



**AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO**

**AUTOMATIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE MEDIDAS DE
CORRENTES PRODUZIDAS POR CÂMARAS DE IONIZAÇÃO
E APLICAÇÃO NA CALIBRAÇÃO DO ^{18}F E ^{153}Sm**

FRANCO BRANCACCIO

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Aplicações**

Orientador:

Dr. Mauro da Silva Dias

**São Paulo
2002**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**AUTOMATIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE MEDIDAS DE
CORRENTES PRODUZIDAS POR CÂMARAS DE IONIZAÇÃO
E APLICAÇÃO NA CALIBRAÇÃO DO ^{18}F E ^{153}Sm**

FRANCO BRANCACCIO

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Aplicações.**

**Orientador:
Dr. Mauro da Silva Dias**

**SÃO PAULO
2002**

À minha esposa, Rosangela

Ao meu filho, Rafael

Ao meu pai, Michele (em memória)

AGRADECIMENTOS

É mais fácil atingir um objetivo, quando trabalhamos, fraternalmente, em conjunto.

*Agradeço a **DEUS** que nos criou e nos uniu.*

Expresso meu sincero reconhecimento a todos que contribuíram com a elaboração deste trabalho, incluindo aqueles que, porventura, não estejam aqui relacionados.

Dr. Mauro da Silva Dias, pela inestimável orientação. Sem o incentivo deste admirável profissional e amigo, este trabalho não teria sido iniciado.

Dra. Marina Fallone Koskinas, pelo apoio e pelo fornecimento de soluções calibradas.

Sr. Maurício Marques, pela amizade e pela preparação das amostras.

Dr. Eduardo Winston Pontes, pelas sugestões de ordem técnica que contribuíram para o aperfeiçoamento do projeto eletrônico.

Dr. Tufic Madi Filho, pelo incentivo e pelas sugestões.

Dr. José Mestnik Filho, coordenador da área de Física Nuclear, pelo apoio.

Aos **Srs. Ricardo Takashi Tanaka** e **Lauro Tadao Muramoto**, da **LYNX Tecnologia Eletrônica Ltda.**, pelo suporte técnico, referente à utilização da **CAD12/32**.

Ao **Sr. William Yu**, pela produção do compilador gratuito **Rapid-Q** e pelo suporte prestado.

Aos amigos do IPA, **Carlos Alberto Garcia Filho** e **João Pereira**, pela manutenção corretiva efetuada no microcomputador.

Aos amigos **Algeny Vieira Leite**, **Cláudio Domienikan**, **Hélio Takumi Massaki** e **José Patrício Náhuel Cárdenas**, pelo valoroso auxílio.

A todos os amigos do **Laboratório de Metrologia Nuclear** e demais amigos do **Centro do Reator de Pesquisas**, companheiros de jornada.

A todos da Biblioteca e da Comissão de Pós Graduação do **IPEN**, sempre prontos a prestar indispensável auxílio.

À minha esposa **Rosângela** e ao meu filho **Rafael**, pelo incentivo incondicional.

Ao **Dr. Cláudio Rodrigues**, superintendente do **IPEN**, pela oportunidade de realização deste trabalho.

AUTOMATIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE MEDIDAS DE CORRENTES PRODUZIDAS POR CÂMARAS DE IONIZAÇÃO

Franco Brancaccio

RESUMO

Câmaras de Ionização operando em modo de corrente são usualmente empregadas em Metrologia Nuclear. Medidas de atividade são realizadas com rapidez em câmaras de ionização, com boa precisão. Para este propósito, são exigidas medidas de correntes de ionização muito baixas, realizadas com instrumentação de alta sensibilidade. Normalmente, eletrômetros efetuam a integração da corrente, sob comando de sinais provenientes de um sistema de automatização, de forma a reduzir as incertezas das medidas. Entre os sistemas de medida do Laboratório de Metrologia Nuclear (LMN) do IPEN, há dois que utilizam câmara de ionização. No presente trabalho, é descrito um sistema desenvolvido para a automatização das medidas de integração de corrente. Este sistema é composto por programas (interface gráfica e controle) e por um módulo eletrônico conectado a um microcomputador, através de uma placa de aquisição de dados comercial. Algumas medidas de ensaios foram realizadas para determinar a incerteza intrínseca, a linearidade e a estabilidade do sistema. Utilizando soluções radioativas calibradas, foram obtidos os fatores de calibração da câmara IG12/A20, para o ^{18}F e o ^{153}Sm , possibilitando a determinação da atividade desses radionuclídeos.

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR MEASURING CURRENTS PRODUCED BY IONIZATION CHAMBERS

Franco Brancaccio

ABSTRACT

Ionization Chambers in current mode operation are usually used in Nuclear Metrology. Activity measurements are quickly performed by Ionization Chambers, with very good precision. For this purpose measurements of very low ionization currents, carried out by high quality instrumentation, are required. Usually, electrometers perform the current integration method under command of signals from an automation system, in order to reduce the measurement uncertainties. Among the measurement systems at the Laboratório de Metrologia Nuclear (LMN) of IPEN, there are two ionization chamber systems. In the present work, an automation system developed for current integration measurements is described. This automation system is composed by software (graphic interface and control) and an electronic module connected to a microcomputer, by means of a commercial data acquisition card. Several test measurements were performed in order to determine the intrinsic uncertainty, linearity and stability of the system. Using calibrated radioactive solutions, the IG12/A20 chamber calibration factors for ^{18}F and ^{153}Sm were obtained, making possible to determine activities of these radionuclides.

SUMÁRIO

Página

1	INTRODUÇÃO	01
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	03
2.1	Desintegração Radioativa	03
2.2	Câmaras de Ionização	06
2.2.1	Princípio de Operação	07
2.2.2	Operação em Modo Pulso	08
2.2.3	Operação em Modo Corrente	09
2.2.4	Corrente de Saturação	10
2.3	Medida de Correntes de Câmaras de Ionização	12
2.3.1	Método de Medida de Townsend	13
2.3.2	Método de Medida de Taxa-de-Deriva	15
2.3.3	Aspectos Estatísticos	18
2.4	Determinação da Atividade	20
2.5	Sistemas de Medida	22
2.5.1	Sistema de SIMOEN & OSTROWSKY	23
2.5.2	Sistema de RYTZ	24
2.5.3	Sistema de DIAS	25
3	PARTE EXPERIMENTAL	27
3.1	Arranjo de Medida	28
3.1.1	Amostras Radioativas.....	28
3.1.2	Câmara de Ionização	32
3.1.3	Eletrômetro	34
3.2	Placa de Aquisição de Dados CAD12/32	35
3.3	Recursos Computacionais	37

	Página
3.4 Sistema ActMASTER	38
3.4.1 Circuito Eletrônico ActMASTER H01	38
3.4.1.1 Fonte de Alimentação	39
3.4.1.2 Fonte de Referência	39
3.4.1.3 Discriminador & Lógica	40
3.4.1.4 Gerador de Rampas de Teste	41
3.4.2 Programa ActMASTER S01	41
3.4.2.1 Barras de Controle	43
3.4.2.2 Página de Parâmetros.	45
3.4.2.3 Página de Medidas	47
3.4.2.4 Aquisição de Dados	48
3.5 Medidas de Corrente	50
3.5.1 Patamar e Corrente de Saturação da Câmara de Ionização	50
3.5.2 Determinação da Linearidade do Sistema	51
3.5.3 Estabilidade	52
3.5.4 Determinação da Incerteza Intrínseca do Sistema	52
3.5.5 Determinação do Fator de Calibração do ^{18}F	53
3.5.6 Determinação do Fator de Calibração do ^{153}Sm	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1 Patamar e Corrente de Saturação da Câmara de Ionização	54
4.2 Linearidade do Sistema	57
4.3 Estabilidade	59
4.4 Incerteza Intrínseca do Sistema	61
4.5 Fator de Calibração do ^{18}F	62
4.6 Fator de Calibração do ^{153}Sm	66
5 CONCLUSÕES	67
APÊNDICE - Diagramas ActMASTER H01	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 3.1 - Fontes Radioativas	30
Tabela 3.2 - Principais transições do decaimento do ^{18}F	30
Tabela 3.3 - Principais transições do decaimento do ^{60}Co	31
Tabela 3.4 - Principais transições do decaimento do ^{137}Cs	31
Tabela 3.5 - Principais transições do decaimento do ^{153}Sm	32
Tabela 4.1 - Perda percentual de corrente	56
Tabela 4.2 - Resultados finais do decaimento do ^{153}Sm	57
Tabela 4.3 - Parâmetros ajustados para o ^{153}Sm	58
Tabela 4.4 - Valores finais das medidas com ^{60}Co Monitor	60
Tabela 4.5 - Desvios da corrente em função de $t^{-0,5}$	61
Tabela 4.6 - Ajuste dos desvios	61
Tabela 4.7 - Dados finais do decaimento do ^{18}F	64
Tabela 4.8 - Parâmetros do ajuste para o ^{18}F	64
Tabela A.1 - Sinais elétricos do módulo ActMASTER H01	75

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1 - Princípio do método de Townsend	13
Figura 2.2 - Princípio do método de Taxa-de-Deriva	15
Figura 2.3 - Integrador Miller e o método de Taxa-de-Deriva	16
Figura 2.4 - Circuitos equivalentes do integrador Miller	16
Figura 2.5 - Sistema automático de SIMOEN & OSTROWSKY	23
Figura 2.6 - Sistema semi-automático de RYTZ	24
Figura 2.7 - Sistema semi-automático de DIAS	25
Figura 3.1 - O sistema de medida ActMASTER	27
Figura 3.2 - Amostras radioativas e seu posicionamento na câmara	29
Figura 3.3 - Esquema de decaimento simplificado do ^{18}F	30
Figura 3.4 - Esquema de decaimento simplificado do ^{60}Co	31
Figura 3.5 - Esquema de decaimento simplificado do ^{137}Cs	31
Figura 3.6 - Esquema de decaimento simplificado do ^{153}Sm	32
Figura 3.7 - Câmara de Ionização IG12/A20	33
Figura 3.8 - Recursos utilizados da CAD12/32	36
Figura 3.9 - ActMASTER H01: Circuito simplificado	38
Figura 3.10 - Interface gráfica ActMASTER S01	42
Figura 3.11 - Trecho da Página de Medidas	47
Figura 3.12 - Fluxograma do controle de aquisição	49
Figura 4.1 - Curvas de corrente em função da tensão de polarização	55
Figura 4.2 - Perdas por recombinação em função da corrente	56
Figura 4.3 - Comportamento dos resíduos das medidas de decaimento do ^{153}Sm ao longo do tempo	59
Figura 4.4 - Desvios percentuais em relação ao valor médio (^{60}Co Monitor)	60
Figura 4.5 - Desvios percentuais de corrente constante versus $t^{-0,5}$	61
Figura 4.6 - Comportamento dos resíduos das medidas de decaimento do ^{18}F ao longo do tempo	65
Figura A.1 - Fonte de Alimentação de Fonte de Referência	70
Figura A.2 - Discriminador & Lógica	71
Figura A.3 - Gerador de Rampas	72
Figura A.4 - Conexões entre o módulo ActMASTER H01 e o cartão CAD12/32	73
Figura A.5 - Painéis do módulo ActMASTER	74

1 INTRODUÇÃO

Câmaras de Ionização, operando em modo de corrente, têm sido amplamente empregadas em diversas áreas de pesquisa, em razão da sua excelente estabilidade e pela relativa simplicidade da eletrônica envolvida [1]. Em Metrologia Nuclear, os sistemas utilizando Câmaras de Ionização de Poço têm sido considerados padrões secundários para medidas de atividade de radionuclídeos [2-6]. Estes sistemas possibilitam a transferência da calibração obtida em um sistema de padronização primário, usualmente utilizando coincidências $4\pi\beta-\gamma$ [7-10], mantendo praticamente inalterada a exatidão original. A calibração no sistema primário, normalmente, é trabalhosa e demorada, podendo levar várias semanas para ser concluída, enquanto que a medida em um sistema de Câmara de Ionização é simples e rápida, levando, em média, algumas horas para a obtenção do resultado final.

A corrente elétrica produzida por uma câmara de ionização é muito baixa, situando-se na faixa de 10^{-11} a 10^{-15} A [5,6,11,12]. A medida de correntes dessa ordem exige a utilização de um sistema de alta sensibilidade, linearidade e reprodutibilidade, representando uma das principais dificuldades de uma calibração com câmara de ionização. É desejável, ainda, que o sistema opere automaticamente, tornando o processo de medida mais rápido e confiável.

O Laboratório de Metrologia Nuclear (LMN) do IPEN/CNEN-SP tem adquirido grande experiência em padronização de radionuclídeos [13-21], com participação em diversas comparações internacionais patrocinadas pelo Bureau Internacional des Poids et Mesures (BIPM) [22-25]. Este fato confere um excelente grau de confiabilidade às calibrações executadas pelo LMN.

Entre os seus diversos sistemas de medidas, o LMN possui dois sistemas de Câmara de Ionização de poço $4\pi-\gamma$ para medida de atividade, um deles operando à pressão atmosférica e o outro a uma pressão de 20 atm. Com estes sistemas, é possível a calibração de fontes radioativas com atividades desde algumas dezenas de kBq até dezenas de MBq. Estes sistemas têm sido operados de modo semi-automático, por meio de uma interface que comanda a operação de um eletrômetro Keithley Modelo 616, associado a um cronômetro, um voltímetro digital e uma impressora.

Essa interface de comando apresenta uma série de limitações que dificultam o processo de medida, tornando-o pouco prático (v. item 2.5.3). Por esse motivo, os sistemas de medida com Câmara de Ionização do **LMN** têm sido pouco empregados, o que impulsionou o desenvolvimento de um novo sistema de controle automático, de operação mais simples e confiável. Para sua implementação, optou-se por utilizar um microcomputador associado a uma placa de aquisição de dados comercial de padrão ISA. Este sistema foi denominado **ActMASTER**. Um circuito eletrônico (**ActMASTER H01**) e uma interface gráfica (**ActMASTER S01**), especialmente projetados, integram o sistema.

O programa que determina a atividade da amostra radioativa, a partir dos dados obtidos na aquisição, foi desenvolvido anteriormente pelo **LMN** [26]. Integrado à interface gráfica **ActMASTER S01**, este programa executa a leitura das medidas realizadas e os cálculos necessários.

O arranjo experimental, os métodos de medida e o sistema de aquisição e análise são apresentados no presente trabalho, conforme descrito a seguir:

- O Capítulo 2 apresenta os conceitos teóricos, com o objetivo de descrever a operação das câmaras de ionização e os principais métodos de medida da corrente de ionização, estabelecendo uma relação com a metodologia de medida da atividade de fontes radioativas.
- No Capítulo 3 (Materiais & Métodos), listam-se os recursos utilizados (equipamentos, programas etc.) e descrevem-se o sistema desenvolvido e a metodologia de ensaios.
- O Capítulo 4 apresenta os resultados dos ensaios e as discussões pertinentes.
- As conclusões, comentários finais, recomendações e perspectivas para o futuro são apresentadas no Capítulo 5.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo, é introduzido o fenômeno da desintegração radioativa e as grandezas envolvidas, estabelece-se a relação entre a corrente elétrica produzida por uma câmara de ionização e a atividade da amostra radioativa que a originou. Abordam-se os princípios de operação das câmaras de ionização, os métodos de medida de correntes e as considerações estatísticas, descrevendo-se a metodologia para determinação de atividades e alguns sistemas de medida que a implementam.

2.1 Desintegração Radioativa

O átomo nuclearmente instável é denominado radionuclídeo (núcleo radioativo). Para se tornar estável, o núcleo deve perder uma certa quantidade de energia, através de *decaimento* ou *desintegração radioativa* (processo de emissão radioativa). Há vários processos de desintegração radioativa, tais como a emissão de *partículas alfa* (α), a emissão de *partículas beta* (positivas: β^+ , ou negativas: β^-) e *captura eletrônica* (CE). Quando o núcleo filho é produzido em um estado excitado, podem ocorrer os processos de emissão de *fótons gama* (γ) ou a *conversão interna* (CI).

Os processos de desintegração possuem caráter estatístico. Muitos dos processos são seguidos de outros fenômenos radioativos, como a emissão de *raios-X característicos* ou *elétrons AUGER*, que se originam na eletrosfera, devido ao rearranjo dos elétrons, quando da ocupação de orbitais vagos.

Cada radionuclídeo possui uma probabilidade de desintegrar-se (por unidade de tempo), expressa por sua *constante de desintegração* (ou de *decaimento*), simbolizada por λ e cuja unidade é o inverso do tempo (s^{-1} , no S.I.).

Dada uma população onde o número de átomos de um radionuclídeo é N , em um instante t , a variação provável no número de átomos, dN , no intervalo dt entre t e $t+dt$ (resultado das desintegrações) é dada pela expressão:

$$dN = -\lambda N dt \quad (2.1)$$

resultando a lei do decaimento exponencial:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

onde: N_0 e N são os números de átomos do radionuclídeo que decai, respectivamente, nos instantes $t_0 = 0$ e t .

Define-se a Meia-Vida ($T_{1/2}$) como o tempo necessário para que o número de átomos seja reduzido à metade. Fazendo-se $N = N_0/2$, em (2.2), o tempo t equivale à Meia-Vida:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (2.3)$$

Há radionuclídeos que possuem Meia-Vida muito curta (frações de segundo) e outros cuja Meia-Vida é muito longa (bilhões de anos).

A taxa de desintegração média de um radionuclídeo é chamada de *Atividade* (A), sendo proporcional ao número de átomos (N) da amostra radioativa e à constante de decaimento (λ):

$$A = \lambda N \quad (2.4)$$

O número de átomos radioativos e a atividade diminuem com o tempo. Multiplicando-se a expressão (2.2) por λ , resulta:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.5)$$

onde: A_0 e A são as atividades, nos instantes $t_0 = 0$ e t , respectivamente.

Após o período de uma Meia-Vida, a Atividade fica reduzida à metade da inicial.

A unidade de atividade utilizada pelo S.I. é o *Becquerel* (Bq) que equivale a uma desintegração por segundo.

As partículas ou ondas eletromagnéticas (*fótons*) emitidas nas desintegrações radioativas carregam, total ou parcialmente, o excedente de energia do núcleo. Ao atravessar um meio material (*meio absorvedor*), essas radiações transferem energia ao mesmo, interagindo de maneira distinta, conforme a sua natureza, a sua energia e a natureza do absorvedor. Assim, partículas eletricamente carregadas interagem através das colisões com os elétrons do meio (excitando-os a orbitais mais externos ou arrancando-os do átomo). A colisão também pode ocorrer ao nível nuclear (produzindo *radiação X de freiamento*, também chamada de *radiação de "Bremsstrahlung"*, significativa somente para partículas leves, os elétrons e betas); os fótons interagem através de diferentes fenômenos, tais como a *absorção fotoelétrica*, o *espalhamento Compton* ou a *Produção de Pares* (sempre resultando em elétrons de alta energia cinética); os nêutrons interagem com os núcleos atômicos por meio de reações nucleares (*espalhamento elástico* ou *inelástico*, *captura radiativa*, *fissão nuclear*, entre outras), podendo resultar em liberação de energia e radiação (partículas leves ou pesadas, incluindo-se os *Fragmentos de Fissão*, fótons, nêutrons etc.).

Muito embora a energia da radiação proveniente de partículas carregadas ou fótons possa variar, a sua interação com a matéria (deposição de energia), em geral, resulta na promoção de elétrons a orbitais mais externos, de maior energia (*excitação*), ou na ejeção de elétrons orbitais (*ionização*).

A excitação e a ionização produzidas na matéria podem ser transformadas em grandezas mensuráveis (luz, sinais elétricos ou traços produzidos em filmes poliméricos ou cristais), através de dispositivos ou materiais, denominados *detetores de radiação*.

2.2 Câmaras de Ionização

Desde a sua descoberta, tornou-se importante detetar, medir ou identificar os campos de radiação. Atualmente, há uma variedade de dispositivos empregados na deteção das radiações ionizantes, como filmes fotográficos, detetores de traços, pastilhas termoluminescentes, cintiladores, detetores de ionização gasosa ou detetores de estado sólido.

Os detetores a gás situam-se entre os mais antigos dispositivos de medida de radiação. Nesta classe, encontram-se as câmaras de ionização.

Estes detetores são constituídos por dois eletrodos imersos em um meio gasoso. O conjunto é montado, por meio de suportes eletricamente isolados, em invólucro ou caixa, onde estão situadas as conexões externas (terminais) de polarização e coleta de sinal. A região gasosa entre os eletrodos corresponde ao volume sensível da câmara, onde ocorre a ionização responsável pelo sinal elétrico.

A câmara de placas paralelas é o tipo mais simples. Existem câmaras com outras geometrias, sendo muito utilizadas as de formato cilíndrico, de eletrodos coaxiais (tubos concêntricos de parede fina). O interior do tubo mais interno (eletrodo central, isolado do invólucro) corresponde à região onde são introduzidas as amostras radioativas, constituindo as câmaras tipo poço, como a utilizada neste trabalho (Capítulo 3). O eletrodo central pode ser formado por um fio fino que, normalmente, corresponde ao anodo (esta configuração é muito comum nos detetores proporcionais e Geiger-Müller). Há detetores que possuem mais de dois eletrodos, como os anéis de guarda que têm a finalidade de bem definir o volume sensível, tornando o campo elétrico mais uniforme, ou reduzir a fuga de corrente entre as conexões de polarização e coleta de sinal.

As dimensões das câmaras de ionização também podem variar muito, de alguns metros (muito utilizadas como padrões primários) a poucos centímetros (como as câmaras tipo dedal, utilizadas em dosimetria). Os materiais empregados na confecção de eletrodos podem ser metálicos (cobre, alumínio etc.) ou não metálicos (grafite, carvão). O gás pode ser o próprio ar (muito comum nas câmaras abertas), argônio, nitrogênio ou misturas. Nos detetores selados, a pressão do gás pode ser diferente da atmosférica.

Todos esses parâmetros (dimensão, geometria, tipo de gás, pressão etc.) determinam o tipo do detector gasoso, sua finalidade, tipo de radiação à qual é sensível e a faixa de operação. A câmara utilizada neste trabalho, por exemplo, é própria para medição de fótons, radiações capazes de atravessar as paredes metálicas do poço (atingindo a região sensível). Isto não significa que apenas emissores gama possam ser medidos. Como mencionado, os processos de decaimento podem dar origem a radiações secundárias (incluindo a produção de fótons). Assim, em um decaimento β puro, ocorre produção de Bremsstrahlung e, além desta, nos casos de decaimento por β^+ , existem os gamas de aniquilação de 511keV. Todos esses fótons (assim como as emissões X de rearranjo eletrônico etc.) são responsáveis pela ionização no volume sensível e conseqüente corrente elétrica. No Capítulo 3, podem ser vistos os esquemas de decaimento simplificados dos radionuclídeos constituintes das fontes utilizadas, fornecendo informação sobre as principais transições gama e outras emissões que podem dar origem a fótons.

2.2.1 Princípio de Operação

Como mencionado, a operação dos detectores de radiação se baseia na capacidade que essas emissões possuem de produzir excitação ou ionização dos átomos de um meio absorvedor. Assim, átomos excitados de determinados materiais podem emitir luz mensurável (cintiladores) ao desexcitar-se, bem como as cargas produzidas na ionização podem ser coletadas para produzir um sinal elétrico. Neste último caso, encontram-se os detectores gasosos. A coleta das cargas produzidas na ionização do gás é realizada por dois eletrodos eletricamente polarizados. O campo elétrico criado entre os eletrodos (volume preenchido com o gás) é responsável pela aceleração dos íons aí formados. O fluxo iônico estabelecido nos eletrodos resulta em pulsos ou níveis de corrente elétrica que podem ser observados, através de um circuito externo (um resistor, por exemplo). Os sinais elétricos produzidos guardam estrita relação com a energia depositada em cada interação (sinais do tipo Pulso, item 2.2.2) ou com a taxa de eventos (sinais do tipo Corrente, item 2.2.3). Este fato é de grande importância para a metrologia e a dosimetria das radiações.

