Protel Training Manual. Protel 2004 Training Manual*

# Apêndice A

## Detalhamento do *software*

Segue abaixo a transcrição do arquivo fonte do *software* feito no Borland C++ versão 5.0, para visualização da forma de onda da corrente na tela do PC.

```
//-----  
  
#include <vcl.h>  
#pragma hdrstop  
  
#include "Unit1.h"  
//-----  
  
#pragma package(smart_init)  
#pragma link "AdvancedCom"  
#pragma link "ComThread"  
#pragma link "LMDBaseControl"  
#pragma link "LMDBaseGraphicControl"  
#pragma link "LMDBaseMeter"  
#pragma link "LMDControl"  
#pragma link "LMDCustomProgressFill"  
#pragma link "LMDGraphicControl"  
#pragma link "LMDProgressFill"  
#pragma resource "*.dfm"  
  
extern "C"{  
    int __fastcall Enu(void);  
    int __fastcall Liga(void);  
    void __fastcall Wr(int);  
    void __fastcall Rd(char[26]);  
}  
#define START_CMD      1  
#define STOP_CMD       2  
  
TForm1 *Form1;  
//-----  
  
__fastcall TForm1::TForm1(TComponent* Owner)  
    : TForm(Owner)  
{  
    //Cria Canais  
    pCanal0 = new TCanalECG(AnsiString("Curva"), 0, Panel1, PaintBox1->Height-1,  
clWhite);  
    //AJUSTA BARRA APAGADORA  
    pCanal0->AtivaBarraApagadora(20);  
    iSensibilidade = 100;  
}  
//-----  
  
void __fastcall TForm1::FormDestroy(TObject *Sender)  
{
```

```

    Stop->Enabled=false;
    AdvancedCom1->Write((char)STOP_CMD);// = 0b10101010 = Stop
    AdvancedCom1->Dtr = 0;
    AdvancedCom1->Rts = 0;
    AdvancedCom1->ComClose();
    delete pCanal0;
}
//-----
//////////////////////////////////// PLOTAGEM
////////////////////////////////////void
TForm1::Plota(void)

{
    pCanal0->Traca(piAmostras);
}
//-----

void __fastcall TForm1::AdvancedCom1PacketReceived(TObject *Sender,
    AnsiString &buffer)
{
    Lsb = buffer[1] & 0x00FF;
    Msb = buffer[2] & 0x0003;
    Aux1 = (Msb << 8) + Lsb;
    MSB_->Caption = AnsiString(Msb);
    LSB_->Caption = AnsiString(Lsb);
    SHORT_->Caption = AnsiString(Aux1);
    piAmostras[0] = Aux1;
    Plota();
}
//-----

void __fastcall TForm1::StartClick(TObject *Sender)
{
    Stop->Enabled=true;
    Start->Enabled=false;
    AdvancedCom1->Write((char)START_CMD);// = 0b01010101 = Go
}
//-----void __fastcall
TForm1::StopClick(TObject *Sender)
{
    Stop->Enabled=false;
    Start->Enabled=true;
    AdvancedCom1->Write((char)STOP_CMD);// = 0b10101010 = Stop
}
//-----

void __fastcall TForm1::IniciaClick(TObject *Sender)
{
    Labell->Color=c1Green;
    AdvancedCom1->Port=2;
    AdvancedCom1->Baud=9600;
    AdvancedCom1->BufSize=72;
    AdvancedCom1->Timeout=2;
    AdvancedCom1->PacketSize=2;
    AdvancedCom1->ComInit();
    if (AdvancedCom1->ok)
    {
        Labell->Caption="RS-232, DTR = RTS = 1";
    }
}

```

```
AdvancedCom1->Dtr = 1;
AdvancedCom1->Rts = 1;
}
else
{
Application->MessageBox("Erro na abertura", "Atenção", MB_OK);
};
}
//-----
```

# Apêndice B

## Terminologia

<i>aliasing</i>	sobreposição espectral devido a sub amostragem
<i>charge pump</i>	bomba de carga ou "dobrador de tensão"
compilador	programa capaz de converter uma linguagem de programação em outra, geralmente de mais baixo nível
<i>firmware</i>	programa que é executado pelo microcontrolador. É armazenado em memória não-volátil
gravador de memória	dispositivo capaz de programar a memória do microcontrolador com o arquivo hexadecimal gerado pelo compilador
<i>hardware</i>	circuito elétrico e seus componentes mecânicos
<i>keep out</i>	áreas de distanciamento mínimas para o layout de placas de circuito impresso
<i>layout</i>	desenho do circuito elétrico
<i>log</i>	arquivo gerado, no formato texto, que contém o registro de toda a atividade do equipamento
memória <i>FLASH</i>	memória não-volátil reprogramável eletricamente
<i>pick-and-place</i>	posicionadores automáticos de componentes
programação <i>in-circuit</i>	modo de programação sem a remoção do chip da placa
<i>rat's nest</i>	layout pré-conectado, obedecendo as dimensões mecânicas da placa de circuito impresso
<i>shunt</i>	resistor de precisão utilizado para medição de corrente elétrica (conectado em série com a carga)
<i>sleep mode</i>	modo de funcionamento em baixo consumo do microcontrolador
<i>software</i>	programa que é executado em um microcomputador. É armazenado em memória volátil ou em discos.

# Apêndice C

## Abreviações

A/D	<i>Analog/Digital converter</i> (conversor analógico/digital)
CMRR	<i>Common Mode Rejection Ratio</i> (Taxa de rejeição média)
CRT	<i>Cathodic Ray Tube</i> (Tubo de raios catódicos)
DC/DC	Conversor de corrente contínua para corrente contínua
ESR	<i>Equivalent Series Resistance</i> ( <i>resistência série equivalente</i> )
FEM	<i>Field Emission Microscope</i> (Microscópio por emissão de campo)
ISR	<i>Interrupt Service Routine</i> (rotina de interrupção usada no firmware)
LabSIF	Laboratório de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> (módulo alfanumérico de cristal líquido)
LED	<i>Light Emitter Diode</i> (Diodo emissor de luz)
nA	nano Amper [ $10^{-9}$ A]
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (modulação de largura de pulso)
RISC	<i>Reduced Instruction Computer</i> (Computador com reduzido conjunto de instruções)
Unicamp	Universidade Estadual de Campinas
USART	<i>Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter</i> (transmissor/receptor universal síncrono ou assíncrono)
VCL	<i>Virtual Component Library</i> (biblioteca virtual de componentes para Borland C++ Builder)