Há três tipos de detectores a gás: câmaras de ionização, *Contadores Proporcionais* e *Contadores Geiger-Müller*. Embora o princípio seja o mesmo, existem particularidades na operação de cada tipo de detector, tornando-os adequados a diferentes propósitos.

2.2.2 Operação em Modo Pulso

Quando a atividade radioativa da fonte medida for relativamente baixa, as interações no volume sensível da câmara acontecem em intervalos de tempo maiores do que o necessário para a coleção das cargas formadas em cada interação (duração do pulso). Dessa forma, é possível distinguir os pulsos de corrente produzidos em cada interação. Individualmente, um pulso é constituído por uma corrente, função do tempo $i_p(t)$, tal que:

$$Q_p = \int_0^{t_p} i_p(t) dt \quad (2.6)$$

onde: Q_p é a carga total produzida na interação que forma o pulso;
 t_p tempo de duração do pulso.

A expressão 2.6 revela a relação entre a carga produzida em uma interação (proporcional ao número de íons coletados) e o pulso de corrente obtido.

A operação em Modo Pulso é mais utilizada com os contadores proporcionais e os contadores Geiger-Müller (estes últimos só operam em Modo Pulso). Estes tipos de detetores são polarizados de forma a se obter um forte campo elétrico, condição favorável à multiplicação iônica. A aceleração dos íons é muito intensa e a energia cinética atingida é suficiente para promover a ionização secundária. A quantidade de íons primários (produzidos na interação) é multiplicada, resultando em um sinal elétrico mais intenso que favorece a operação em Modo Pulso.

Em um contador proporcional, a razão numérica entre os íons coletados e os íons primários é, em média, constante (proporcionalidade que dá nome ao detetor). Portanto, estes detetores conservam a informação da energia depositada na interação, bem como da taxa de eventos.

Nos detetores Geiger-Müller, a multiplicação é muito intensa, causando saturação iônica (o pulso elétrico não guarda nenhuma relação com a quantidade de íons primários e, portanto, não traduz a energia que foi depositada na interação). São muito sensíveis, conseguindo detetar baixos níveis de radiação (são utilizados para acusar presença de contaminação ou para determinar taxas de contagens, doses, atividades etc.).

2.2.3 Operação em Modo Corrente

As câmaras de ionização, normalmente, operam nesta modalidade, muito utilizada em técnicas de medidas. Se a atividade da fonte medida for relativamente elevada, há um fluxo contínuo de cargas no interior da câmara (não é possível distinguir pulsos isolados) e o sinal obtido corresponde a uma corrente, função do tempo, $i_c(t)$, praticamente constante.

Considerando-se uma taxa de eventos (atividade) constante, durante o intervalo de medida, a energia depositada em cada evento é, em média, constante. Como a quantidade média dos íons formados em cada interação é proporcional à energia depositada, a taxa de coleta de íons (a corrente $i_c(t)$, em outras palavras), também possui um valor médio I_c , que pode ser expresso por:

$$I_c = r Q = r (\varepsilon / w) e \quad (2.7)$$

onde: I_c é o valor médio de $i_c(t)$;
 r é a taxa de eventos (atividade);
 Q carga média produzida por evento: $Q = (\varepsilon / w) e$;
 ε energia média depositada em cada evento;
 w energia média necessária à produção de um par de íons
(cada qual com uma unidade de carga: carga de um elétron);
 e unidade de carga: $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

Este princípio é utilizado pelos métodos que determinam atividades radioativas, doses ou taxas de dose, a partir da medida da corrente de uma câmara.

Integrando-se a corrente $i_c(t)$ em um intervalo de tempo T , obtém-se a carga total Q_T produzida durante esse intervalo. Na prática, pode-se integrar a corrente, aplicando-a a um capacitor externo C . Como a corrente possui um valor médio, para taxas constantes, a tensão no capacitor, $v_c(t)$, eleva-se de maneira praticamente linear.

Se a tensão for inicialmente nula, $v_c(0) = 0$, ao final do intervalo de medida, a tensão no capacitor C , $v_c(T) = V_c$, determina a carga acumulada:

$$Q_T = C V_c \quad (2.8)$$

2.2.4 Corrente de Saturação

Quando o campo elétrico não é suficiente para produzir uma aceleração adequada, uma fração dos íons não é coletada, devido à recombinação iônica, que corresponde à neutralização dos íons formados (cátions e elétrons livres). Neste caso, ocorre redução da intensidade do sinal elétrico produzido que pode não mais representar a grandeza desejada (atividade, dose etc.).

A recombinação pode ocorrer entre íons de um mesmo traço (pertencentes a uma mesma trajetória), sendo denominada de *Colunar*, ou entre íons de diferentes trajetórias, denominada *Volumétrica*. A recombinação colunar é mais provável para partículas altamente ionizantes, de trajetória essencialmente retilínea, como as partículas α . Em altas taxas (principalmente quando há espalhamento, como na ocorrência de efeito Compton), a grande densidade iônica no meio favorece a recombinação volumétrica. Nesse caso, deve-se aumentar a tensão de polarização. A intensidade do sinal aumenta significativamente com a polarização, até atingir-se a região de *Patamar*, faixa ampla de tensões onde a intensidade do sinal produzido varia muito pouco.

No patamar, a recombinação é pequena e a maior parte dos íons é coletada (região de operação das câmaras de ionização). Na região de patamar, deve-se escolher a tensão de operação apropriada, conforme a taxa de eventos a ser medida. Entretanto, não se deve aplicar tensões muito elevadas (acima do patamar), pois pode-se alcançar a região de *descarga contínua*, onde a rigidez dielétrica do gás é rompida (átomos ou moléculas permanecem ionizados), de forma que um forte fluxo iônico é produzido, mesmo sem a incidência de radiação. Portanto, deve-se conhecer as faixas de operação, para as quais a câmara foi projetada (polarização e atividades). Em algumas medidas, torna-se necessário estimar e utilizar fatores de correção.

Como a fração de íons coletados pode variar com fatores como o campo elétrico e a atividade da amostra radioativa, existem métodos para se estimar a correção no valor do sinal medido, de acordo com as condições de operação. A chamada *Corrente de Saturação* corresponde ao limite máximo da corrente de ionização (que seria obtido se a coleta iônica fosse total). Em alguns casos de medida, a maior parte dos íons formados é responsável pelo sinal da câmara, podendo-se considerar coleta de 100%. Porém, há casos em que a corrente real deve ser estimada pelo valor da corrente de saturação (I_S). Obtendo-se as curvas de *corrente versus tensão de polarização* de uma dada câmara, para diferentes atividades da amostra radioativa, podem-se determinar os valores da corrente de saturação. Vários autores estimaram as perdas de corrente por recombinação, em câmaras utilizadas em dosimetria [FULBRIGHT (1958), HÜBNER (1958), SPRINKLE & TATE (1966), BOAG (1966, 1975), BÖHM (1976), MUSTAFA & MAHESH (1978)] apud SCHRADER (1997)²⁷.

Para câmaras de ionização reentrantes (cilíndricas), tomam-se as correntes da região de patamar, obtendo-se as curvas de y versus x ($y = I$, valores medidos da corrente de ionização, e $x = 1/V$, valores inversos da tensão de polarização). Através do ajuste linear dos pontos experimentais, a reta [$y = A + B x$], a corrente de saturação é dada pelo parâmetro A [WEISS (1973) apud SCHRADER (1997)²⁷], ou seja: $I_S = A$. Isso significa que o parâmetro A corresponde ao valor extrapolado da corrente, quando $1/V$ for igual a zero (tensão de polarização tendendo ao infinito: a coleta iônica assume o maior valor possível). Dessa forma, pode-se determinar a perda fracional ou percentual na corrente de ionização (I) na tensão de operação, para as condições de medida utilizadas (polarização, atividade etc.):

$$P = (I_S - I) / I \quad \text{ou} \quad P_{(\%) } = 100 (I_S - I) / I \quad (2.9)$$

Outro parâmetro percentual também utilizado, $s_{(\%)}$, fornece a inclinação do patamar, através da variação na corrente, ΔI_{100} , para cada 100V de variação na polarização [27], dando uma idéia das possíveis perdas [$s_{(\%) } = 100 \Delta I_{100} / I$].

Para medir este efeito, efetuaram-se medidas da corrente de ionização da câmara utilizada, em função da polarização, para diferentes atividades (descrição e resultados, respectivamente, nos Capítulos 3 e 4).

2.3 Medida de Correntes de Câmaras de Ionização

A equação (2.7) mostra que uma câmara de ionização, operando em Modo Corrente, produz uma corrente elétrica proporcional à atividade de uma fonte radioativa. Medindo-se o valor dessa corrente, pode-se determinar a atividade da fonte sob medida. Cada método de medida de corrente apresenta características próprias que podem resultar em maior ou menor exatidão ou precisão.

Quando uma corrente elétrica i circula através de um resistor conhecido R , produz-se em seus terminais uma diferença de potencial $V_R = R i$. Este é o método mais simples para medida de correntes. Medindo-se a tensão V_R , obtém-se: $i = V_R/R$. As escalas do voltímetro de medida podem ser calibradas, diretamente, em valor de corrente. Para que as tensões sejam mensuráveis, a resistência R deve ser elevada, pois as correntes das câmaras de ionização são muito baixas (da ordem de μA a pA). Resistores de alto valor, normalmente, apresentam alguns inconvenientes [28], como flutuações em sua resistência nominal (em curtos períodos de tempo), não linearidade com a tensão e tendência de apresentar ruído. Todos esses fatores podem levar a alterações de calibração e imprecisão de medida da ordem de 1%.

O voltímetro empregado na medida deve ter elevada impedância de entrada (pelo menos, dez vezes maior do que a resistência R), para não introduzir alteração significativa no valor da leitura. Para aumentar o desempenho deste circuito de medida, pode-se utilizar amplificadores de tensão, possibilitando o emprego de resistências com valores mais baixos e estáveis. Os voltímetros com essas características (com circuitos amplificadores de alta impedância de entrada) são denominados de eletrômetros.

O método de medida acima, entretanto, resulta na leitura de um valor instantâneo, não considerando as flutuações estatísticas inerentes ao processo de decaimento radioativo. Para medidas onde se exige maior precisão, os métodos baseados na integração da corrente de uma câmara de ionização são mais utilizados. Todos esses métodos empregam capacitores, onde a carga produzida é armazenada. Capacitores estáveis e com alta resistência de isolamento garantem precisão e linearidade, sendo mais baratos e de obtenção mais simples, se comparados aos resistores de alto valor. Portanto, a utilização deste tipo de componente é vantajosa, tanto por suas melhores características, como pelo método de medida por integração da corrente.

2.3.1 Método de Medida de Townsend

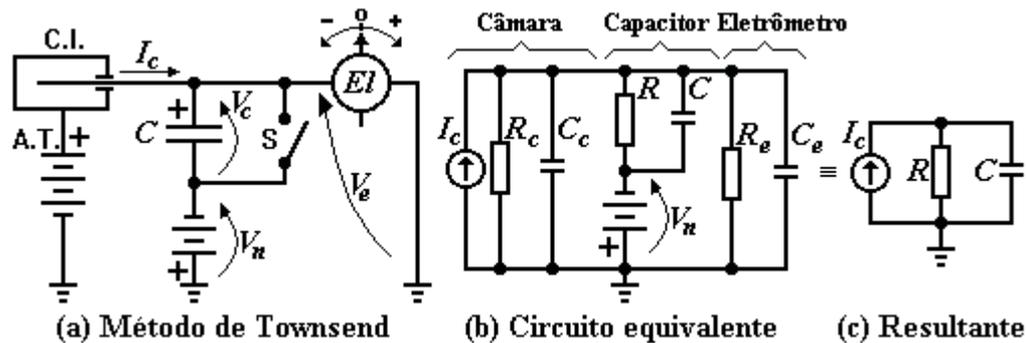


Figura 2.1 - Princípio do método de Townsend

A figura 2.1(a) mostra o princípio do método de Townsend [5,27-29] ou método de medida de Nulo. A chave S mantém o capacitor de integração C em curto-circuito ($V_c = 0V$) e a fonte de referência V_n , ajustável, permanece com tensão nula. A tensão no eletrodo EI corresponde à soma das tensões do capacitor e da fonte de referência: $V_e = V_c + V_n$. Neste caso, o eletrodo representa apenas um detetor de zero (medida de Nulo), não sendo utilizado para medir as tensões V_c ou V_n . Abrindo-se a chave S , a corrente da câmara I_c começa a carregar o capacitor C e a tensão V_n é continuamente reajustada, de forma a manter nula a tensão do eletrodo ($V_c = -V_n$). Como a tensão V_e é nula, as resistências e capacitâncias internas da câmara e de entrada do eletrodo (R_c e C_c ; R_e e C_e , respectivamente) do circuito equivalente da Figura 2.1(b) podem ser omitidas e o circuito se resume ao da Figura 2.1(c), onde R é a resistência de isolamento do capacitor C . Isto significa que as impedâncias, interna da câmara e de entrada do eletrodo, não exercem influência sobre a integração da corrente I_c que depende apenas do capacitor de integração. Neste caso, a tensão $V_c(t)$ pode ser expressa por:

$$V_c(t) = R I_c (1 - e^{-t/RC}) \quad (2.10)$$

Expandindo-se a exponencial até o termo de segunda ordem, resulta:

$$V_c(t) = \frac{I_c t}{C} \left(1 - \frac{t}{2RC} \right) \quad (2.11)$$

Portanto, a linearidade de $V_c(t)$ depende apenas da qualidade do capacitor de integração. De fato, se R for muito elevada (a constante de tempo é muito maior que o tempo de integração), a expressão (2.11) se resume a:

$$V_c(t) = \frac{I_c t}{C} \quad (2.12)$$

Ao final da integração, conhecendo-se a tensão ajustada V_n que, em módulo, é igual à tensão V_c , pode-se calcular o valor médio da corrente da câmara, a partir da equação (2.12). Lembrando-se que a tensão inicial $V_c(0) = 0$ e a tensão final $V_c(T) = |V_n|$, onde T é o tempo de integração, obtém-se:

$$I_c = \frac{C V}{t} = \frac{C |V_n|}{T} \quad (2.13)$$

Como visto, a grande vantagem do método reside no fato de as impedâncias parasitas (interna da câmara e de entrada do eletrômetro, incluindo-se as capacitâncias das conexões) não afetarem a integração. O principal inconveniente corresponde à necessidade de reajustar, continuamente, a tensão V_n .

A execução manual desse ajuste não é conveniente. Para poucas medidas de curta duração o fato pode não ser representativo mas, de qualquer forma, o processo exige a intervenção de um operador treinado e, mesmo assim, podem ocorrer erros de operação que comprometeriam o resultado final. Por outro lado, o controle automático de tal compensação é relativamente complexo, exigindo um projeto cuidadoso. A seção 2.5.2 apresenta um sistema que efetua automaticamente a compensação da tensão do capacitor, V_c , em degraus conhecidos de tensão.

Com a evolução dos instrumentos de medida, conseguiram-se sistemas que reduzem sensivelmente a influência das impedâncias indesejadas, de forma que a integração da corrente seja fundamentalmente realizada por um capacitor de qualidade e sem a necessidade de efetuar a compensação de tensão, acima descrita. A seguir, o método básico de medida sem compensação é descrito, salientando-se o efeito prejudicial das impedâncias indesejadas e apontando a solução encontrada para torná-lo desprezível.

2.3.2 Método de Medida de Taxa-de-Deriva

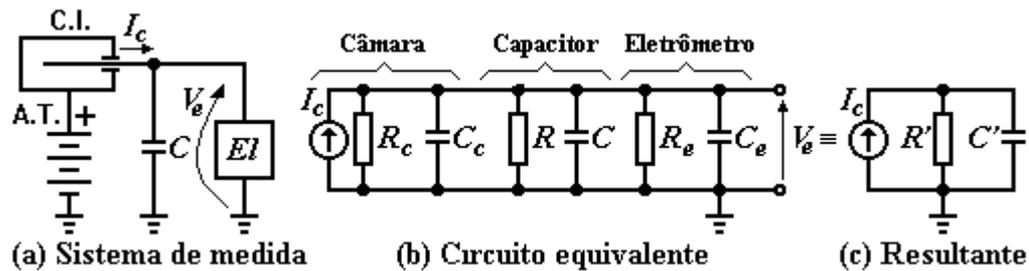


Figura 2.2 - Princípio do método de Taxa-de-Deriva

O método de *Taxa-de-Deriva* ("Rate-of-Drift") [11,29] é semelhante ao anterior, medindo-se a tensão V_c através do eletroímã EI que, neste caso, não possui a função de simples detector de Nulo. A corrente I_c pode ser obtida através da expressão (2.13). Porém, como a capacitância de integração pode ser considerada constante, pode-se medir apenas a taxa de variação da tensão (taxa-de-deriva), $\dot{V} = dV / dt$, (item 2.4).

O circuito básico, Figura 2.2(a), tem como equivalentes os circuitos das Figuras 2.2(b) e 2.2(c), utilizando-se a mesma nomenclatura da Figura 2.1. A diferença, em relação ao método anterior, é que a impedância interna da câmara e a de entrada do eletroímã podem afetar muito a integração. Na prática, R_c , C_c , R_e e C_e podem ser da mesma ordem de grandeza de R e C , resultando em um circuito de integração onde R' e C' correspondem, respectivamente, à associação em paralelo de R_c , R_e e R e C_c , C_e e C .

Das resistências e capacitâncias envolvidas, somente R e C são muito bem conhecidas e, na forma proposta, o método não poderia ser utilizado. Por esse motivo, o método de Townsend foi muito usado. Porém, com o avanço dos dispositivos eletrônicos, obtiveram-se circuitos amplificadores de excelente desempenho que, configurados com realimentação negativa, reduzem significativamente a influência da impedância equivalente no circuito de entrada, tornando-a desprezível. Assim, associam-se a vantagem do método de Townsend e a desnecessidade de manter nula a tensão do eletroímã (a impedância de entrada é mantida, automaticamente, em potenciais muito próximos de zero).

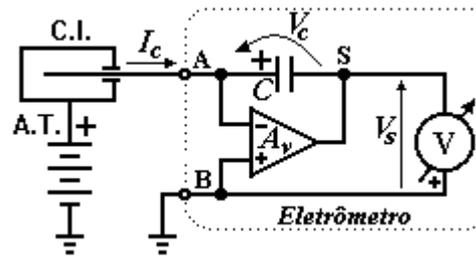


Figura 2.3 - Integrador Miller e o método de Taxa-de-Deriva

O circuito da Figura 2.3, chamado de *Integrador Miller*, é constituído por um amplificador diferencial com elevados ganho de tensão e impedância de entrada. O capacitor de integração é ligado em realimentação negativa. Como o ganho de tensão do amplificador (A_v , em módulo) é muito elevado e a tensão de saída (V_s) possui um valor finito, a tensão no ponto A (entrada inversora) é muito próxima de zero ($V_e = 0V$: Terra Virtual). O integrador Miller da Figura 2.3 tem como equivalentes os circuitos da Figura 2.4 [11,12]:

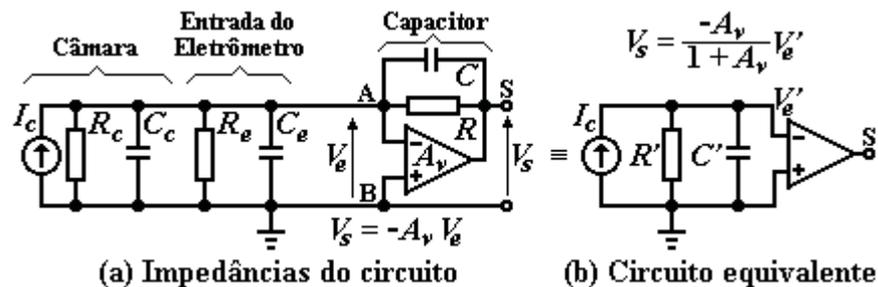


Figura 2.4 - Circuitos equivalentes do integrador Miller

As impedâncias no circuito de entrada, R_c , C_c , R_e , C_e da Figura 2.4(a), embora possam ser representativas, estão submetidas ao potencial V_e e, portanto, a corrente desviada no circuito de entrada é desprezível. Pode-se admitir, praticamente, que a totalidade da corrente I_c flui para o capacitor de integração C .

De acordo com as referências [11,12], o circuito Miller equivalente da Figura 2.4(b) possui ganho em tensão dado por:

$$A_v' = - \frac{A_v}{1+A_v} \quad (2.14)$$

e R' e C' , respectivamente, resistência e capacitância equivalentes de integração são tais que:

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_c(1+A_v)} + \frac{1}{R_e(1+A_v)} = \frac{1}{R} \left[1 + \frac{R}{1+A_v} \left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_e} \right) \right] \quad (2.15)$$

$$C' = C + \frac{C_c + C_e}{1+A_v} = C \left[1 + \frac{C_c + C_e}{C(1+A_v)} \right] \quad (2.16)$$

Para ganhos em malha aberta muito elevados (diga-se: $A_v = 10^5$), as expressões 2.14 a 2.16 podem ser reduzidas a (desprezando-se os termos divididos por $1+A_v$), respectivamente:

$$A_v' = -1 \quad (2.17)$$

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R} \implies R' = R \quad (2.18)$$

$$C' = C \quad (2.19)$$

e, desta forma, a tensão do capacitor de integração, $v_c(t) = -v_s(t)$, onde $v_s(t)$ é a tensão de saída do circuito, pode ser descrita pelas expressões 2.10 a 2.12, do método de Townsend, sendo também válida, a expressão 2.13, para determinação da corrente da câmara (desde que a condição $RC \gg T$ seja mantida).

Na prática, o circuito Miller, cuja realimentação negativa resulta em um circuito de entrada com tensão muito próxima de zero (Terra Virtual), reproduz, de forma automática, as condições do método de Townsend. As expressões (2.15) e (2.16) mostram que a contribuição das resistências R_c e R_e e das capacitâncias C_c e C_e sobre a integração da corrente é significativamente reduzida.

O método de Taxa-de-Deriva pode ser implementado de diferentes maneiras:

- valor de tensão V_c prefixado: mede-se o tempo de integração;
- tempo de integração T prefixado: mede-se o valor final da tensão V_c .

Nos dois casos, determina-se a taxa de variação da tensão de integração \dot{V} , podendo-se obter o valor da corrente da câmara: $I_c = C \dot{V}$, equação (2.13).

Pode-se estabelecer uma carga (ou tensão V_c) inicial, a partir da qual se efetua a medida de tempo ou de variação de tensão. Desta forma, evitam-se possíveis flutuações (instabilidade ou ruído) ou não linearidade em tensões próximas de zero. Este método é utilizado no sistema **ActMASTER**), estabelecendo-se dois valores de tensão, V_1 e V_2 e medindo-se o tempo de integração decorrido entre as tensões V_1 e V_2 . Maiores detalhes são fornecidos no item 2.5.3 e no Capítulo 3.

2.3.3 Aspectos Estatísticos

Seja qual for o método de integração de corrente utilizado (v. 2.3.1 e 2.3.2), é sempre necessário considerar o caráter estatístico da desintegração radioativa, efetuando-se uma análise das possíveis fontes de flutuação e estimando-se as incertezas das medidas obtidas. Neste caso, a distribuição de Poisson é o modelo matemático adotado para descrever as *flutuações estatísticas das contagens*, base para as deduções abaixo [1,27].

Como visto em 2.2.3, a corrente de uma câmara, $i_c(t)$, possui um valor médio I_c e pode ser decomposta em duas parcelas:

$$i_c(t) = I_c + s_i(t) \quad (2.20)$$

onde: I_c é a parcela constante (valor médio);

$s_i(t)$ parcela dependente do tempo (flutuação no número de íons formados).

O valor médio do quadrado da parcela aleatória corresponde à variância ou valor quadrático médio da corrente $i_c(t)$, calculado para o tempo de integração T :

$$\overline{s_i^2(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T [i_c(t) - I_c]^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T [s_i(t)]^2 dt \quad (2.21)$$

Da expressão (2.21), calcula-se o desvio padrão da corrente:

$$s_i(t) = \sqrt{\overline{s_i^2(t)}} \quad (2.22)$$

Por Poisson, o desvio padrão esperado em n eventos observados em um dado intervalo de tempo T é dado por:

$$s_n = \sqrt{n} \quad (2.23)$$

ou, escrevendo-se n em função da taxa de eventos r :

$$s_n = \sqrt{rT} \quad (2.24)$$

Como, no intervalo de tempo T , a corrente média produzida pela câmara é proporcional ao número eventos (n), o seu desvio fracional equivale ao desvio fracional em n :

$$\frac{s_i(t)}{I_c} = \frac{s_n}{n} = \sqrt{\frac{1}{n}} = \frac{1}{\sqrt{rT}} \quad (2.25)$$

Desta expressão, deduz-se que a incerteza fracional (ou percentual) de uma medida diminui com o tempo de integração e com a atividade radioativa (tendendo a zero, para tempos ou atividades muito grandes). Determinando-se as incertezas fracionais, em função do tempo de integração (com atividade constante) ou da atividade (com tempo de integração constante), pode-se estimar a precisão intrínseca do sistema de medida, pela extrapolação da incerteza a valores infinitos de tempo ou atividade. Semelhantes procedimentos foram utilizados por alguns autores, [EVANS (1955), MAIER-LEIBNITZ (1957), WEBER (1966), ANDRESEN (1967), DÖRFEL (1967), WEISE (1971)] apud SCHRADER (1997)²⁷, DIAS (1978)²⁹. A incerteza intrínseca do sistema ActMASTER foi determinada no presente trabalho, utilizando medidas das incertezas percentuais em função do tempo, realizadas com atividade constante (v. itens 3.5.4 e 4.4).

Da expressão (2.7), deduz-se que a flutuação estatística da corrente depende de outros fatores, como a energia média depositada por evento ε e a energia média necessária à produção de um par de íons w . Portanto, a natureza (e a energia) da emissão radioativa e o gás utilizado na câmara são fatores que determinam a quantidade média dos íons produzidos, por interação ou unidade de tempo. Amostras diferentes, de mesma atividade, podem produzir correntes muito diferentes; incertezas associadas a correntes da mesma ordem de grandeza podem ser diferentes.

É necessário obter os fatores de calibração, para cada um dos radionuclídeos que se deseja medir (para uma dada geometria). Na referência [29], encontram-se os fatores de calibração da câmara de ionização utilizada neste trabalho, obtidos para alguns radionuclídeos (^{22}Na , ^{24}Na , ^{42}K , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{134}Cs , ^{139}Ce , ^{198}Au e ^{241}Am).

O presente trabalho apresenta os fatores de calibração obtidos para o ^{18}F e o ^{153}Sm , para a mesma geometria do trabalho acima referenciado (ampolas de soluções radioativas, conforme Capítulo 3). O programa de cálculo utiliza os fatores de calibração apropriados para determinar a atividade da amostra de interesse (maiores detalhes no item 2.4).

2.4 Determinação da Atividade

Como visto, uma fonte radioativa produz uma corrente de ionização proporcional à sua atividade. O Laboratório de Metrologia Nuclear (LMN) do IPEN realiza a medida de \dot{V} (taxa) para determinar a atividade de uma dada amostra, utilizando um método de medida relativa, onde se compara a taxa produzida pela amostra de interesse com aquela produzida pela fonte Monitor (de atividade conhecida). A taxa medida sem fonte radioativa (BG) é subtraída das medidas da amostra e do Monitor. O método de medida relativa melhora a precisão do resultado, minimizando efeitos de possíveis não linearidades ou flutuações do sistema de medida. A não linearidade (embora pequena, como demonstrado no item 2.3.2) influi sobre todas as medidas de taxa (amostra, Monitor e BG), sendo parcialmente compensada. Pelo mesmo motivo, desvios em valores nominais (como na capacitância de integração) não interferem no resultado final, sendo mais importante a estabilidade no tempo com fatores como temperatura (controlada por sistema de condicionamento de ar, no LMN) e umidade. Estas flutuações de longo prazo são, portanto, corrigidas pela medida do Monitor.

Para amostras de Meia-Vida curta, medidas consecutivas podem resultar em taxas diferentes, devendo-se efetuar correções para decaimento. A expressão final da taxa de variação de tensão líquida, considerando-se decaimento e BG, é dada por [27]:

$$\dot{V}_c = (\dot{V} - \dot{V}_B) \frac{\lambda T}{(1 - e^{-\lambda T})} \quad (2.26)$$

onde: \dot{V}_c é a taxa de tensão corrigida para o instante inicial da medida;
 \dot{V} é a taxa medida (sem correção);
 \dot{V}_B é a taxa medida de BG;
 λ é a constante de decaimento do radionuclídeo da amostra radioativa;
 T é o tempo da medida (de integração).

Se mais de uma medida for realizada, para obtenção de um valor médio, além da correção de cada medida ao instante inicial, devem-se corrigir todas as medidas para um único instante de referência. Essa correção é obtida através da expressão (2.5), do decaimento radioativo, substituindo-se a Atividade pela medida que a representa:

$$\dot{V} = \dot{V}_0 e^{-\lambda t} \quad (2.27)$$

onde: \dot{V} é o valor da medida no instante de referência t_r ;
 \dot{V}_0 é o valor da medida em seu instante inicial t_0 ;
 $t = t_r - t_0$.

Finalmente, com as taxas médias finais (amostra e Monitor), calculadas para um mesmo instante de referência t_r , determina-se a atividade da amostra de interesse, A_x , no instante t_r , utilizando-se os fatores de calibração (amostra e Monitor), através da expressão:

$$A_x = A_M \cdot \frac{F_M}{F_x} \cdot \frac{\dot{V}_x}{\dot{V}_M} \quad (2.28)$$

onde: A_M é a atividade do Monitor, calculada para o instante t_r ;
 F_M é o fator de calibração do radionuclídeo que constitui o Monitor;
 F_x é o fator de calibração do radionuclídeo que constitui a amostra de interesse;
 \dot{V}_M é o valor médio da medida corrigida obtida para o Monitor;
 \dot{V}_x é o valor médio da medida corrigida obtida para a amostra de interesse.

Os fatores de calibração, normalmente, correspondem à corrente obtida por Becquerel de atividade (A/Bq). A expressão (2.28) utiliza \dot{V} (método utilizado no sistema **ActMASTER**) e, neste caso, os fatores de calibração correspondem à variação de tensão por unidade de tempo por Becquerel [(V/s)/Bq]. Para os casos onde o radionuclídeo não tenha sido calibrado previamente em um sistema primário (usualmente por coincidências $4\pi\beta-\gamma$), estes fatores podem ser obtidos, através da somatória dos produtos da eficiência γ da câmara (função da energia) pela intensidade γ absoluta [29].

A expressão (2.28) também pode ser utilizada para determinar o fator de calibração de um dado radionuclídeo (amostra de interesse), efetuando-se as medidas conforme descrito acima. Neste caso, a atividade da amostra de interesse deve ser conhecida, por exemplo, determinada em sistema de coincidência $4\pi\beta-\gamma$. Os fatores de calibração do ^{18}F e do ^{153}Sm foram determinados neste trabalho (Capítulos 3 e 4).

2.5 Sistemas de Medida

Para implementar os métodos de medida apresentados, torna-se necessário utilizar sistemas que comandem os instrumentos de medida (eletrômetro), executando a leitura e o registro das informações obtidas (o tempo ou a tensão de integração). Esses sistemas, dependendo do projeto, podem ser manuais, semi-automáticos ou automáticos. Há sistemas que apenas controlam o processo de aquisição, registrando os dados em uma impressora, para posterior tratamento e obtenção de resultados. A utilização de computadores pessoais facilita a implementação de sistemas autônomos que executam o controle necessário, o registro e o processamento das informações obtidas, apresentando relatório final, com valor da grandeza desejada (corrente da câmara, atividade) e respectiva incerteza.

Para ilustrar as possibilidades mencionadas, apresenta-se uma sucinta revisão bibliográfica, onde se descrevem três sistemas de medida, mostrando semelhanças e peculiaridades de cada um e a sua relação com os métodos de medida descritos.

O item 2.5.3 descreve o sistema de DIAS (1978)²⁹, antecessor do **ActMASTER**. A metodologia para determinação de atividades é a mesma para os dois sistemas. O sistema **ActMASTER** executa todo o processo de aquisição de forma autônoma e os cálculos necessários.

2.5.1 Sistema de SIMOEN & OSTROWSKY

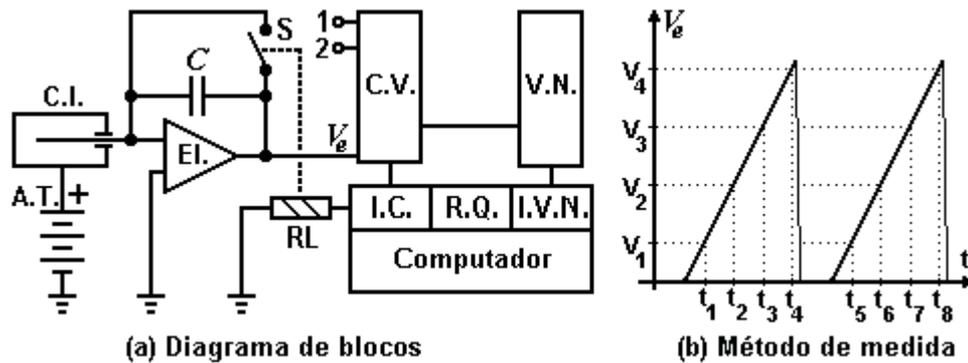


Figura 2.5 - Sistema automático de SIMOEN & OSTROWSKY

SIMOEN & OSTROWSKY (1979)¹¹ descrevem um sistema que utiliza o método de Taxa-de-Deriva. O diagrama em blocos pode ser visto na Figura 2.5(a).

O Computador controla o sistema, através de programa próprio. A interface de comando (I.C.) provê os sinais de controle do sistema: o endereço para o comutador de vias (C.V.: multiplexador analógico) e o comando do relê RL (contatos S). De acordo com o endereçamento de C.V., o voltímetro numérico V.N. efetua a leitura das tensões dos canais 1, 2 ou a saída do eletrômetro. Os canais 1 e 2 são entradas para sinais provenientes de transdutores de pressão, temperatura ou umidade que permitem efetuar correções nas medidas obtidas, conforme as condições atmosféricas (particularmente importantes, para as câmaras de ionização abertas, as câmaras de ar livre).

No início da medida, a interface de comando I.C. abre os contatos S (relê RL) e o eletrômetro EI. passa a integrar a corrente da câmara (capacitor C). O sistema executa a monitoração da saída do eletrômetro, através do voltímetro numérico V.N. (controlado pela interface I.V.N.), registrando os instantes em que a tensão V_e se igualam aos valores $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$ (previamente programados), respectivamente, $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$. A Figura 2.5(b) exemplifica uma medida com dois ciclos de integração, onde $n = 4$.

Ao final de um ciclo de integração, os valores de V/t são calculados através dos instantes t_n e das tensões V_n : $(V_2 - V_1)/(t_2 - t_1)$, $(V_3 - V_2)/(t_3 - t_2)$, ..., $(V_n - V_{n-1})/(t_n - t_{n-1})$. Os contatos S são, então, fechados para dar início a outro ciclo. Com os valores V/t obtidos, efetuam-se os cálculos estatísticos para a obtenção do valor da corrente da câmara. Como os instantes t_n são obtidos do relógio a quartzo (**R.Q.**), em tempo real, os instantes do segundo ciclo de medida, Figura 2.5(b), possuem índices distintos.

2.5.2 Sistema de RYTZ

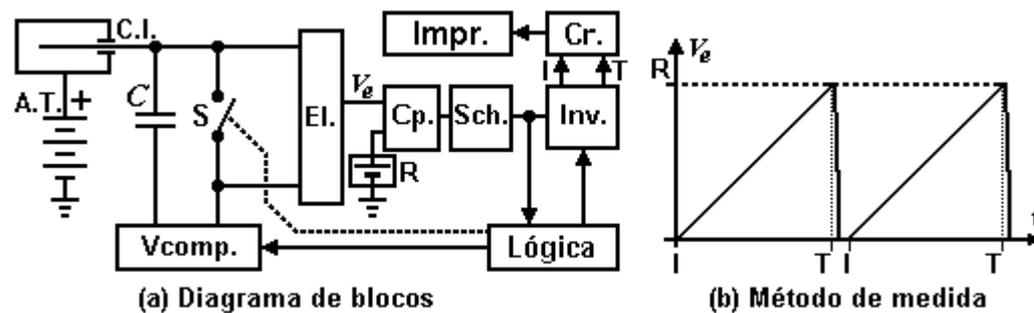


Figura 2.6 - Sistema semi-automático de RYTZ

O sistema da Figura 2.6(a), descrito por RYTZ (1983)⁵, possui operação baseada no método de Townsend, efetuando a compensação de V_c por etapas (não continuamente).

No instante inicial (sinal de início **I** ativado), a chave **S** é aberta e a corrente é integrada em **C**, cuja tensão é isolada pelo eletrômetro **EI**. (com alta impedância de entrada). O circuito **Cp**. compara a tensão do eletrômetro à tensão de referência **R** (dada por uma pilha de mercúrio), gerando o sinal de término **T**, quando ocorrer igualdade. O bloco **Sch.** (circuito "Schmitt Trigger") elimina possíveis oscilações de **Cp**., Os sinais **I** e **T** controlam a contagem de tempo no cronômetro **Cr.** (**conta/para**, respectivamente), sendo produzidos pela etapa denominada inversora (**Inv.**). Ao final de cada ciclo (instante de ocorrência do sinal **T**), a Lógica do sistema, disparada por **Sch.**, envia sinais de comando ao circuito **Vcomp.**, gerador de tensão em degraus ("Steps" de precisão, de valor **U**), reajustando sua saída, de forma a compensar a tensão de **C** (anulando a tensão à entrada de **EI**). O número de degraus de tensão necessários à compensação, **n**, é registrado em um contador na seção Lógica.

A aquisição completa se compõe de um dado número de ciclos de integração, como descrito à página anterior. A Figura 2.6(b) mostra dois ciclos de uma aquisição. Deve-se observar que a tensão em C é apenas compensada, ao final de cada ciclo, retornando a zero apenas no final da medida. A contagem do número de degraus (n) e do tempo em $Cr.$ (T) são cumulativas e, ao final da medida, as contagens, n e T , são impressas (**Impr.**). Com esses dados, calculam-se a tensão final no capacitor C , $V_c = n U$, e o valor da corrente da câmara, $I_c = n U C/T$.

2.5.3 Sistema de DIAS

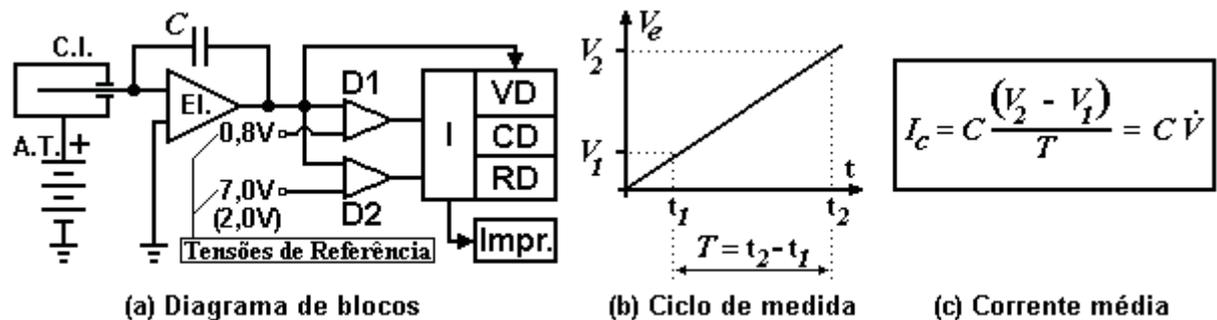


Figura 2.7 - Sistema semi-automático de DIAS

A Figura 2.7(a), esquematiza o sistema descrito por DIAS (1978)²⁹, utilizado pelo LMN, que emprega o método de Taxa-de-Deriva. A tensão V_e (saída de **EI.**) é comparada com duas referências, de 800mV (V_1) e 7,0V (V_2). Ao igualar-se a V_1 , o discriminador **D1** comuta de estado e a interface **I** produz os sinais de comando da impressora (**Impr.**), para registro da hora inicial da medida (leitura do relógio digital **RD**, importante para as correções de decaimento) e da tensão do eletrômetro (saída do voltímetro digital **VD**), iniciando-se a contagem do tempo de integração (cronômetro digital **CD**). Ao atingir-se a tensão V_2 , a comutação do discriminador **D2** faz com que a interface **I** envie os sinais de impressão do tempo de integração, T (contagem em **CD**), e da tensão em **VD**, de final de ciclo. O operador deve, então, efetuar o comando de ZERO (descarga do capacitor do eletrômetro), preparando o sistema para outro ciclo de medida.

Os valores impressos das tensões de início e término (V_1 e V_2), do tempo de integração (T) e dos horários do início de cada ciclo constituem os dados de entrada para o programa de cálculo que determina a atividade da fonte radioativa medida (esses dados devem ser inseridos manualmente). A Figura 2.7(b) esquematiza um ciclo de integração. A expressão da Figura 2.7(c) fornece a corrente média da câmara durante o ciclo de medida e corresponde à equação (2.13). A metodologia de cálculo está resumida no item 2.4.

O sistema possibilita alterar o valor de V_2 , de 7 para 2V, permitindo diminuir o tempo de integração, por exemplo, nas medidas da radiação de fundo ou BG ("Back Ground").

Este sistema apresenta alguns inconvenientes, tais como:

- Necessidade da intervenção contínua de um operador durante o processo de medida, para comandar o início de cada medida.
- Os comparadores **D1** e **D2** operam em malha aberta e sua comutação, para tempos de integração longos, é instável. As oscilações produzidas resultam em múltiplos registros das tensões de limiar, V_1 e V_2 .
- Após a conclusão das medidas, é necessário inserir os dados impressos, manualmente, para alimentar o programa de cálculo.

Devido aos problemas apontados, os processos de medida e análise são pouco práticos, possibilitando a ocorrência de erros na operação ou na digitação dos dados que podem prejudicar a exatidão ou a precisão do resultado final.

3 PARTE EXPERIMENTAL

Os materiais utilizados e o sistema de medidas desenvolvido são apresentados neste capítulo. A Figura 3.1 esquematiza o sistema completo:

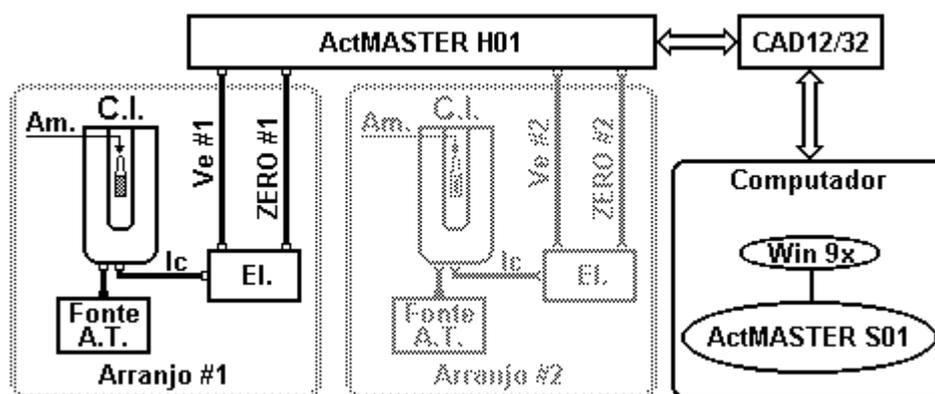


Figura 3.1 O sistema de medida ActMASTER

Pode-se dividir o sistema nas seguintes partes:

Arranjo de Medida:

- Amostra radioativa a ser medida;
- Câmara de Ionização;
- Fonte de tensão DC, para polarização da Câmara;
- Eletrômetro.

Placa de Aquisição de Dados:

- CAD12/32 (Multi I/O).

Microcomputador Pessoal (plataforma Win 9x).

Sistema de Automatização:

- Circuito eletrônico ActMASTER H01;
- Programa de interface gráfica e controle de aquisição ActMASTER S01.

O módulo **ActMASTER H01**, permite a conexão de dois Arranjos de Medida. Entretanto, apenas o Arranjo da câmara pressurizada foi utilizado para os ensaios (assim, o Arranjo #2 aparece sombreado na Figura 3.1, à página anterior). A câmara empregada é mais sensível (possibilitando a utilização de fontes com atividades mais baixas) e, sendo selada, não sofre influência significativa das variações atmosféricas (tornando desnecessário efetuar as respectivas correções no cálculo da corrente de ionização).

3.1 Arranjo de Medida

De acordo com a classificação à página anterior, amostra, câmara de ionização, fonte de polarização e eletrômetro constituem o arranjo de medida. As características principais de cada integrante são apresentadas a seguir.

3.1.1 Amostras Radioativas

Foram utilizadas soluções radioativas, em ampolas, padrão **BIPM/NBS(NIST)**, com as seguintes características e dimensões nominais [5]:

- material: vidro comum;
- diâmetro interno: $(15,16 \pm 0,09)$ mm;
- espessura da parede: $(0,642 \pm 0,006)$ mm;
- capacidade útil: $(3,6 \pm 0,2)$ ml;
- capacidade total: ~5ml.

As ampolas foram seladas na chama de um maçarico, após preenchimento com a solução. As variações nas dimensões das ampolas introduzem incertezas nas correntes medidas da ordem de 0,084% para energia de 60keV e de 0,008% para 1,25MeV [5]. Colocadas em Porta-Amostra de lucite, com parede de 2mm de espessura, que possuem uma rosca interna de fixação ao suporte de alumínio e um disco, na parte inferior, para minimizar as variações geométricas no posicionamento da amostra no poço da câmara.

A Figura 3.2 fornece vistas em corte da amostra e suportes:

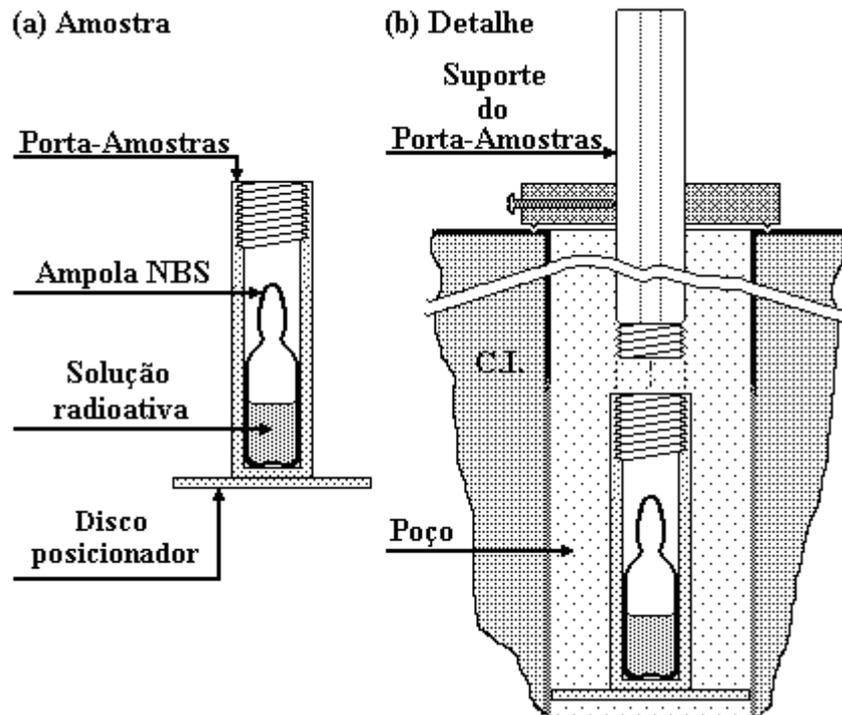


Figura 3.2 Amostras radioativas e seu posicionamento na câmara

(a) Ampola e Porta-Amostra;

(b) Detalhe de posicionamento do conjunto (Porta-Amostra/Suporte) na Câmara de Ionização.

As fontes utilizadas neste trabalho encontram-se na Tabela 3.1 (à próxima página). As atividades e os fatores de calibração foram medidos pelo LMN (horários de referência de Brasília). Os fatores de calibração do ^{18}F e do ^{153}Sm foram obtidos neste trabalho (itens 3.5.5, 3.5.6, 4.5 e 4.6). Na seqüência, apresentam-se os esquemas de decaimento simplificados, com as emissões ou transições mais significativas à formação da corrente de ionização da câmara.

Tabela 3.1 - Fontes Radioativas

Nuclídeo	Identificação Ou número	Meia-Vida	Atividade (MBq)	DATA Hora (Bra)	Fator de Calibração
^{18}F	Intercomparação NPL [30]	$1,8290 \pm 0,0005$ horas [31]	$1,712 \pm 0,010$	11/04/2001 16:49:00	$7,978 \times 10^{-8} \pm 0,87\%$ (1)
^{60}Co	Monitor 37036	$5,271 \pm 0,002$ anos [31]	$1,826 \pm 0,011$ 1,150	11/11/1981 01/04/1991	$16,68 \times 10^{-8} \pm 0,32\%$ (2)
^{137}Cs	"Check Source" P-6	anos [31]	9,250 (3) 62,9 (3)	09/08/2001 09/08/2001	$4,234 \times 10^{-8} \pm 1,00\%$ (2)
^{153}Sm	A B	$46,285 \pm 0,004$ horas [32]	- $101,67 \pm 0,27$	- 29/08/2001	$5,792 \times 10^{-9} \pm 0,77\%$ (1)

(1) determinado neste trabalho; (2) determinado em trabalho anterior [33]; (3) valores medidos aproximados.

O ^{18}F decai por emissão β^+ e por captura eletrônica (CE) para o nível fundamental do ^{18}O :

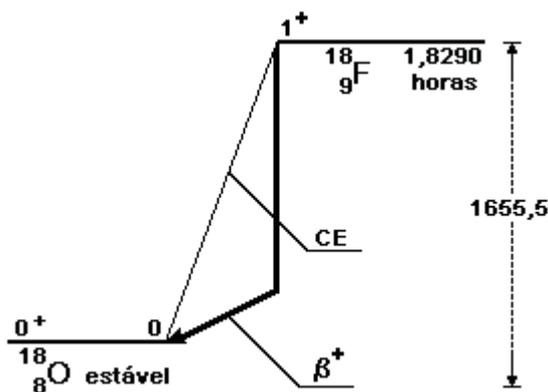


Figura 3.3 - Esquema de decaimento simplificado do ^{18}F

Tabela 3.2 [31]

Principais transições do decaimento do ^{18}F

Emissão	Energia (keV)	Intensidade (%)
β^+	máx.: $633,5 \pm 0,6$ média.: $249,3 \pm 0,3$	$96,80 \pm 0,20$
CE	$1655,5 \pm 0,6$	$3,20 \pm 0,20$
γ	$511,003 \pm 0,002$	$193,60 \pm 0,40$

O decaimento do ^{60}Co ocorre por emissão β^- aos níveis excitados do ^{60}Ni que, através de emissões γ ou por conversão interna, decai ao seu nível fundamental. Somente o ramo de emissão β^- mais provável está representado na Figura 3.4 (à página seguinte), com as subseqüentes transições γ mais intensas.

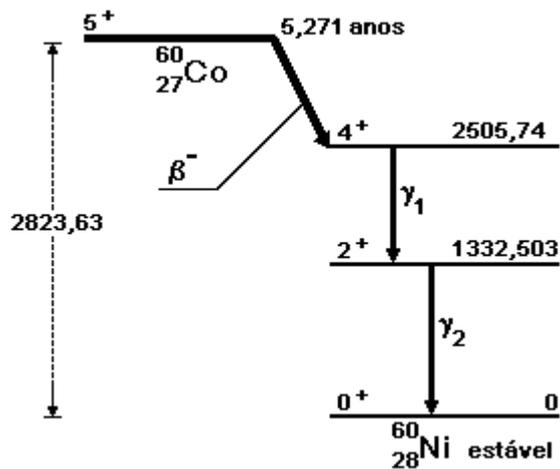


Figura 3.4 - Esquema de decaimento simplificado do ^{60}Co

Tabela 3.3 [31]

Principais transições do decaimento do ^{60}Co

Emissão	Energia (keV)	Intensidade (%)
β^-	máx.: $317,89 \pm 0,11$ média.: $95,81 \pm 0,10$	$99,92 \pm 0,03$
γ_1	$1173,239 \pm 0,004$	$99,91 \pm 0,02$
γ_2	$1332,503 \pm 0,005$	$99,9989 \pm 0,0006$

O ^{137}Cs emite partículas β^- , decaindo para o $^{137\text{m}}\text{Ba}$ ou para o ^{137}Ba . O decaimento para o bário metaestável ocorre em, aproximadamente, 95% dos casos, seguido de emissão γ ou conversão interna (com menor intensidade).

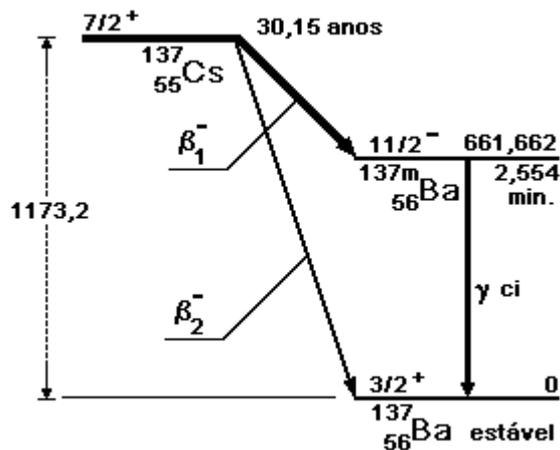


Figura 3.5 - Esquema de decaimento simplificado do ^{137}Cs

Tabela 3.4 [31]

Principais transições do decaimento do ^{137}Cs

Emissão	Energia (keV)	Intensidade (%)
β_1^-	máx.: $511,5 \pm 0,9$ média.: $174,0 \pm 0,3$	$94,6 \pm 0,3$
β_2^-	máx.: $1173,2 \pm 0,9$ média.: $415,0 \pm 0,3$	$5,4 \pm 0,3$
γ	$661,660 \pm 0,003$	$85,2 \pm 0,2$
ci_K	$624,213 \pm 0,003$	$7,60 \pm 0,10$

O ^{153}Sm decai por emissão β^- a níveis excitados ou, diretamente, ao estado fundamental do ^{153}Eu . Este último, quando em níveis excitados, decai ao seu nível fundamental, através de transições γ , como mostra a Figura 3.6.

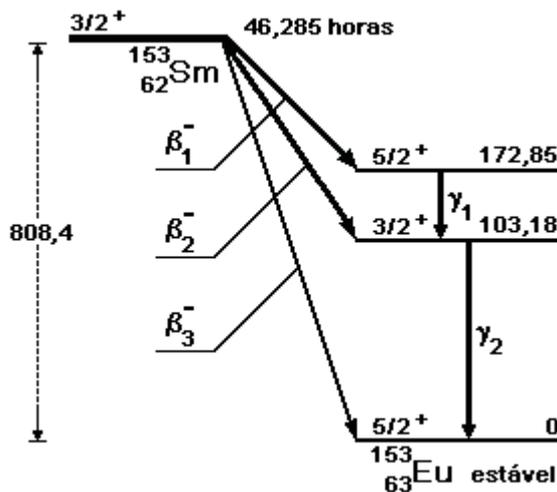


Tabela 3.5 [32]

Principais transições do decaimento do ^{153}Sm

Emissão	Energia (keV)	Intensidade (%)
β_1^-	máx.: 635,55	34,7
β_2^-	máx.: 705,22	43,8
β_3^-	máx.: 808,4	20,7
γ_1	69,67	$4,67 \pm 0,05$
γ_2	103,18	$28,5 \pm 0,5$

Figura 3.6 - Esquema de decaimento simplificado do ^{153}Sm

3.1.2 Câmara de Ionização

A câmara de ionização utilizada é do tipo poço, fabricada pela 20th Century Electronics Ltd., Mod. IG12/A20, operando com argônio à pressão de 20 atmosferas. As ampolas de vidro que contêm as soluções radioativas, o suporte de lucite e a estrutura metálica do poço da IG12/A20 blindam as partículas α ou β e, dessa forma, somente os fótons contribuem com a corrente de ionização (a IG12/A20 é própria para medida de soluções radioativas, em geometria $4\pi-\gamma$). Entretanto, a corrente de ionização da câmara não é produzida somente por emissões γ . Outras emissões ocasionam ionização no gás, mesmo que de forma indireta. Assim, o esquema de decaimento de cada nuclídeo evidencia as principais emissões e respectivas energias, informações que auxiliam na compreensão de como é produzida a corrente de ionização.

Considerando-se os esquemas da Figuras 3.3 a 3.6, pode-se afirmar que todos os nuclídeos utilizados são emissores β . A desaceleração dessas partículas produz fótons (radiação de freiamto - Bremsstrahlung) que interagem no volume sensível, como as emissões γ . Da mesma forma, ocorre com elétrons de conversão (como no caso do ^{137m}Ba , produto do ^{137}Cs). No caso do ^{18}F , emissor β^+ , além de Bremsstrahlung, ocorrem dois gamas de aniquilação do par pósitron/elétron que também contribuem com a formação da corrente. Ainda, toda ionização é seguida de rearranjo eletrônico e conseqüente emissão de fótons X característicos que podem interagir na região sensível do detector. Portanto, todo e qualquer fóton, produzido direta ou indiretamente no decaimento e com energia suficiente para alcançar o volume sensível do detector, pode contribuir para a formação do sinal.

A Figura 3.7 esquematiza a câmara IG12/A20, seu sistema de sustentação, blindagem de chumbo (para atenuação de BG) e suas conexões (A.T. e sinal).

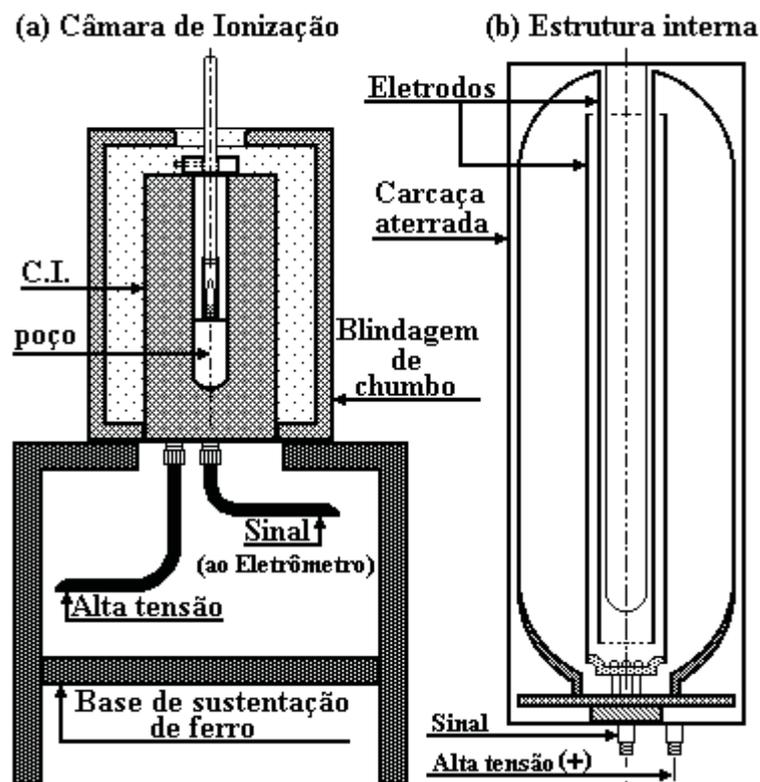


Figura 3.7 Câmara de Ionização IG12/A20

- (a) Câmara, blindagem de chumbo, suporte e conexões;
- (b) Detalhe da estrutura interna.

As principais características da IG12/A20 são [29]:

Dimensões (mm)

- Diâmetro máximo: 184,2;
- Comprimento (sem incluir terminais): 427,0;
- Profundidade do poço: 319,0;
- Diâmetro interno do poço: 50,8.

Estrutura:

- Corpo: aço inoxidável;
- Eletrodos: alumínio;
- Isolação: alumina.

Operacionais:

- Impedância de saída do sinal: $>10^{14} \Omega$;
- Impedância do Eletrodo de Alta Tensão: $>10^{10} \Omega$;
- Tensão de operação: 200 a 2000V.

A polarização da câmara (1500V positivos) foi obtida com uma fonte de alta tensão, modelo 6515A, fabricada pela Hewlett Packard. A tensão pode ser ajustada entre 0V e 1800V, com polaridade selecionada através da conexão apropriada de um terminal em curto-circuito. A ondulação medida (“ripple”) foi de, aproximadamente, 0,3% (RMS).

3.1.3 Eletrômetro

O Eletrômetro Digital da Keithley Instruments, Inc, modelo 616, em escalas de medida de carga (integrador de corrente), possui configuração correspondente ao integrador de Miller, visto na seção 2.3.2. Possui diversas escalas de medida (corrente, resistência, tensão e carga). A alta impedância de entrada e a montagem apropriada (com isoladores de teflon, vidro ou porcelana) reduzem fugas de corrente. O alto ganho em tensão possibilita a medidas de altos valores de resistência ôhmica e de baixos valores de tensão, corrente ou carga elétricas. A estabilidade dos componentes eletrônicos empregados confere boa precisão às medidas realizadas. Todas essas propriedades diferenciam um eletrômetro de um multímetro comum.

Em função de medida de carga, as características principais do Keithley 616 são [34]:

- Escalas de medida: 10^{-10} , 10^{-9} , 10^{-8} e 10^{-7} (Coulombs), cargas de 10^{-15} C (por dígito) a 10^{-5} C (fundo escala);
- Seleção automática de polaridade;
- Precisão: (5% da leitura + 0,1% da escala);
- Sensibilidade: Auto, x0,01, x0,1, x1, x10 e x100;
- Impedância de entrada: $> 2 \times 10^{14} \Omega$ (em malha aberta);
- Capacitância de entrada: 20pF;
- Ganho em malha aberta: 50000 (mínimo), 100000 (típico);
- Chave para ajuste de ZERO;
- Visor de 3-1/2 dígitos;
- Sinal de saída: 0 a 2V (com sobre-escala de 100%). Recomendada: 0 a 1V;
- Faixas de operação: 20° C a 30° C; 0% a 70% de umidade relativa.

3.2 Placa de Aquisição de Dados CAD12/32

Uma placa de aquisição de dados multi I/O da Lynx Tecnologia Eletrônica Ltda., modelo CAD12/32, foi utilizada como interface entre o circuito eletrônico desenvolvido (item 3.4.1) e o microcomputador (item 3.3). Possui vários recursos, apresentados a seguir [35]. As abreviações em negrito se referem à Figura 3.8 que resume o texto (próxima página).

Um multiplexador analógico (**MUX**) de 32 canais em modo comum ou 16 canais diferenciais (programável) permite selecionar a entrada analógica cuja tensão será convertida a um valor binário pelo **ADC** (conversor Analógico/Digital). As tensões de referência, de saída do eletrômetro e de alimentação são lidas para registro, controle do sistema ou detecção de falhas.

Através do amplificador de ganho programável (**A**), pode-se selecionar a faixa de leitura de tensão. Neste projeto, a faixa de tensão é programada de 0 a 5V. A saída deste amplificador é aplicada à entrada do **ADC**.

O conversor Analógico/Digital (**ADC**) possui resolução de 12 bits. O sinal analógico de entrada selecionado pelo multiplexador é convertido em informação binária (digital), possibilitando o seu registro ou processamento através do programa.

Um oscilador interno (**Osc.**), controlado a cristal, tem sua frequência de 2MHz dividida por 2000 (pelo Contador 0 do 8253), resultando em uma base de tempo de 1kHz. Esta frequência confere a resolução de 1ms aos tempos de integração medidos (Contadores 1 e 2 do 8253).

A CAD12/32 possui um Contador/Temporizador INTEL 8253 que possui três contadores descendentes (“down-counters”) de 16 bits. Cada contador funciona de maneira independente, podendo ser ligados em cascata, para obter altas contagens ou sinais lógicos de muito baixa frequência. Os contadores (**Cont.0**, **Cont.1** e **Cont.2**) são utilizados da seguinte forma:

- **Cont.0** - Divisor por 2000, para obtenção de 1kHz, a partir da saída de **Osc.** (2MHz);
- **Cont.1** - Contador de Tempo - entrada: 1kHz; saída: um pulso a cada 60000 ms (1min);
- **Cont.2** - Contador de Tempo - conta os pulsos de saída de **Cont.1** (até 64800 min).

Com esta configuração (saída de **Cont.1** ligada à entrada do **Cont.2**), é possível medir tempos de integração de até 45 dias ($3,888 \times 10^9$ ms). O sinal **GATE** do circuito **Discriminador & Lógica** determina o início e o término de integração (seção 3.4.1.3). Através dos conteúdos de **Cont.1** e **Cont.2**, determina-se o tempo de integração.

Duas portas de 8 bits cada, para leitura de sinais digitais permitem a monitoração do sinal de controle do sistema (**GATE**).

Duas portas de saída digital (escrita), totalizando 16 bits, possibilitam a produção dos sinais de controle do sistema (**ZERO's** para os eletrômetros e para o **Gerador de Rampas**, seção 3.4.1.4; seleção da escala de teste; sinais auxiliares para inicialização dos contadores).

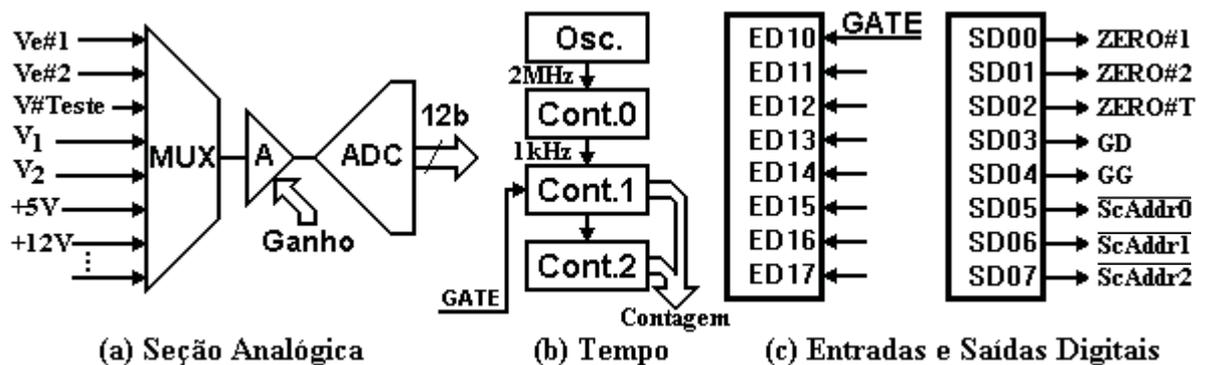


Figura 3.8 - Recursos utilizados da CAD12/32

3.3 Recursos Computacionais

Esta seção lista as ferramentas de informática utilizadas no trabalho (equipamentos e programas). Além de desempenhar a importante função de controle do sistema desenvolvido, estes recursos são indispensáveis à documentação (textos, figuras etc.) e ao processamento ou análise dos dados obtidos (cálculos, gráficos, ajuste de curvas etc.).

O microcomputador utilizado, modelo Pentium, possui a seguinte configuração:

- Frequência de relógio: 166MHz;
- Memória RAM: 16MB;
- Disco rígido de 1,96GB;
- Monitor: SVGA: resolução de 800x600 pontos; resolução de cores de 24 bits;
- Teclado padrão, americano, de 101/102 teclas;
- Impressora matricial de 132 colunas (EPSON LQ-1070);
- Mouse Serial;
- Sistema Operacional: Windows 95.

Os principais programas utilizados no desenvolvimento do sistema foram:

- Rapid-Q, versão Beta (gratuita):
Compilador BASIC para plataforma Windows 9.x - para criar a interface gráfica **ActMASTER S01** e a rotina de controle de aquisição;
- Microsoft Word 97:
Editor de textos - para criar os textos de ajuda do programa ;
- Microsoft Paint:
Editor gráfico "BitMap" - para criar as figuras e ícones da interface gráfica.

3.4 Sistema ActMASTER

A proposta para o desenvolvimento do novo sistema para automatizar as medidas de atividade com as câmaras de ionização do LMN, exigia a utilização de um microcomputador operando em modo multi-tarefa, com a finalidade de otimizar sua utilização, possibilitando executar os programas usuais (aplicativos, editores, planilhas, Internet etc.), durante a aquisição das medidas. Dentre as alternativas, optou-se pelo desenvolvimento de um circuito eletrônico simples, utilizando componentes de baixo custo e desempenho satisfatório. Este módulo permite utilizar os recursos disponíveis na placa de aquisição de dados, possibilitando a elaboração de um programa de controle de aquisição bastante simples.

O programa foi desenvolvido para plataforma Windows, exercendo as funções de interface gráfica, controle de aquisição e de conexão com o programa de determinação de atividades existente.

3.4.1 Circuito Eletrônico ActMASTER H01

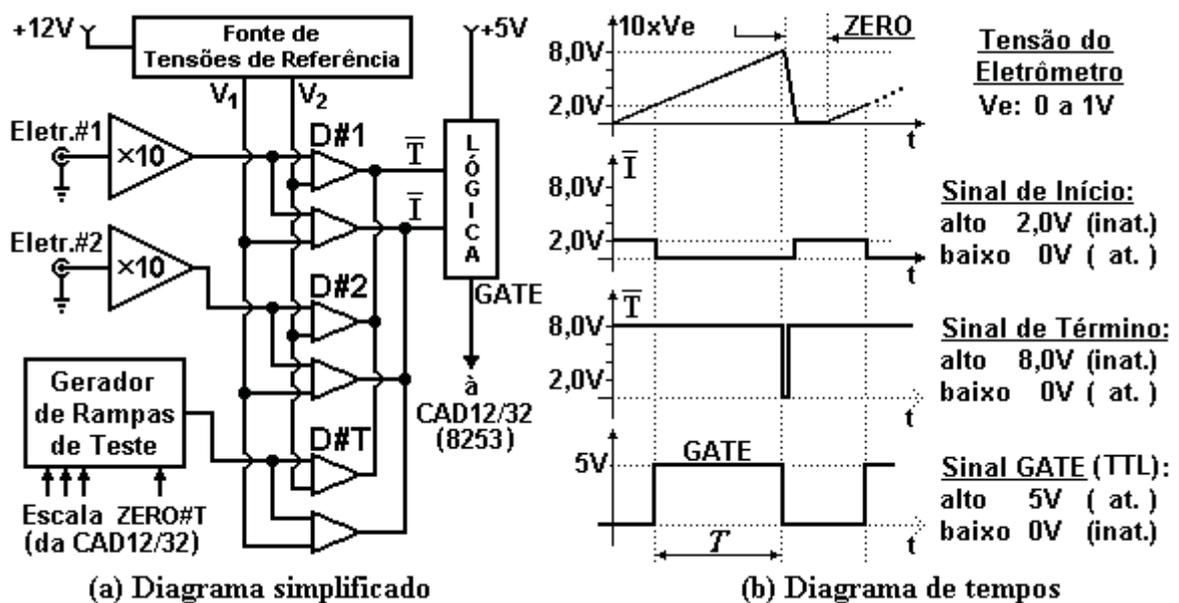


Figura 3.9 - ActMASTER H01: Circuito simplificado

Este módulo eletrônico (Figura 3.9) possui, basicamente, as funções de produzir o sinal lógico que controla a medida do tempo de integração (**GATE**) e de efetuar a interconexão entre os eletrômetros e a placa de aquisição de dados. A contagem de tempo é realizada por contadores da CAD12/32. Nos itens seguintes, descrevem-se as etapas integrantes do **ActMASTER H01**. Os diagramas completos são encontrados no Apêndice, onde também podem ser vistos os desenhos dos painéis do gabinete metálico e outros detalhes do projeto.

3.4.1.1 Fonte de Alimentação

A fonte de alimentação é do tipo convencional, com entrada alternada de 110V ou 220V (selecionada por chave) e saídas contínuas estabilizadas de +12V e +5V, obtidas de dois circuitos integrados reguladores de tensão (LM7812 e LM7805, respectivamente). A tensão de +12V é utilizada para alimentar os circuitos integrados lineares, o regulador LM7805, a **Fonte de Referência** e a chave analógica do **Gerador de Rampas de Teste** (4051, da família CMOS). A tensão de +5V fornece a alimentação dos circuitos integrados lógicos (família TTL).

3.4.1.2 Fonte de Referência

A etapa denominada **Discriminador & Lógica (D&L)**, item 3.4.1.3) utiliza duas tensões de referência, V_1 e V_2 , que constituem os extremos do ciclo de integração da corrente de ionização. Essas tensões são obtidas de um regulador de tensão LM723. Este circuito integrado é de baixo custo e apresenta tensão de saída bastante estável, com variações de 0,1%/1000h [37]. A tensão de entrada deste estágio provém do regulador de +12V. A saída é ajustada em 8,0V, correspondendo à tensão de referência V_2 (também utilizada como referência para a fonte de corrente constante do **Gerador de Rampas de Teste**, item 3.4.1.4). A tensão de referência V_1 (2,0V) é obtida a partir de V_2 , através de um divisor de tensão (v. APÊNDICE, Figura A.1).

Devido à grande estabilidade das tensões V_1 e V_2 , utilizam-se seus valores nominais (2,0V e 8,0V), para efeito de cálculo ($\Delta V = 6,0V$). As tensões do eletrômetro, lidas pelo programa, são aproximadas e registradas apenas para controle (item 3.4.2.4). A incerteza em ΔV foi estimada em $\pm 7mV$, a partir da resolução dos comparadores LM339 ($\pm 5mV$, máximo [37]).

3.4.1.3 Discriminador & Lógica

Esta etapa (**D&L**) produz o sinal **GATE** que controla a contagem do tempo de integração. O circuito simplificado da seção **D&L** pode ser visto na Figura 3.9(a), correspondendo aos pares de comparadores de tensão, **D#1**, **D#2** e **D#T**. Cada par efetua a comparação da tensão de entrada com as tensões de referência V_1 e V_2 , conforme segue:

- **D#1**: discriminador para o Eletrômetro #1 (Arranjo de Medida #1);
- **D#2**: discriminador para o Eletrômetro #2 (Arranjo de Medida #2);
- **D#T**: discriminador para o circuito de Teste (Gerador de Rampas).

Como as tensões de referência são de 2,0V e 8,0V, os sinais de saída dos eletrômetros (na faixa de 0 a 1V) são amplificados por um fator 10 (amplificadores operacionais do tipo LM324). Através desse recurso, consegue-se atenuar problemas de ruído e melhorar a precisão de comparação de tensão.

As saídas dos comparadores LM339 são do tipo *coletor aberto*. Como os sinais são ativos em nível lógico baixo, as saídas de mesma função (limiar V_1 ou V_2) são interligadas, de forma a produzir um único par de sinais (início e término, respectivamente), comum aos três pares de comparadores (apenas o par de comparadores correspondente ao eletrômetro selecionado produz os sinais; os demais pares permanecem inativos, com seus transistores em corte). Para evitar oscilações na comutação, os comparadores foram configurados com histerese.

A Figura 3.9(b) mostra o diagrama de tempos do circuito **D&L**, ora descrito. Desativando-se o sinal de **ZERO** do eletrômetro selecionado (início de aquisição), a corrente de ionização passa a ser integrada e a tensão de saída do eletrômetro (V_e) sobe linearmente. Enquanto a tensão de entrada em **D&L** ($10 \times V_e$) for menor que a referência V_1 , as duas saídas do discriminador permanecem inativas (nível lógico alto). Ao igualar-se a V_1 , a respectiva saída (início) comuta para o nível baixo, ativando o sinal **GATE** (nível alto, padrão TTL; etapa **LÓGICA**) que habilita a contagem de tempo (8253 da CAD12/32). Quando a tensão de entrada em **D&L** atingir o limiar V_2 , a saída do segundo comparador do par é ativada (nível baixo), indicando o término da medida de tempo (**GATE** retorna ao nível lógico baixo, bloqueando a contagem do 8253). Então, o conteúdo binário dos contadores, que corresponde ao tempo de integração T , pode ser lido e registrado pelo programa (v. item 3.4.2.4).

3.4.1.4 Gerador de Rampas de Teste

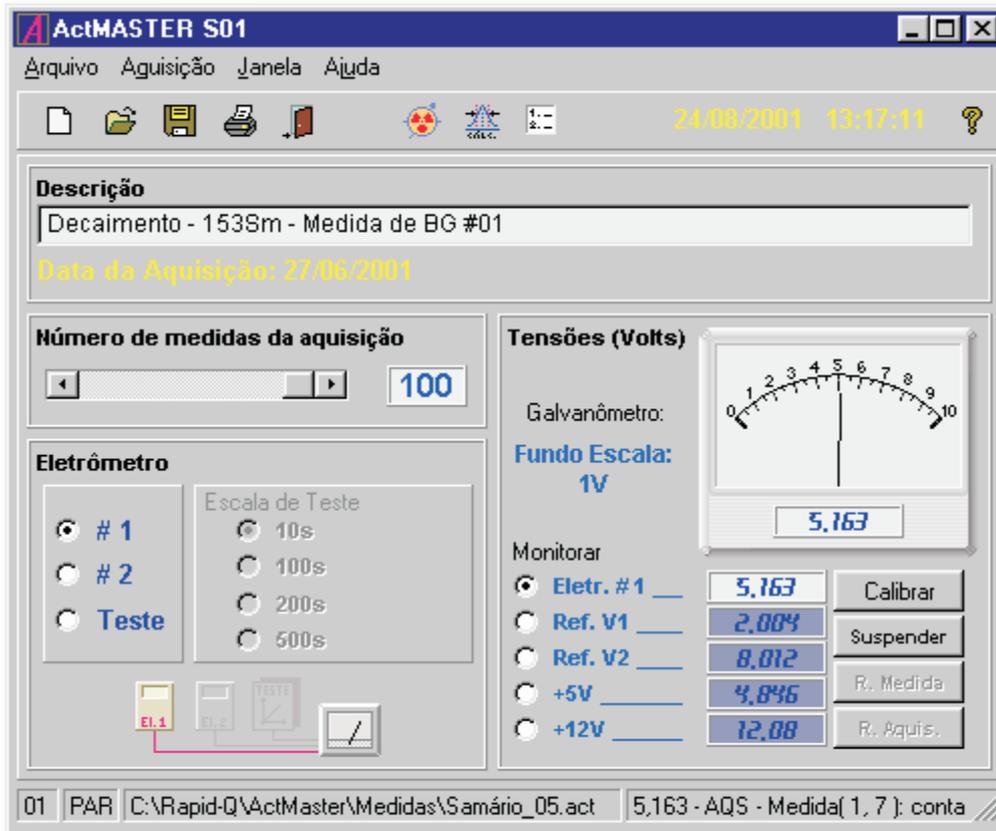
Este estágio permite testar a operação do sistema **ActMASTER**, sem utilizar o arranjo de medidas. O circuito gera rampas de tensão que simulam os sinais de integração fornecidos pelo eletrômetro. É formado por uma fonte de corrente constante que, aplicada a um capacitor, produz uma rampa de tensão.

A tensão de referência da fonte de corrente (8,0V) provém da **Fonte de Referência**. O circuito integrado 4051 opera como chave comutadora, controlada por sinais lógicos da CAD12/32 (de acordo com a escala de Teste selecionada na interface gráfica), de forma a alterar o valor da corrente produzida (e a inclinação da rampa). Das oito escalas possíveis (3 bits de seleção de escala), utilizam-se quatro (10s, 100s, 200s e 500s), calibradas por meio de potenciômetros individuais. O sinal lógico **ZERO#T**, quando em nível lógico alto, mantém o capacitor integrador descarregado (como os sinais **ZERO#1** e **ZERO#2** dos eletrômetros).

3.4.2 Programa ActMASTER S01

O ajuste dos parâmetros da Aquisição, as operações com arquivos e os cálculos matemáticos e estatísticos são executados através do programa **ActMASTER S01**. Especialmente desenvolvido para os sistemas de medidas com câmaras de ionização do **LMN**, este programa foi escrito em uma linguagem derivada do Microsoft Quick BASIC, denominada **Rapid-Q**. Em versão Beta (gratuita), essa ferramenta inclui a maioria dos recursos necessários ao desenvolvimento dos mais variados tipos de programa em plataforma Windows. Assim, o **ActMASTER S01** constitui uma interface gráfica de fácil utilização que executa rotinas que controlam o fluxo da aquisição de dados e a monitoração de sinais do circuito eletrônico.

A interface **ActMASTER S01** pode ser vista na Figura 3.10 (página seguinte). Nas seções subseqüentes, listam-se as principais funções do programa, que podem ser identificadas na Figura 3.10. Finalizando, na seção 3.4.2.4, descrevem-se as etapas da aquisição de dados e o controle executado pelo programa.



(a) Página de Parâmetros



(b) Página de Medidas

Figura 3.10 - Interface gráfica ActMASTER S01

3.4.2.1 Barras de Controle

Agrupam-se sob o título de **Barras de Controle** as ferramentas (botões) que alteram as propriedades da janela e efetuam os comandos de arquivos, aquisição e outros (barras situadas na parte superior da interface: Título, Menu e botões icônicos) e, ainda, a Barra de Status que fornece informações do programa e da aquisição (parte inferior da interface). Todas estas barras são comuns às duas páginas do programa (v. 3.4.2.2 e 3.4.2.3).

A Barra de Título, padrão Windows, possui os botões para, minimizar, restaurar, maximizar ou fechar a janela. Traz o ícone e o título do programa e permite dimensionar e posicionar a janela na tela do monitor de vídeo.

A **Barra de Menu** disponibiliza as operações de arquivo, os comandos de aquisição de dados, seleção de janelas e de auxílio ao usuário. Em alguns casos, ativam-se sub-Menus ou caixas de diálogo (abrir, salvar como etc.) que permitem a entrada de informações, a seleção de alternativas, a confirmação ou cancelamento da ação iniciada. De forma alternativa, algumas das funções da **Barra de Menu** estão disponíveis na **Barra de Ferramentas** (página 45).

A opção de Menu **Arquivo** permite a realização das operações convencionais com arquivos:

- **Novo:** reinicializa (limpa) as variáveis da janela ativa (v. opção **Janela**);
- **Abrir:** Carrega os dados de uma aquisição anteriormente salva, na janela ativa, ativando a *caixa de diálogo de abertura de arquivos* (padrão Windows);
- **Salvar:** armazena em mídia magnética (discos) as informações obtidas na aquisição, em forma de arquivo com nome e destino previamente determinados;
- **Salvar Como:** semelhante à opção **Salvar**, porém abre a *caixa de diálogo de salvar como*, onde é possível determinar o nome do arquivo e a pasta de destino. Esta opção é automaticamente ativada, quando o comando **Salvar** for solicitado para um arquivo ainda sem nome;
- **Imprimir:** imprime um relatório com parâmetros e dados da aquisição (janela ativa);
- **Sair:** permite encerrar o programa (fechar).

A opção de Menu **Aquisição** disponibiliza os comandos de controle de aquisição:

- **Iniciar:** dá início à seqüência de ciclos de medida (integrações da corrente). Os dados obtidos são registrados, nas variáveis do programa e na **Página de Medidas** da janela ativa, possibilitando sua visualização (mesmo durante a aquisição);
- **Suspender:** permite interromper momentaneamente a aquisição, para correção de eventuais problemas. Após sua execução, pode-se cancelar ou reiniciar a aquisição;
- **Cancelar:** após suspensão, a opção **Iniciar** converte-se nesta outra, possibilitando o cancelamento definitivo da aquisição (todos os dados são excluídos);
- **Reiniciar Medida:** reinicia a aquisição, a partir da medida suspensa (preservando as informações obtidas nas medidas anteriores);
- **Reiniciar Aquisição:** exclui todos os dados obtidos até o momento da suspensão, iniciando a aquisição, a partir da medida 1;
- **Cálculos:** conexão com o programa de determinação de atividade que efetua a leitura e o processamento das informações obtidas.

A interface gráfica permite alternar entre doze janelas independentes de aquisição. Ao iniciar o programa, a janela 1 é automaticamente ativa. A seleção (ativação) de uma janela é realizada através da opção de Menu **Janela**. As informações da aquisição são registradas na janela que estiver ativa no instante em que o comando **Iniciar** é acionado. Assim, é possível acessar, em uma mesma seção, os dados referentes a até doze aquisições distintas, como as medidas de uma dada amostra, da fonte de referência e de BG (pertencentes ao mesmo processo de cálculo, item 2.4). Durante a aquisição em uma dada janela, pode-se acessar livremente outras janelas, para visualização, abertura ou salvamento de arquivos e impressão de relatórios. Ao abrir-se um arquivo em uma dada janela, os controles da Página de Parâmetros e as informações da Página de Medidas são atualizados, automaticamente, de acordo com os dados do arquivo. Além das doze janelas, pode-se selecionar, através da opção **Janela**, um editor de textos (semelhante ao Bloco de Notas do Windows, simplificado), permitindo a manipulação de arquivos de dados ou de texto, sem a necessidade de abrir outro programa.

Através da opção de Menu **Ajuda**, o usuário poderá selecionar:

- **Auxílio:** para encontrar informações sobre a utilização da interface;
- **Sobre:** para obter informações sobre versão e autoria do programa.

A **Barra de Ferramentas** é constituída de botões com identificações gráficas (ícones), repetindo algumas das funções já descritas. Ao pousar o cursor do "mouse" sobre os mesmos, surgem descrições abreviadas momentâneas ("hints") das funções que executam. Da esquerda para a direita, os botões são os seguintes:

- **Grupo Arquivo:** Novo, Abrir, Salvar, Imprimir e Sair;
- **Grupo Aquisição:** Iniciar e Cálculos;
- **Seleção de Página:** Alternância entre **Página de Parâmetros** e **de Medidas**;
- **Grupo Ajuda:** Auxílio (interrogação no extremo direito da barra).

Somente o botão de **Seleção de Página** executa função não incluída na **Barra de Menu**, sendo utilizado para mudar de página. O ícone e a descrição abreviada deste botão mudam, conforme a página vigente (de forma a indicar a página complementar).

No espaço compreendido entre os botões de **Seleção de Página** e de **Auxílio**, visualizam-se a data e a hora correntes (importantes para as considerações de decaimento radioativo), nos formatos (dia/mês/ano) e (h:min:s), respectivamente.

A **Barra de Status** fornece as seguintes informações (da esquerda para a direita):

- **Painel 0:** Janela ativa (01 a 12), janela de editor de texto (ED) ou janela de auxílio (Aux);
- **Painel 1:** Página corrente (**Parâmetros:** PAR; **Medidas:** MED);
- **Painel 2:** Nome do arquivo correspondente à janela ativa, incluindo pastas;
- **Painel 3:** Status do programa ou da aquisição.

3.4.2.2 Página de Parâmetros

Ao iniciar o programa esta é a página vigente, Figura 3.10(a), dispondo dos controles que definem a aquisição. Todos os ajustes realizados, através destes controles, são salvos no arquivo de aquisição, juntamente com o resultado das medidas efetuadas (seção 3.4.2.3).

Os controles da **Página de Parâmetros** foram divididos em *Campos*, de forma a facilitar a sua descrição.

O campo **Descrição** permite a incluir informações sobre a amostra medida ou sobre a aquisição, com até 70 caracteres alfanuméricos.

O campo **Número de medidas da aquisição** é constituído de uma barra de rolagem cuja posição determina quantos ciclos de integração serão realizados na aquisição (1 a 100).

Conforme visto no início deste capítulo, o sistema de aquisição permite a utilização de dois arranjos de medida (câmara/eletrômetro). Os eletrômetros são ligados ao sistema, por meio de conexão própria (tipo BNC). O campo **Eletrômetro** da interface gráfica possibilita selecionar o arranjo a ser utilizado na aquisição, através de três botões de opção (#1, #2 e Teste). A opção Teste ativa o circuito **Gerador de Rampas de Teste** (seção 3.4.1.4). Ao selecionar esta última opção, o campo **Escala de Teste** é habilitado, para permitir a escolha do tempo de integração do teste (10, 100, 200 ou 500 segundos).

O campo **Tensões** possibilita a visualização das tensões do sistema: saída do eletrômetro selecionado; referências (V_1 e V_2); alimentação (+5V e +12V). O objetivo principal da visualização ou registro das tensões é a indicação de possíveis falhas no sistema. As tensões mostradas são lidas pela CAD12/32 e convertidas em números binários (ADC). Além de painéis individuais a cada uma das tensões, este campo possui um indicador do tipo analógico (galvanômetro virtual) cuja leitura pode ser selecionada, entre as tensões já mencionadas, através de botões de opção (Monitorar). A escala do galvanômetro é alterada, conforme a tensão selecionada (0 a 10V, para as primeiras quatro; 0 a 20V, para +12V). Durante a aquisição, o programa determina prioridade de leitura à tensão do eletrômetro selecionado. Os painéis referentes às outras quatro tensões mostram os últimos valores lidos, antes de se iniciar a aquisição, tendo sua cor de fundo alterada, do branco para o azul. Dispõe-se, ainda neste campo, de quatro botões de comando. Os três inferiores são uma redundância dos comandos de Menu **Aquisição** (Iniciar/Suspender/Cancelar, Reiniciar Medida e Reiniciar Aquisição). O botão superior (Calibrar), ao ser acionado, executa a seqüência de instruções de programa recomendada pelo fabricante da CAD12/32 [35], para calibrar o sistema interno de leitura analógica. Ao ser iniciada, a interface ActMASTER S01 executa as instruções de calibração. Algumas vezes, porém, valores errôneos de tensão foram apresentados, provavelmente, devido a algum transiente durante a inicialização do programa. Nestes casos, o botão Calibrar permitiu efetuar a calibração do ADC, sem a necessidade de reinicializar o programa.

3.4.2.3 Página de Medidas

A **Página de Medidas**, Figura 3.10(b), corresponde a uma caixa de texto, onde são registradas todas as informações definidas na **Página de Parâmetros** e os resultados da aquisição, permitindo sua visualização e impressão (Relatório de aquisição). Ressalta-se que todas as informações desta página possuem variáveis correspondentes no programa. Durante uma aquisição de dados, as informações da página são constantemente atualizadas, permitindo um acompanhamento das medidas. Para tanto, é necessário que a **Página de Medidas** esteja selecionada e que a janela onde se efetua a aquisição esteja ativa.

A Figura 3.10 apresenta as páginas da interface em sua forma minimizada, não sendo possível visualizar todas as informações da **Página de Medidas**. Abaixo, apresenta-se a reprodução de um trecho com as dez primeiras medidas de uma aquisição de cem medidas:

Relatório de medidas ActMASTER	29/08/2001				
C:\Rapid-Q\ActMaster\Medidas\153SmII-01.act					
Data de Aquisição	29/08/2001				
Eletrômetro	# 1				
Número de medidas	100				
Descrição:					
153Sm II - 1E-9C x1 - 01					
Medida	Início	V1 (V)	Término	V2 (V)	Tempo (s)
1	16:31:38	1,989746	16:31:42	8,105468	3,998
2	16:31:56	2,001953	16:32:00	8,105468	3,995
3	16:32:14	2,026367	16:32:18	8,105468	4,001
4	16:32:32	2,038574	16:32:36	7,983398	3,998
5	16:32:50	2,038574	16:32:54	8,105468	4,003
6	16:33:08	2,050781	16:33:12	8,056640	4,001
7	16:33:26	2,038574	16:33:30	8,093261	4,009
8	16:33:44	2,026367	16:33:48	7,958984	4,009
9	16:34:01	2,050781	16:34:05	8,020019	4,008
10	16:34:19	2,038574	16:34:23	8,117675	3,988

Figura 3.11 - Trecho da Página de Medidas

3.4.2.4 Aquisição de Dados

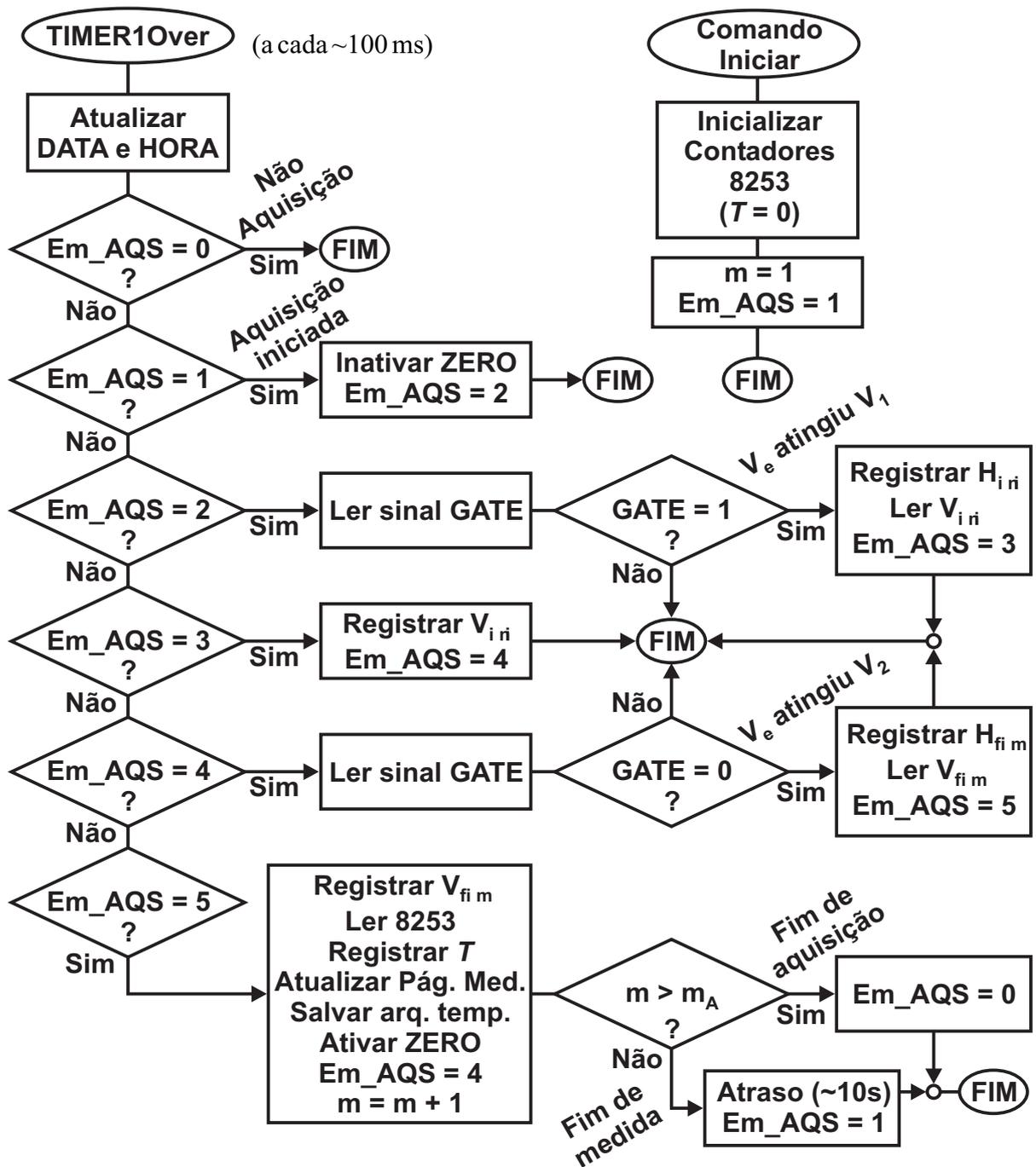
Como descrito no Capítulo 2, uma aquisição consiste em efetuar diversas medidas do tempo de integração da corrente de ionização (T , intervalo de tempo entre dois valores definidos da tensão de saída do eletrômetro, V_1 e V_2). O programa controla a aquisição, alterando os sinais de **ZERO** dos eletrômetros, lendo e registrando variáveis (horas, tensões e tempos de integração). Uma variável auxiliar (Em_AQS), cujo valor indica o status da aquisição, é empregada no processo. Como o sinal **GATE**, produzido na etapa **D&L**, retrata o status da aquisição, a rotina de um temporizador de programa (Timer1) realiza a monitoração contínua do mesmo, em intervalos de 100ms, determinando os instantes em que a tensão do eletrômetro (V_e) atinge os valores de referência. Apesar desse processo não ocorrer em tempo real, não há prejuízo à exatidão da medida, pois $\Delta V = V_2 - V_1$ é obtida a partir de valores de circuito (item 3.4.1.2) e a medida de T é realizada pelo contador 8253 ($\dot{V} = \Delta V/T$ não depende das variáveis de programa).

Ao iniciar o programa, os sinais de **ZERO** são ativados (mantendo nulas as saídas dos eletrômetros) e a variável Em_AQS é inicializada em "0", indicando que a aquisição não foi iniciada. Acionando-se o comando **Iniciar**, os contadores de tempo (8253 da CAD12/32) são inicializados ($T = 0$) e a variável Em_AQS é alterada para "1". A rotina do temporizador (Timer1Over) testa a variável Em_AQS e executa diferentes ações, conforme resumo abaixo:

Valores da variável Em_AQS:

- 0: Não aquisição (eletrômetros em ZERO); definição de parâmetros;
 - 1: Comando **Iniciar** acionado; o programa inativa o sinal **ZERO**;
 - 2: Programa monitora sinal **GATE**, aguardando sua ativação ($V_e = V_1$);
 - 3: Limiar V_1 foi atingido; registrar a tensão lida, V_{ini} (próxima de V_1);
 - 4: Programa monitora sinal **GATE**, aguardando desativação ($V_e = V_2$);
 - 5: Limiar V_2 foi atingido; registrar a tensão lida, V_{fim} (próxima de V_2); fim de medida;
- Ler contadores de tempo; atualizar **Página de Medidas**; salvar arquivo temporário;
- Verificar se o número total de medidas (m_A) foi atingido:
- Não: aguardar descarga do capacitor do eletrômetro; iniciar nova medida;
 - Sim: sinalizar final de aquisição.

As variáveis do programa são indexadas (janela: 1 a 12; medida: 1 a 100). O arquivo temporário, salvo ao final de cada medida, permite a recuperação de dados, caso ocorra travamento do computador. A Figura 3.12 complementa graficamente as informações acima (página seguinte).

**LEGENDA:**

- ZERO:** sinal de controle do eletrômetro selecionado (#1, #2 ou Teste);
H_{ini}: hora inicial da medida (instante em que $V_e = V_1$);
V_{ini}: tensão do eletrômetro no instante H_{ini} (*apenas para controle);
H_{fim}: hora final da medida (instante em que $V_e = V_2$);
V_{fim}: tensão do eletrômetro no instante H_{fim} (*apenas para controle);
m: número da medida corrente;
m_A: número total de medidas da aquisição.

* valores aproximados, para indicar possíveis falhas do sistema

Figura 3.12 - Fluxograma do controle de aquisição

3.5 Medidas de Corrente

Na seção 2.3.3, fizeram-se considerações sobre as fontes de flutuação estatística de uma medida de corrente, pelo método de integração. A incerteza percentual da corrente está associada, basicamente, à taxa de eventos e ao tempo de integração. Entretanto, a ocorrência de possíveis erros sistemáticos pode prejudicar a exatidão final da medida. Todo o sistema, desde a câmara de ionização, contribui com sua parcela de incerteza. Porém, estes ensaios foram realizados com o objetivo de avaliar a influência do sistema **ActMASTER** sobre as medidas obtidas, refletindo, primordialmente, suas características intrínsecas. Pretende-se descrever a metodologia utilizada em cada ensaio, estabelecendo relação com as seções teóricas apresentadas no Capítulo 2. Os resultados e comentários foram deixados para o Capítulo 4.

3.5.1 Patamar e Corrente de Saturação da Câmara de Ionização

Este ensaio foi realizado para ilustrar o efeito da recombinação iônica, determinando a corrente de saturação da câmara e a perda de corrente (seção 2.2.4), com diferentes atividades de amostras radioativas. Medidas deste tipo auxiliaram na determinação de fatores de correção, em casos de medida de atividades mais elevadas, onde o fenômeno da recombinação foi mais significativo.

Utilizando duas fontes de ^{137}Cs , com atividades de 9,25 MBq e 62,90 MBq, realizaram-se medidas de corrente, variando a tensão de polarização da câmara de ionização. As correntes foram determinadas pela média de dez medidas, para cada fonte e para cada valor de tensão. Assim, obtiveram-se dois gráficos de *corrente versus tensão* (um para cada fonte) onde se pode observar as regiões de patamar. Utilizando somente pontos dos patamares, obtiveram-se duas retas, por ajuste linear, a partir das quais foram estimadas as variações percentuais da corrente a cada 100V de polarização. Com os mesmos pontos dos patamares, traçaram-se mais dois gráficos de *corrente versus inverso da tensão de polarização*. Também por ajuste linear, determinaram-se os valores das correntes de saturação (valores teóricos, para coleta iônica total; v. item 2.2.4). Com esses valores, foram obtidas as perdas percentuais, para cada caso, calculadas para a ponto de operação da câmara (1500V).

3.5.2 Determinação da Linearidade do Sistema

A linearidade é uma das características mais importantes de um sistema de medida de correntes de ionização, podendo ser determinada por meio de diversas fontes de diferentes atividades ou de uma única fonte que decai com meia-vida bem conhecida [27]. Em outras palavras, o valor obtido de corrente deve ser proporcional à atividade, em toda faixa de medida. Como visto, alguns dos fatores que influem na linearidade da medida são:

- atividade radioativa da amostra medida (saturação da corrente de ionização; item 2.2.4);
- qualidade do circuito de integração (ganho e impedância de entrada do amplificador; estabilidade e resistência de isolamento do capacitor; itens 2.3.1 e 2.3.2).

Esses fatores estão diretamente relacionados, respectivamente, com a câmara de ionização e o eletrômetro.

O método escolhido para determinar a linearidade do sistema desenvolvido consistiu em medir a corrente de ionização produzida durante o decaimento do ^{153}Sm . Este radionuclídeo é obtido no reator **IEA R1** do **IPEN**, a partir de amostra enriquecida, por reação $^{152}\text{Sm}(n,\gamma)^{153}\text{Sm}$. As amostras (soluções) foram preparadas no **LMN**, utilizando-se ampolas padrões (item 3.1.1).

Foram realizadas 12 aquisições com 100 ciclos de integração com a fonte **A** de ^{153}Sm da Tabela 3.1. Cada aquisição (após as devidas correções) resultou em um valor médio, com a respectiva incerteza. As correções efetuadas foram as seguintes:

- Subtração de BG (valor médio determinado pela média de 100 medidas);
- Correção de decaimento de cada medida, expressão (2.26);
- Correção de decaimento de cada medida ao instante inicial da aquisição para obtenção do valor médio;
- As incertezas em cada ponto foram estimadas pelo desvio padrão da média.

Com os logaritmos naturais dos valores experimentais, efetuou-se um primeiro ajuste linear, através do programa **Linfit** [36]. Multiplicando-se as incertezas de cada ponto pela raiz quadrada do *qui-quadrado reduzido* da regressão, obteve-se uma nova estimativa para as mesmas. Este procedimento foi efetuado para levar em conta possíveis erros sistemáticos não incluídos no desvio padrão obtido.

O ajuste foi repetido, obtendo-se *qui-quadrado reduzido* próximo de 1. O coeficiente de inclinação da reta obtida fornece a constante de decaimento do ^{153}Sm . Com os parâmetros do ajuste, determinaram-se os resíduos (valor experimental menos valor ajustado). A análise dos desvios em cada ponto permite verificar a ocorrência de possíveis tendências e, através de seu desvio padrão, pode-se estimar a linearidade intrínseca do sistema de medida, SCHRADER (1997)²⁷. Resultados e comentários são encontrados no item 4.2.

3.5.3 Estabilidade

Em um período de 71 dias, foram realizadas diversas aquisições de 100 medidas da solução de cobalto Monitor (^{60}Co), mantendo-se inalterada a escala de medida do eletrômetro. Calcularam-se os valores médios de cada aquisição, descontando o valor medido de BG e corrigindo para a data da primeira série de medidas (10 no total). As diferenças percentuais entre as médias de cada série e a média geral são apresentada no item 4.3.

3.5.4 Determinação da Incerteza Intrínseca do Sistema

Este ensaio tem como base a teoria apresentada no item 2.3.3, consistindo em obter os desvios padrões percentuais da corrente medida (constante), em função do tempo de integração. Para conseguir uma corrente de ionização constante, utilizou-se uma fonte de ^{137}Cs , com atividade aproximada de 825 kBq (como a meia-vida deste radionuclídeo é da ordem de 30 anos, a variação da corrente, durante todo o conjunto de medidas, é desprezível). Foram feitas 6 aquisições de 100 medidas cada, com tempos de integração diferentes (aproximadamente, em segundos: 0,5; 1,3; 5; 50; 130; 500). Cada aquisição foi fracionada em subconjuntos de 10 medidas, de forma a determinar (para cada tempo) o valor médio da corrente, o desvio padrão percentual e a incerteza dos desvios. Os pontos obtidos foram colocados em um gráfico de *incertezas versus inverso da raiz quadrada do tempo de integração*. Ajustando-se uma reta aos pontos experimentais, a incerteza intrínseca do sistema de medida foi estimada (item 4.4).

3.5.5 Determinação do Fator de Calibração do ^{18}F

Outro nuclídeo de interesse para o **IPEN** e para a comunidade médica é o ^{18}F , produzido no *Cyclone 30* (ciclotron), a partir de amostra de água enriquecida com ^{18}O , em reação $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$. A amostra de flúor (Tabela 3.1) foi preparada no **LMN**, em ampola padrão, a partir de solução enviada para uma comparação internacional de medida de atividade [30]. O Fator de Calibração para este nuclídeo foi determinado, efetuando-se 3 aquisições de 100 medidas cada:

- (a) Amostra de ^{18}F ; (b) Amostra padrão de ^{60}Co (Monitor); (c) BG.

Com a mesma amostra de flúor, foram feitas mais 30 medidas, em intervalos aproximados de 10 minutos, com o objetivo de também determinar a meia-vida do ^{18}F . Os números finais deste ensaio podem ser vistos na seção 4.5.

3.5.6 Determinação do Fator de Calibração do ^{153}Sm

Utilizando-se a amostra **B** de ^{153}Sm , Tabela 3.1, efetuaram-se 100 medidas para determinar o valor médio da taxa-de-deriva (\dot{V}_x).

Outras 100 medidas da solução de ^{60}Co (Monitor, Tabela 3.1) foram realizadas para determinar a taxa-de-deriva de referência (\dot{V}_M). O Fator de Calibração do ^{60}Co foi determinado em trabalho anterior [29].

Concluindo a série, o valor médio de BG foi determinado através de 16 medidas com tempo de integração aproximado de 3000s.

Os valores líquidos obtidos foram corrigidos para a data e hora de referência da medida absoluta da atividade do ^{153}Sm (em sistema de coincidência $4\pi\beta-\gamma$).

Transpondo-se os valores de A_x e F_x na expressão (2.28), pode-se calcular o Fator de Calibração para o ^{153}Sm , utilizando-se a atividade determinada pela medida absoluta. Os resultados encontram-se no item 4.6.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

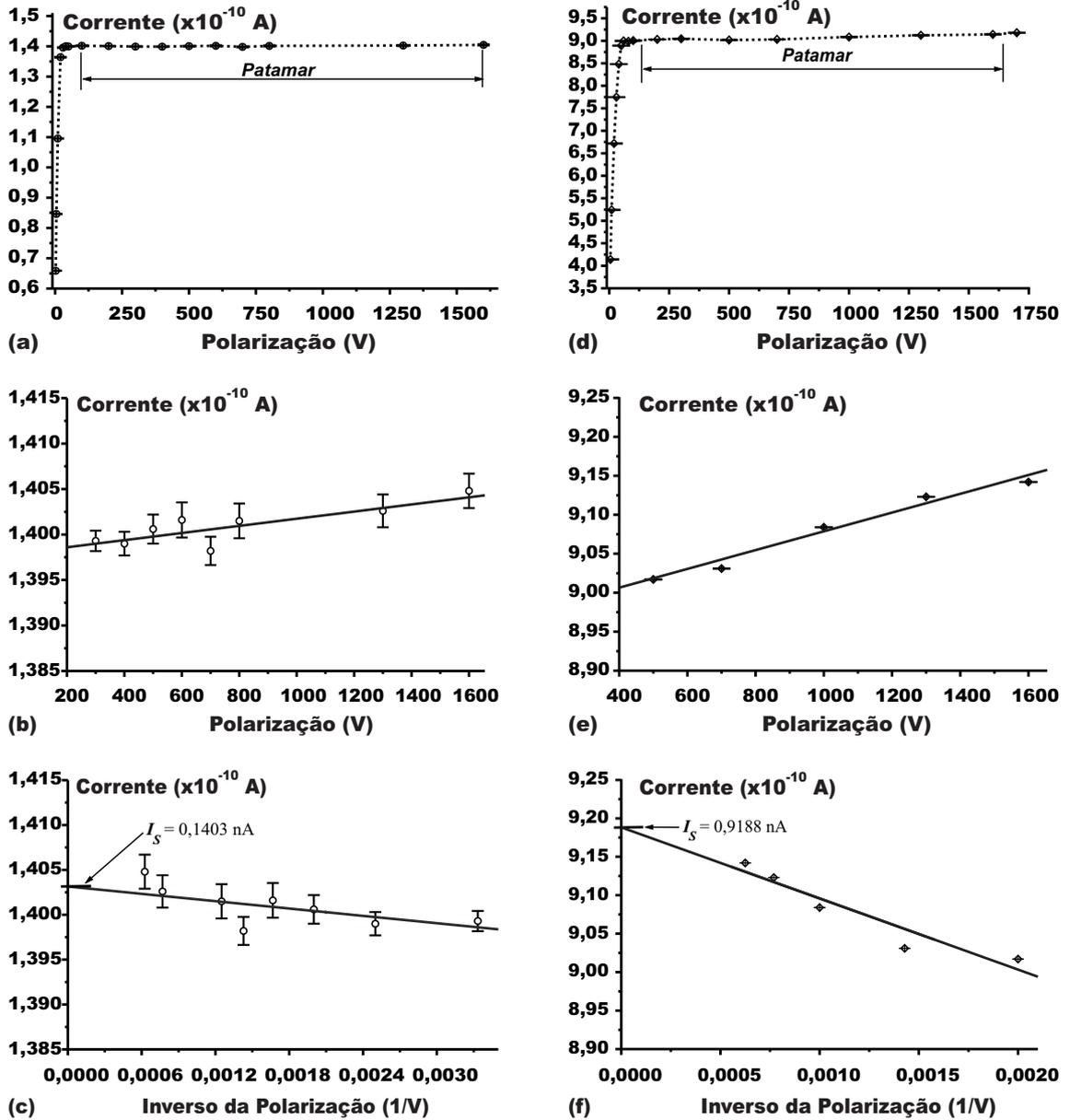
4.1 Patamar e Corrente de Saturação da Câmara de Ionização

A Figura 4.1 apresenta as curvas obtidas de corrente em função da tensão de polarização (ou de seu inverso), para as atividades de 9,25 MBq e 62,9 MBq de ^{137}Cs . Em (a) e (d), as curvas mostram as regiões de patamar. Pode-se visualizar que a curva (a) é mais plana do que (d), pois a atividade no caso (a) é menor (a porcentagem de íons coletados é maior, devido à menor ocorrência de recombinação iônica). As curvas mostradas em (b) e (e) correspondem às regiões de patamar (expandidas), mostrando de forma mais evidente a diferença de inclinação, traduzida pelo parâmetro **B** de cada um dos ajustes lineares ($y = \mathbf{A} + \mathbf{B}x$):

- Ajuste linear dos pontos experimentais da curva (b), obtidos com 9,25 MBq de ^{137}Cs :
Parâmetro A: $(1,398 \pm 0,001) \times 10^{-10} \text{ A}$;
Parâmetro B: $(3,926 \pm 1,053) \times 10^{-16} \text{ A/V}$ ou $(3,926 \pm 1,053) \times 10^{-14} \text{ A/(100V)}$.
- Ajuste linear dos pontos experimentais da curva (e), obtidos com 62,9 MBq de ^{137}Cs :
Parâmetro A: $(8,958 \pm 0,013) \times 10^{-10} \text{ A}$;
Parâmetro B: $(1,204 \pm 0,113) \times 10^{-14} \text{ A/V}$ ou $(1,204 \pm 0,113) \times 10^{-12} \text{ A/(100V)}$.
- Ajuste linear dos pontos experimentais da curva (c), obtidos com 9,25 MBq de ^{137}Cs :
Parâmetro A: $(1,403 \pm 0,001) \times 10^{-10} \text{ A}$, corrente de saturação, I_S ;
Parâmetro B: $(-1,363 \pm 0,611) \times 10^{-10} \text{ V A}$.
- Ajuste linear dos pontos experimentais da curva (f), obtidos com 62,9 MBq de ^{137}Cs :
Parâmetro A: $(9,188 \pm 0,019) \times 10^{-10} \text{ A}$, corrente de saturação, I_S ;
Parâmetro B: $(-92,56 \pm 16,09) \times 10^{-10} \text{ V A}$.

As curvas (c) e (f) correspondem a (b) e (e), respectivamente, com a diferença de que o eixo das abcissas mostram o valor inverso da tensão de polarização. Estas curvas são usadas para determinar as correntes saturação [27] (item 2.2.4).

Observa-se que inclinação **B** do caso (e) é cerca de 30 vezes maior do que a do caso (b).



Linhas sólidas: ajustes lineares.

Figura 4.1 - Curvas de corrente em função da tensão de polarização

(a), (b) e (c): obtidas com 9,25 MBq de ^{137}Cs ;

(d), (e) e (f): obtidas com 62,5 MBq de ^{137}Cs .

Dividindo-se as variações por 100V, das curvas (b) e (e), pelos respectivos valores na tensão de operação e multiplicando-se por 100, obtêm-se as variações percentuais por 100V:

- **0,028%, em 9,25 MBq;**
- **0,132%, em 62,9 MBq.**

As perdas percentuais por recombinação iônica, para a tensão de operação (1500V), podem ser determinadas através da expressão (2.9) da seção 2.2.4:

- **0,07%, em 9,25 MBq;**
- **0,68%, em 62,9 MBq.**

Esses resultados são satisfatórios. Para corrente da ordem de 1nA, a inclinação é da ordem de 0,1% a cada 100V, sendo a perda de 0,7% em 1500V. Nas rotinas de calibração do LMN, dificilmente encontram-se correntes nessa faixa e, em caso de necessidade, pode-se realizar análise semelhante, para estimar as perdas por recombinação. Por meio dos dados ajustados, foram obtidas as curvas de perda em função da corrente, parametrizadas em tensão, COLMENARES (1974) apud [SCHRADER (1997)²⁷, KNOLL (1989)¹]. Essas curvas foram aproximadas, supondo-se que a perda cresce linearmente entre as duas correntes medidas (0,14 e 0,92 nA). Em primeiro lugar, calcularam-se as correntes para as tensões de 1300, 1500 (tensão normal de operação) e 1700 Volts, a partir das curvas ajustadas, (c) para as correntes de ~0,14 nA e (f) para as correntes de ~0,92 nA. Em seguida, para cada corrente, obtiveram-se as perdas, pela expressão (2.9), utilizando-se os valores de corrente de saturação. Finalmente, para cada uma das tensões, obtiveram-se as equações da reta de perdas. A tabela e o gráfico abaixo sintetizam os resultados, constituindo uma base para a estimativa das perdas da câmara IG12/A20.

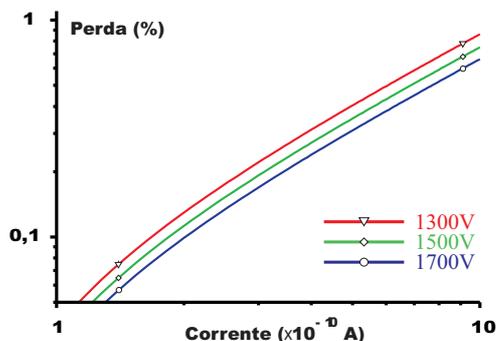


Figura 4.2 - Perdas por recombinação em função da corrente

Tabela 4.1 - Perda percentual de corrente

		0,14	0,92	Corr. (nA)
P	1300	0,075	0,780	
A (V)	1500	0,065	0,680	<i>Perda (%)</i>
R.	1700	0,057	0,600	

4.2 Linearidade do Sistema

Os resultados finais das 12 séries de medidas descritas na seção 3.5.2 estão sintetizados na Tabela 4.2. Na primeira coluna encontram-se os instantes iniciais de cada aquisição (início da primeira medida: 09:06:09 h, do dia 26/06/2001). A segunda coluna mostra os logaritmos naturais das taxas-de-deriva de tensão corrigidas (3.5.2). No primeiro ajuste dos pontos experimentais, efetuado com o programa **Linfit**, utilizou-se incerteza A (Tabela 4.2, quarta coluna, obtida a partir dos desvios padrões das médias de cada aquisição). O *qui-quadrado reduzido* resultante desse ajuste foi de $\sim 3,13$, indicando que as incertezas em cada ponto foram subestimadas. Embora o cálculo de incertezas tenha considerado a propagação do desvio padrão do BG, a flutuação deste último, durante as medidas, pode aumentar o nível de incertezas. Além disso, podem ter ocorrido outras flutuações de longo prazo (variações nos componentes, além do próprio BG), já que as medidas foram realizadas em dias consecutivos. Dessa forma, incerteza B (Tabela 4.2, terceira coluna) foi obtida, multiplicando-se os valores originais (A) pela raiz quadrada do *qui-quadrado reduzido* do primeiro ajuste. A segunda regressão, realizada com as incertezas reavaliadas (B), resultou em *qui-quadrado reduzido* próximo da unidade.

Tabela 4.2 - Resultados finais do decaimento do ^{153}Sm

t (h)	$\ln(\dot{V})$	incerteza B (%)	incerteza A (%)
9,103	-1,04462	0,032	0,018
14,477	-1,12505	0,036	0,020
16,146	-1,15006	0,030	0,017
33,691	-1,41322	0,030	0,017
35,228	-1,43578	0,027	0,015
39,001	-1,49276	0,024	0,014
40,541	-1,51571	0,021	0,012
57,479	-1,76915	0,021	0,012
62,313	-1,84091	0,018	0,010
64,951	-1,88063	0,018	0,010
81,459	-2,12735	0,015	0,009
87,387	-2,21575	0,016	0,009

Os parâmetros do segundo ajuste ($y = A + Bx$; y : valores dos logaritmos; x : tempo) e as incertezas associadas foram os seguintes:

Tabela 4.3 - Parâmetros ajustados para o ^{153}Sm

	Parâmetro	incerteza
A	$- 9,0877 \times 10^{-1}$	$2,1 \times 10^{-4}$
B	$- 1,49613 \times 10^{-2}$	$4,0 \times 10^{-6}$

Qui-quadrado reduzido: 0,999974.

Sabendo-se que $\lambda = - B$, constante de decaimento do ^{153}Sm , calcula-se a meia-vida do radionuclídeo, pela expressão (2.3), comparando-se com valor obtido na literatura:

- $T_{1/2} = 46,329 \pm 0,012 \text{ h}$;
- $T_{1/2} = 46,285 \pm 0,004 \text{ h}$, valor da literatura [32].

Considerando-se que o período de medida foi inferior a duas meias-vidas, a diferença entre o valor encontrado e o da literatura, da ordem de 0,1%, pode ser considerada aceitável.

Outra análise importante, consiste em calcular os pontos ajustados (através dos parâmetros **A** e **B**, transcritos acima), obtendo-se os resíduos (item 3.5.2). Como já mencionado, o desvio padrão dos resíduos fornece uma estimativa da linearidade do sistema de medida. O valor obtido foi da ordem de 0,034%, indicando que a linearidade do sistema é melhor do que 0,04%, na faixa de atividades medida.

SCHRADER (1997)²⁷ afirma que, para instrumentos de alta qualidade, resíduos de 0,1% podem ser esperados, em uma faixa de atividades de pelo menos três ordens de magnitude.

A faixa de atividades do presente ensaio é pequena, resultando em uma melhor linearidade. Para as necessidades de medida atuais do **LMN**, não se requer, normalmente, uma faixa muito ampla. Entretanto, como já discutido nas seções 3.5.1 e 4.1, fatores de correção podem ser determinados, caso necessário, para melhorar a precisão e a linearidade dos resultados.

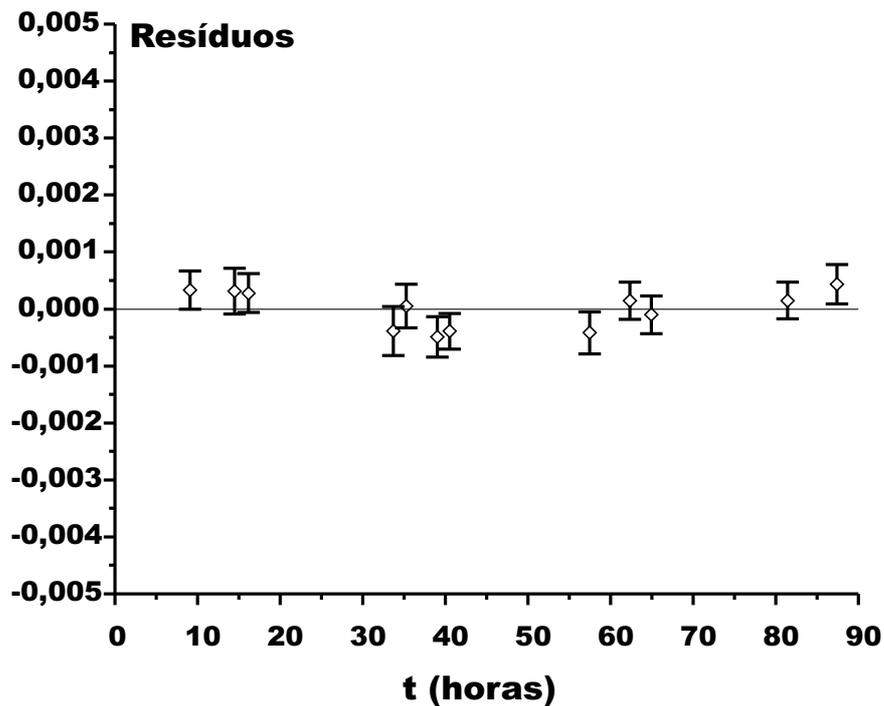


Figura 4.3 - Comportamento dos resíduos das medidas de decaimento do ^{153}Sm ao longo do tempo

4.3 Estabilidade

Na Tabela 4.4, podem ser vistos os resultados das medidas do cobalto Monitor, conforme item 3.5.3. A segunda coluna (t) representa o dia, a partir da data de referência, (onde 26 = 26/06/2001). Os valores da terceira coluna são corrigidos para a data de referência.

O desvio padrão dos resíduos em relação ao valor médio é de 0,32%, indicando boa estabilidade. A amplitude de variação (diferença entre o valor máximo e o valor mínimo, incluindo-se as incertezas), no período de 71 dias, foi de 1,1%, como indicado no gráfico da Figura 4.4, à página seguinte.

Tabela 4.4 - Valores finais das medidas com ^{60}Co Monitor

<i>Dia da medida</i> (2001)	<i>t</i>	\dot{V} (corrigido) (V/s)	<i>incerteza</i> ($\times 10^{-5}$ V/s)	<i>Desvio em relação à Média</i> (resíduo %)
26/06	26	0,079765	3,0	0,349
04/07	34	0,079596	4,5	0,136
13/07	43	0,079100	2,8	- 0,489
17/07	47	0,079519	2,9	0,039
19/07	49	0,079602	2,8	0,143
20/07	50	0,079372	2,4	- 0,146
23/07	53	0,079140	2,9	- 0,438
29/08	90	0,079309	3,0	- 0,225
03/09	95	0,079887	5,4	0,502
05/09	97	0,079591	5,2	0,129

Média: 0,079488

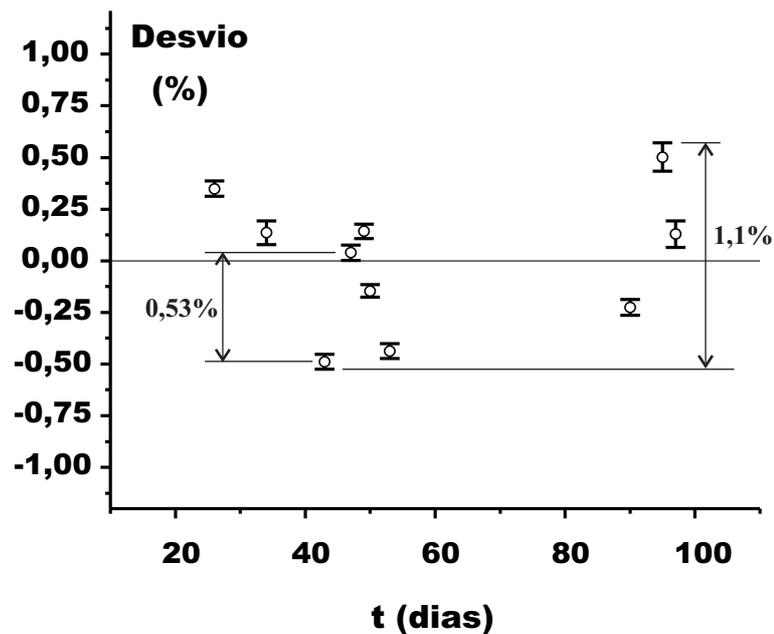


Figura 4.4 - Desvios percentuais em relação ao valor médio
Medidas com uma fonte de 142 kBq de ^{60}Co ;
Período: 26/06/2001 a 05/09/2001.

Observa-se pela Figura 4.4 que a variação máxima de resposta do sistema com o tempo foi de 0,53%, durante um período de 4 dias. Portanto, se a estabilidade requerida for $\geq 0,2\%$, é suficiente medir-se o Monitor apenas uma vez por dia.

4.4 Incerteza Intrínseca do Sistema

Fazendo-se, da equação (2.25), os desvios padrões percentuais (y) na corrente medida, obtidos com atividade constante (r), em função do inverso da raiz quadrada do tempo de integração (x), obteve-se uma reta ajusta aos pontos obtidos (conforme descrição no item 3.5.4). Os dados experimentais encontram-se na Tabela 4.5 e os parâmetros do ajuste linear ($y = A + Bx$) na Tabela 4.6. As mesmas informações são mostradas graficamente na Figura 4.5 (o ajuste linear corresponde à reta sólida).

Tabela 4.5 - Desvios da corrente em função de $t^{-0,5}$

t (s)	$t^{-0,5}$ ($s^{-0,5}$)	desvio (%)	incerteza
496,693	0,04487	0,12	0,020
131,452	0,08722	0,28	0,065
49,274	0,14246	0,57	0,16
4,966	0,44873	1,2	0,26
1,313	0,87264	3,0	0,5
0,492	1,42595	4,2	1,5

Tabela 4.6 - Ajuste dos desvios

	Parâmetro	incerteza
A	-0,0185	0,0180
B	3,22	0,25

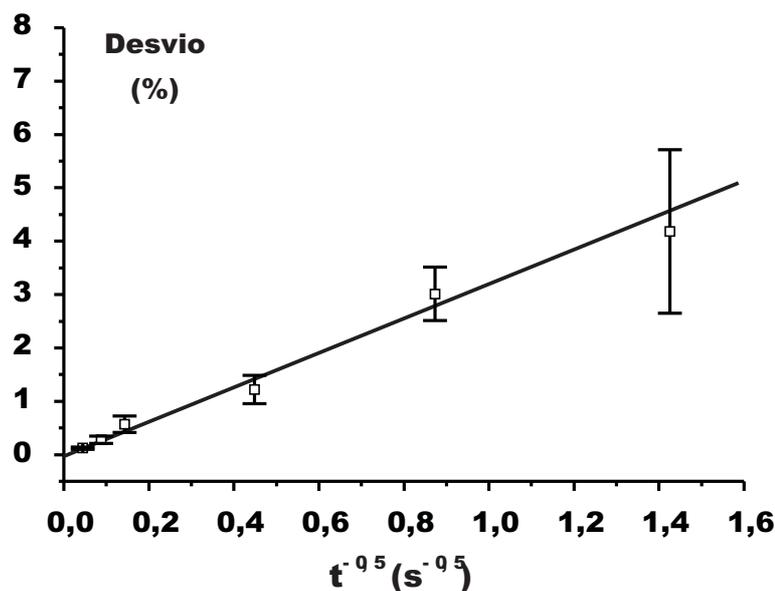


Figura 4.5 - Desvios percentuais de corrente constante versus $t^{-0,5}$

Como esperado, obteve-se uma curva que, na prática, passa pela origem. O parâmetro ajustado **A** indica a incerteza extrapolada para $t^{-0,5} = 0$, ou tempo de integração infinito. O valor obtido (Tabela 4.6), da ordem de $(-0,02 \pm 0.02)\%$, é desprezível, indicando que o erro sistemático não é significativo.

Portanto, chamando de $I_{i\%}$ a incerteza percentual intrínseca do sistema de medida:

$$I_{i\%} \lesssim 0,02$$

SCHRADER (1997)²⁷ apresenta resultados de alguns autores, situados em uma faixa de 0,005% a 0,02%. Ressalta-se que a incerteza da medida também depende da atividade da amostra. A amostra de ^{137}Cs utilizada no ensaio foi a Fonte 37036 da tabela 3.1, seção 3.1.1, com atividade de ~ 825 kBq (seção 3.5.4). Em medidas de atividades mais altas, embora se espere maior perda de corrente por recombinação (seção 4.1), a incerteza relativa deve ser menor, para um mesmo tempo de integração.

4.5 Fator de Calibração do ^{18}F

O Fator de Calibração exprime a eficiência de corrente da câmara, para um dado radionuclídeo, que permite determinar a atividade de uma amostra radioativa. A seguir, apresentam-se os dados finais, obtidos com o ^{18}F , corrigidos para o instante de referência (16:49:00 h de 11/04/2001):

• **Amostra de ^{18}F :**

Atividade: $A_F = (1,712 \pm 0,59\%) \text{ MBq};$
Taxa: $\dot{V}_F = (4,560 \pm 0,075\%) \times 10^{-1} \text{ V s}^{-1}.$

• **Amostra de ^{60}Co Monitor:**

Atividade: $A_M = (142,099 \pm 0,50\%) \text{ kBq};$
Taxa: $\dot{V}_M = (7,913 \pm 0,22\%) \times 10^{-2} \text{ V s}^{-1};$
Fator de Calibração: $F_M = (16,68 \times 10^{-8} \pm 0,32\%) \text{ V s}^{-1} \text{ Bq}^{-1}.$

Portanto, o Fator de Calibração para o ^{18}F resulta:

$$F_F = (7,978 \times 10^{-8} \pm 0,87\%) \text{ V s}^{-1} \text{ Bq}^{-1}$$

Através deste Fator de Calibração, pode-se determinar a eficiência gama da câmara IG12/A20, para a energia de 511 keV (γ de aniquilação da partícula β^+ emitida no decaimento do ^{18}F). É necessário calcular a contribuição de outros fótons originados no decaimento deste radionuclídeo (Bremsstrahlung produzido na desaceleração da partícula β^+ e X característicos decorrentes da Captura Eletrônica), de forma a considerar apenas a energia de 511 keV. A referência [29] contém as informações necessárias ao processo de cálculo. Dessa forma, é possível acrescentar às curvas de eficiência gama, encontradas na referência [29], o ponto correspondente à energia de 511 keV.

A Tabela 4.7 resume as medidas do decaimento da amostra de ^{18}F , a partir das quais se obteve a meia-vida do radionuclídeo. As incertezas foram corrigidas de forma que o valor final do *qui-quadrado reduzido* fosse próximo à unidade (somente os valores finais, utilizados no segundo ajuste, são apresentados. No ajuste inicial, o *qui-quadrado reduzido* foi igual a 1,404).

A constante de decaimento do ^{18}F , em s^{-1} , é representada pelo parâmetro **B** da Tabela 4.8 (a menos do sinal). Calculando-se a meia vida, em horas, compara-se o valor obtido à literatura:

- $T_{1/2} = 1,815 \pm 0,015 \text{ h}$;
- $T_{1/2} = 1,8290 \pm 0,0005 \text{ h}$, valor da literatura [31].

Dentro da incerteza obtida, o valor medido concorda com a literatura.

Tabela 4.7 - Dados finais do decaimento do ^{18}F

t (s)	$\ln(\dot{V})$	incerteza (%)
6772	-0,7273	5,9
7473	-0,7967	5,2
8143	-0,8589	4,7
8814	-0,9280	4,2
9485	-1,0093	3,7
10154	-1,0554	3,5
10824	-1,1197	3,2
11526	-1,1847	2,9
12193	-1,2777	2,6
12861	-1,3507	2,4
13530	-1,4080	2,2
14198	-1,4914	2,0
14881	-1,5620	1,8
15551	-1,6273	1,7
16221	-1,7087	1,6
16891	-1,7476	1,5
17568	-1,8464	1,4
18238	-1,9251	1,3
18909	-2,0219	1,1
19580	-2,0548	1,1
20252	-2,1228	1,0
20924	-2,1463	1,0
21596	-2,2883	0,90
22275	-2,3000	0,89
22948	-2,4328	0,79
23621	-2,5198	0,74
24295	-2,6038	0,69
24971	-2,6392	0,67
25646	-2,6903	0,64
26322	-2,7622	0,61

Tabela 4.8 - Parâmetros do ajuste para o ^{18}F

	Parâmetro	incerteza
A	$1,6 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2}$
B	$-1,0607 \times 10^{-4}$	$8,5 \times 10^{-7}$

Qui-Quadrado Reduzido: 1,0001

Calculando-se os resíduos, obteve-se o gráfico da Figura 4.6. Observa-se que, na região inicial (maiores atividades), as incertezas são maiores, devido aos baixos tempos de integração (~1s). Na faixa central, aproximadamente entre 10 e 20 mil segundos, os pontos estão distribuídos de maneira uniforme. Por fim, para tempos maiores do que 20 mil segundos, a flutuação de BG se faz notar (baixas atividades da amostra). Cada ponto experimental é representado por um único ciclo de integração, resultando em pior estatística (para o ^{153}Sm , cada ponto corresponde a cem ciclos de medida, item 4.6).

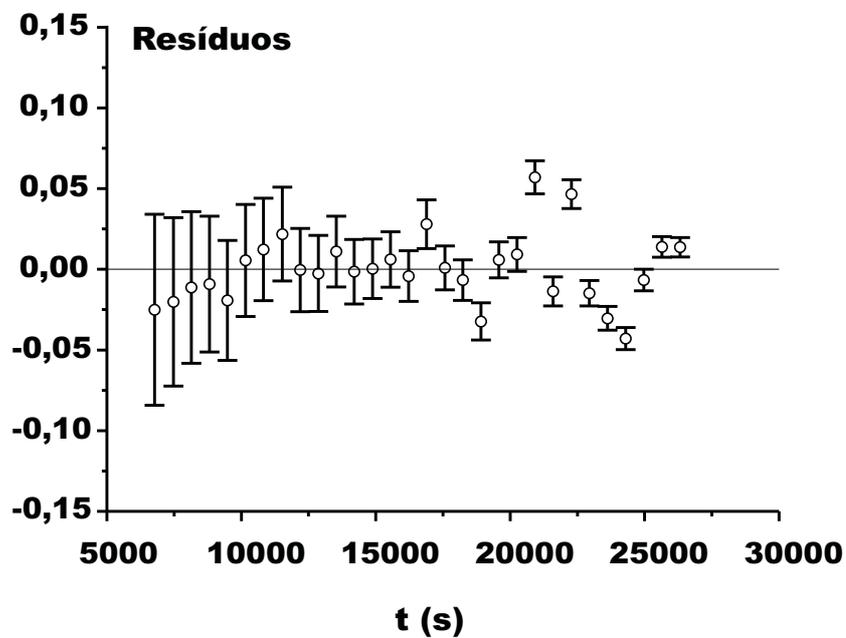


Figura 4.6 - Comportamento dos resíduos das medidas de decaimento do ^{18}F ao longo do tempo

4.6 Fator de Calibração do ^{153}Sm

Os resultados finais deste ensaio são resumidos a seguir. A atividade da amostra de ^{153}Sm foi obtida em sistema absoluto. Para a amostra de ^{60}Co Monitor, calculou-se o decaimento até o instante de referência, a partir das informações da Tabela 3.1. Todos os dados estão corrigidos para o instante de referência (00:00:00 h de 29/08/2001).

• **Amostra B de ^{153}Sm :**

Atividade:	$A_{Sm} = (101,671 \pm 0,27\%) \text{ MBq};$
Taxa:	$\dot{V}_{Sm} = (0,20880 \pm 0,085\%) \text{ V s}^{-1}.$

• **Amostra de ^{60}Co Monitor:**

Atividade:	$A_M = (131,130 \pm 0,60\%) \text{ kBq};$
Taxa:	$\dot{V}_M = (7,99149 \pm 0,24\%) \times 10^{-3} \text{ V s}^{-1};$
Fator de Calibração:	$F_M = (16,68 \times 10^{-8} \pm 0,32\%) \text{ V s}^{-1} \text{ Bq}^{-1}.$

Aplicando estes dados na expressão (2.28), obtém-se o Fator de Calibração para o ^{153}Sm :

$$F_{Sm} = (5,792 \times 10^{-9} \pm 0,77\%) \text{ V s}^{-1} \text{ Bq}^{-1}.$$

O esquema de decaimento do ^{153}Sm é complexo, com várias linhas de transição γ (a Figura 3.6 do Capítulo 3 mostra um esquema simplificado). Por este motivo, a determinação do fator de calibração desse radionuclídeo, por meio da curva de eficiência gama, é trabalhosa. Além disso, é difícil avaliar a contribuição dos demais fótons decorrentes do decaimento (freimento, X característicos etc.). Torna-se evidente a vantagem de se determinar o fator de calibração deste radionuclídeo, pelo método direto, dispondo-se de um sistema de automatização de medida como o apresentado.

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho, desenvolveu-se um sistema de automatização para arranjos de medida de correntes de ionização, utilizados na determinação de atividades de amostras radioativas. O objetivo de substituir o antigo sistema utilizado pelo LMN (semi-automático), foi plenamente alcançado. A principal vantagem do novo sistema reside no emprego de um microcomputador, permitindo executar, de forma simples e integrada, todas as etapas da medida:

- definir parâmetros, através de uma interface gráfica de utilização simples:
selecionar o arranjo de medida; determinar número de ciclos de integração etc.;
- controlar o processo de medida, monitorando e produzindo os sinais apropriados;
- efetuar os cálculos necessários à obtenção dos resultados finais.

As medidas de saturação de corrente revelaram que, para correntes até 0,1 nA, a linearidade da câmara é melhor do que 0,1%. As correntes medidas durante o decaimento de uma amostra de ^{153}Sm resultaram linearidade melhor do que 0,04%.

A estabilidade obtida nas medidas da amostra de ^{60}Co Monitor foi satisfatória, com uma amplitude máxima de 1,1%, em um período de 71 dias. Medidas de BG e de uma amostra de um radionuclídeo de meia-vida longa, cobrindo um período de vários meses, podem ser realizadas para análise de comportamento, limites ou tendências.

Os resultados dos ensaios realizados com amostra de ^{137}Cs , com tempos de integração diferentes, concordam com a teoria descrita no Capítulo 2, mostrando que o sistema não introduz incertezas significativas nas medidas obtidas, além daquelas determinadas pela flutuação inerente aos processos de decaimento radioativo. Entretanto, devem ser considerados os tempos de integração, a atividade da amostra e o número de medidas, fatores que determinam a precisão final. Recomenda-se, em medidas com amostras de baixa atividade ou com tempos de integração pequenos, aumentar o número de medidas, para melhorar a precisão final.

Além das medidas para avaliação do desempenho do sistema, foram efetuadas as determinações dos fatores de calibração da câmara IG12/A20, para o ^{18}F e o ^{153}Sm , utilizando ampolas padrões BIPM/NIST. Com esses fatores, podem-se determinar atividades de amostras desses radionuclídeos, para a mesma geometria, de maneira rápida e com boa exatidão. Além destas medidas, também foram determinadas as meias-vidas destes radionuclídeos, em boa concordância com os valores da literatura.

Este projeto representa a primeira etapa do **LMN**, na área de desenvolvimento de sistemas de automatização de medida. Estão previstos aperfeiçoamentos que podem tornar o processo de medida ainda mais prático e confiável. Utilizando linguagens computacionais mais eficientes, como o C++, será possível elaborar rotinas rápidas, permitindo dispensar parte da eletrônica adicional apresentada neste trabalho.

Como exemplo, é possível a substituição das etapas **D&L** e **Fonte de Referência** por rotinas que efetuem a comparação da tensão do eletrômetro com valores ajustados no programa, produzindo os sinais de controle necessários (**ZERO's**, **GATE**, entre outros). Dessa forma, as tensões de limiar de integração, V_1 e V_2 , poderiam ser selecionadas através da própria interface gráfica, de forma a tornar o processo de medida mais flexível, permitindo adaptá-lo às condições existentes. As possibilidades de ensaios de teste, por exemplo, ficariam ampliadas, com uma maior habilidade para ajustar o tempo de integração. Pretende-se também incluir isolamento óptico entre o módulo eletrônico externo e o computador, de forma a evitar problemas de ruído ou de diferenças de potencial entre terras.

Transdutores de pressão, temperatura e umidade podem ser empregados, de maneira a possibilitar a introdução de correções, relativas a variações dos parâmetros atmosféricos. Este recurso pode ser útil, principalmente em medidas realizadas com câmaras abertas: embora o processo de medida seja relativo (amostra, Monitor e BG são, normalmente, medidos sob mesmas condições), diferenças ambientais podem ocorrer, por exemplo, se as medidas forem realizadas em dias diferentes. No caso, a leitura dos parâmetros ambientais pode ser realizada pelo próprio programa de aquisição e as correções efetuadas, automaticamente, pelo programa de cálculo.

APÊNDICE - Diagramas ActMASTER H01

Neste apêndice encontram-se alguns detalhes do módulo ActMASTER H01. Os diagramas eletrônicos podem ser vistos nas Figuras A.1 a A.3. A Figura A.4 mostra o diagrama de conexão entre o módulo e o cartão de aquisição (CAD12/32). A Figura A.5 mostra, em escala natural, os painéis frontal e traseiro. A Tabela A.1 sintetiza os sinais elétricos do sistema, indicando a sua origem, destino e respectivo posicionamento nas folhas esquemáticas. Para melhor compreensão da notação empregada nas indicações de Origem/Destino, seguem alguns exemplos explicados:

Sinal: +5V;

Origem: CI2(3) - pino 3 de CI2; (F1: D1) - coordenadas D1 da Folha 1 de diagramas;

Destino: CI7, CI8 - alimentação de CI7 e CI8;

Outros exemplos de Origem:

R9/C7/C8 - ponto de junção dos três componentes;

CN3(11) - pino 11 do conector CN3 (da CAD12/32);

P1 - cursor do potenciômetro P1;

Outros exemplos de Destino:

(F3: A1) - ponto de entrada nas coordenadas A1 da Folha 3 de diagramas: ;

CnB(11) - pino 11 do conector CnB (do módulo);

Finalizando, a lista dos componentes à página 76 (numerados conforme folhas esquemáticas).

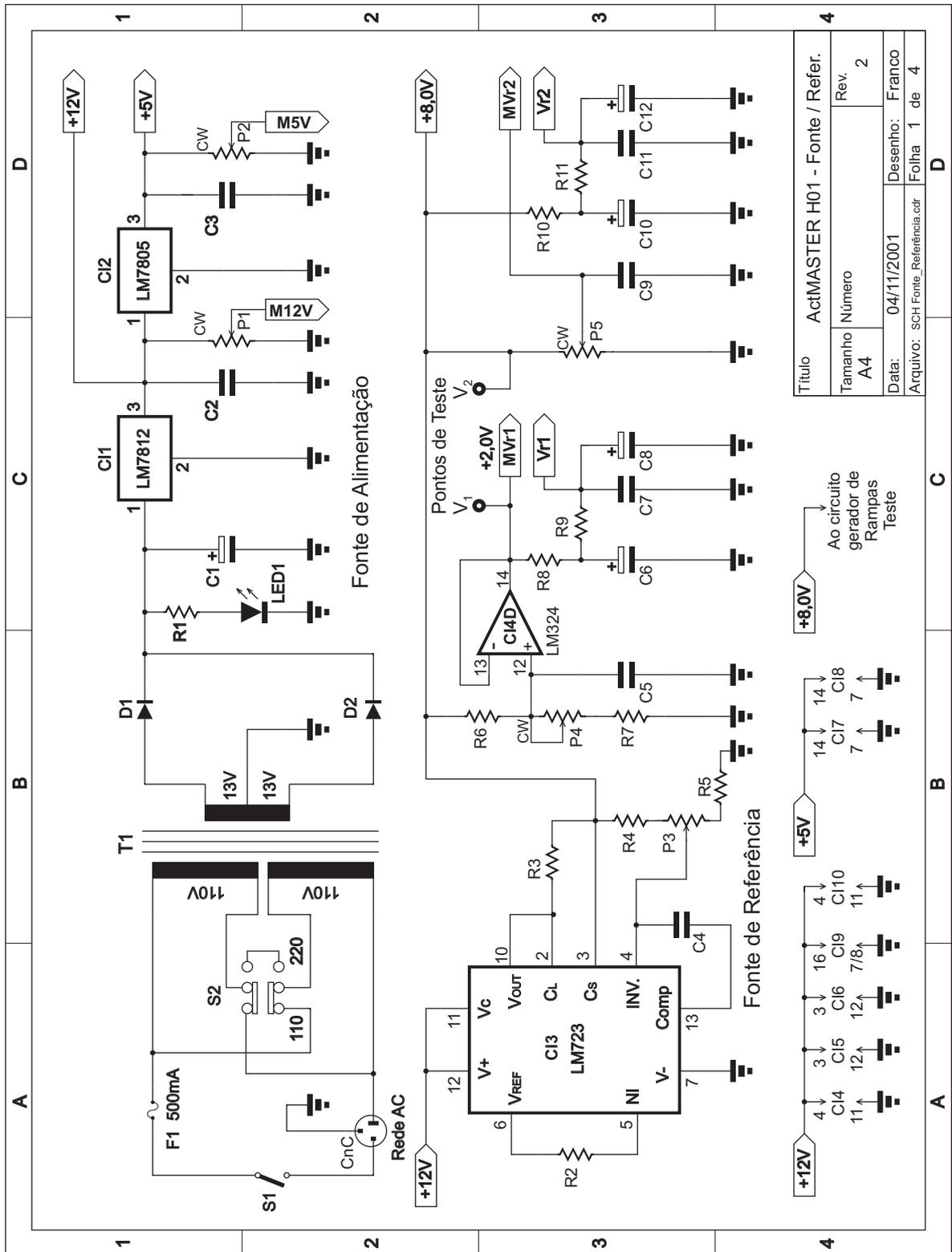
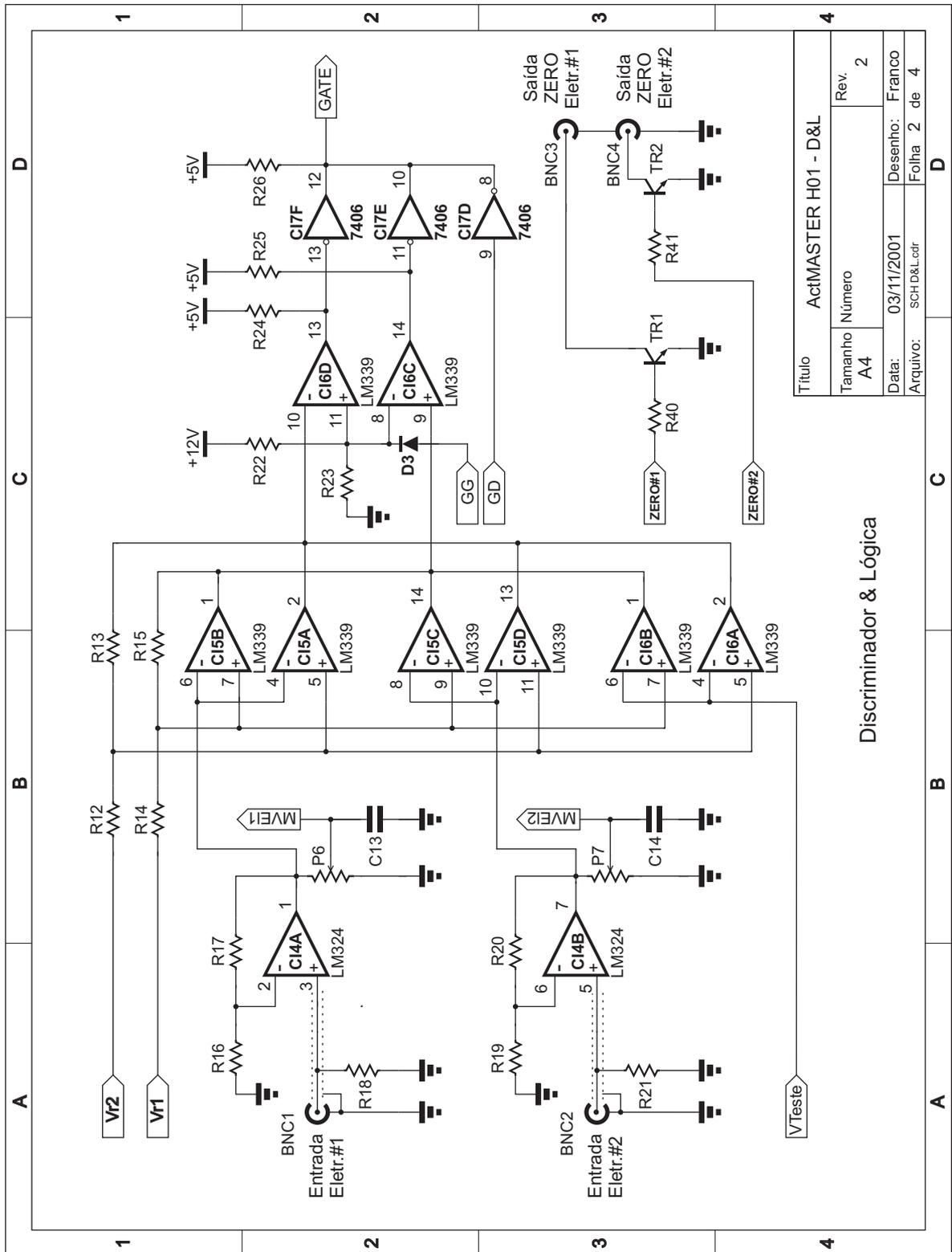


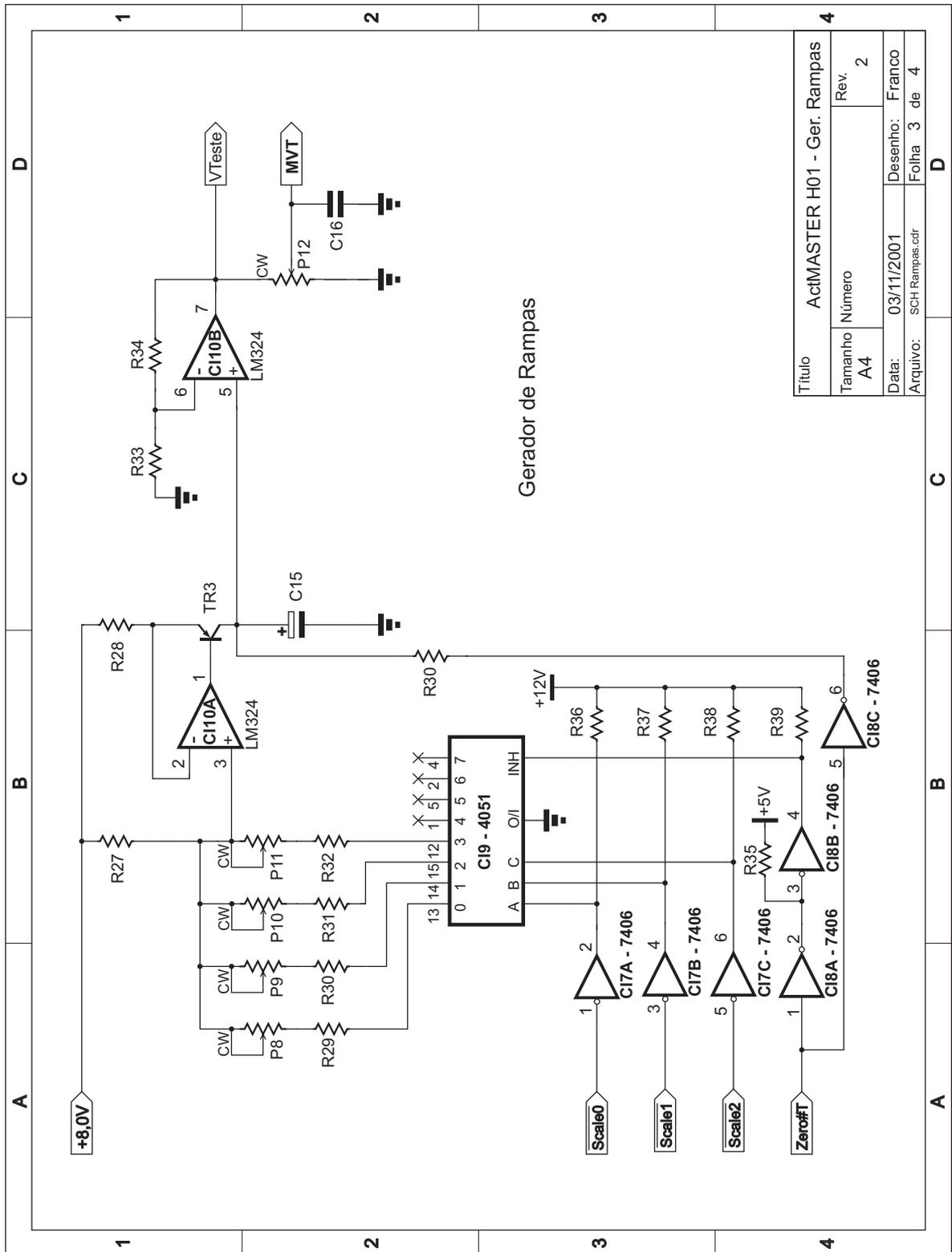
Figura A.1 - Fonte de Alimentação e Fonte de Referência



Título		ActMASTER H01 - D&L	
Tamanho	Número	Rev.	2
A4			
Data:	03/11/2001	Desenho:	Franco
Arquivo:	SCHD&L.cdr	Folha	2 de 4

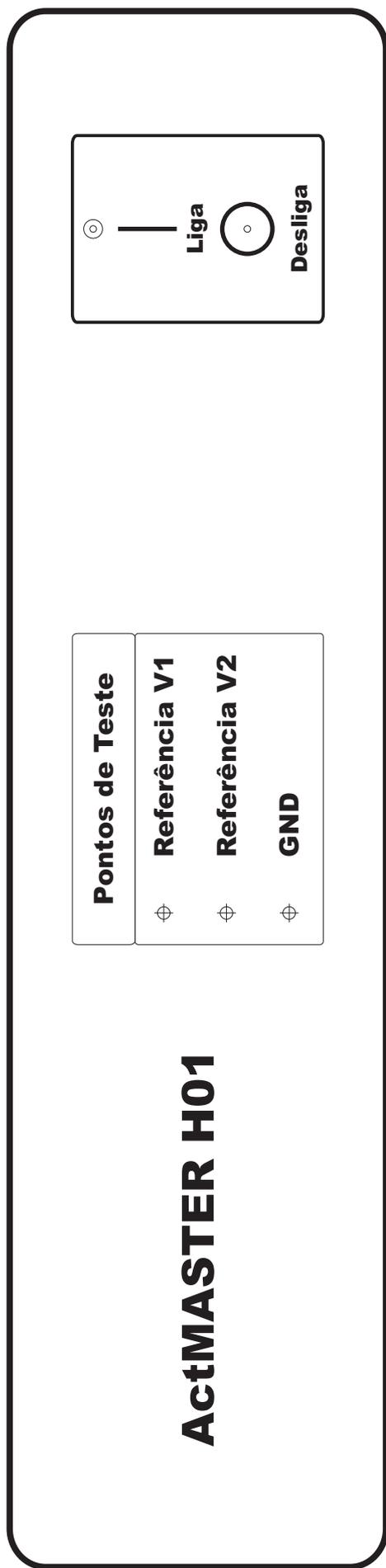
Discriminador & Lógica

Figura A.2 - Discriminador & Lógica

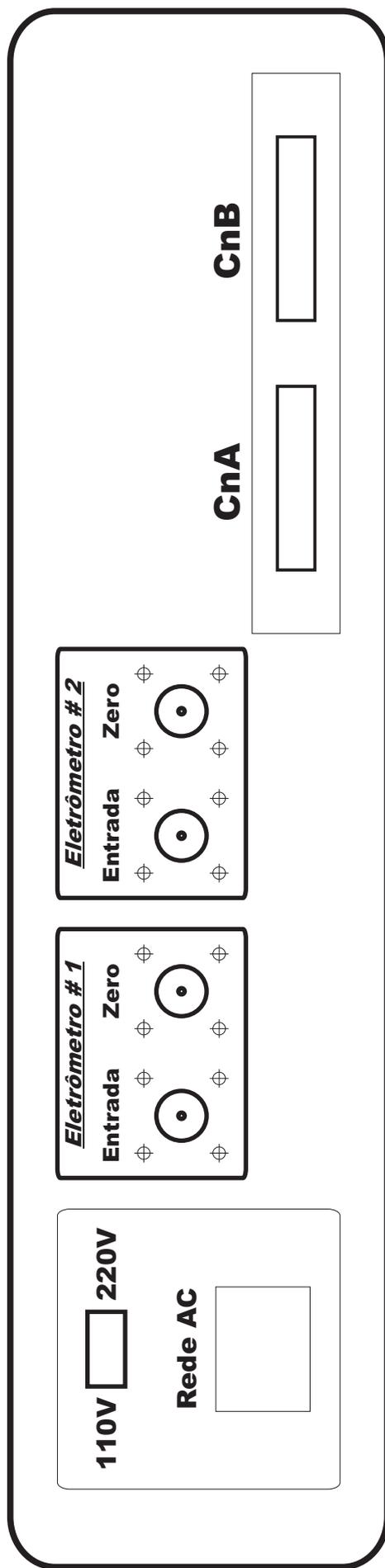


Título	ActMASTER H01 - Ger. Rampas		
Tamanho	Número	Rev.	2
A4			
Data:	03/11/2001		Desenho: Franco
Arquivo:	SCH Rampas.cdr		Folha 3 de 4

Figura A.3 - Gerador de Rampas



(a) Painel frontal



(b) Painel traseiro

Figura A.5 - Painéis do módulo ActMASTER (escala 1:1)

Tabela A.1 - Sinais elétricos do módulo ActMASTER H01

	Nome	Descrição	Origem	Destino
Tensões de Alimentação	+12V	Alimentação Analógica	CI1(3), (F1: C1)	CI4, CI5, CI6, CI9, CI10
	+5V	Alimentação Lógica TTL	CI2(3), (F1: D1)	CI7, CI8
Tensões de Referência	+8,0V	Fonte para V_i e V_j ; referência para gerador de Rampas	CI3(3), (F1: D2)	(F3: A1)
	Vr1	Limiar V_i de integração	R9/C7/C8, (F1: C3)	(F2: A1)
	Vr2	Limiar V_j de integração	R11/CI11/CI12, (F1: D3)	(F2: A1)
Tensões de Monitoração	M12V	Amostra de +12V	P1, (F1: D2)	CnA(12), (F4: A2); CNI(25)
	M5V	Amostra de +5V	P2, (F1: D2)	CnA(13), (F4: A2); CNI(6)
	MVr1	Amostra de Vr1	CI4(14), (F1: C3)	CnA(15), (F4: A2); CNI(5)
	MVr2	Amostra de Vr2	P5/C9, (F1: D3)	CnA(14), (F4: A2); CNI(24)
	MVEI1	Amostra da tensão do Eletrômetro #1	P6/C13, (F1: B2)	CnA(18), (F4: A2); CNI(22)
	MVEI2	Amostra da tensão do Eletrômetro #2	P7/C14, (F2: B3)	CnA(17), (F4: A2); CNI(4)
	MVT	Amostra da tensão de Rampa Teste	P12, (F3: D2)	CnA(16), (F4: A2); CNI(23)
Rampa Teste	VTeste	Tensão de simulação de integração (Rampa Teste)	CI10(7), (F3: D1)	(F2: A4)
Sinais	GATE	Controle da contagem de tempo	CI7(8, 10, 12), (F2: D2)	CNI(1), (F4: B1); CN4(1), (F4: B4)
	ZERO#1	Comando de zero do Eletrômetro #1	CN3(11)	CnB(11), (F4: D2), (F2: C3)
	ZERO#2	Comando de zero do Eletrômetro #2	CN3(12)	CnB(12), (F4: D2), (F2: C4)
	ZERO#T	Comando de zero do gerador de Rampas	CN3(13)	CnB(13), (F4: D2), (F3: A4)
Lógicos	GD	Gate Disable (desabilita GATE durante ZERO)	CN3(14)	CnB(14), (F4: D2), (F2: C3)
	GG	Gate Generator (sinal auxiliar de inicialização do 8253)	CN3(15)	CnB(15), (F4: D2), (F2: C4)
TTL	<u>ScAddr0</u>	Bit 0 de seleção de escala de teste (ativo em zero)	CN3(16)	CnB(16), (F4: D2), (F3: A3)
	<u>ScAddr1</u>	Bit 1 de seleção de escala de teste (ativo em zero)	CN3(17)	CnB(17), (F4: D2), (F3: A3)
	<u>ScAddr2</u>	Bit 2 de seleção de escala de teste (ativo em zero)	CN3(18)	CnB(18), (F4: D2), (F3: A4)

**Para
CAD
12/32**

Da

**CAD
12/32**

LISTA DE COMPONENTES

Circuitos Integrados:			Folha
CI1	LM7812	Regulador de Tensão (12V @ 1A)	1
CI2	LM7805	Regulador de Tensão (5V @ 1A)	1
CI3	LM723	Regulador de Tensão	1
CI4	LM324	Amplificador Operacional Quádruplo	1,2
CI5	LM339	Comparador de Tensão Quádruplo	2
CI6	LM339	Comparador de Tensão Quádruplo	2
CI7	7406	Inversor Lógico Sêxtuplo (TTL)	2,3
CI8	7406	Inversor Lógico Sêxtuplo (TTL)	3
CI9	4051	Multiplexador (8/ 1)/Demultiplexador (1/ 8) (CMOS)	3
CI10	LM324	Amplificador Operacional Quádruplo	3

Transistores:			Folha
TR1	BC547	Bipolar NPN, de uso geral (sinal e chaveamento)	2
TR2	BC547	Bipolar NPN, de uso geral (sinal e chaveamento)	2
TR3	BC557	Bipolar PNP, de uso geral (sinal e chaveamento)	3

Diodos:			Folha
D1	1N4007	Retificador (1000V reversos, 1A de corrente direta)	1
D2	1N4007	Retificador (1000V reversos, 1A de corrente direta)	1
D3	1N4148	Sinal (baixa tensão)	1
LED1	LED	Tipo comum, \varnothing 5mm, vermelho	1

Resistores de carvão (em Ohms; 1/8W; 5% de tolerância - salvo menção contrária):			Folha
R1	2k2, 1/4W		1
R8	39		1
R9	10		1
R10	39		1
R11	10		1
R12	1k		2
R13	1k		2

(continua)

Resistores de carvão (continuação):

	Folha
R14 1k	2
R15 1k	2
R18 100k	2
R21 100k	2
R22 12k	2
R23 1k	2
R24 4k7	2
R25 4k7	2
R26 4k7	2
R35 4k7	3
R36 100k	3
R37 100k	3
R38 100k	3
R39 100k	3
R40 10k	2
R41 10k	2

Resistores de filme metálico (em Ohms; 1/8W; 1% de tolerância - salvo menção contrária):

	Folha
R2 1k00	1
R3 21R5, 1/2W, 5%	1
R4 499	1
R5 10k0	1
R6 8k25	1
R7 2k21	1
R16 1k00	2
R17 9k09	2
R19 1k00	2
R20 9k09	2
R27 1k00	3
R28 15k4	3
R29 3k92	3
R30 47k5	3

(continua)

Resistores de filme metálico (continuação)		Folha
R31	47k5	3
R32	47k5	3
R33	1k00	3
R34	499	3

Capacitores polarizados (em μF):		Folha
C1	5000 @ 50V	1
C6	47 @ 50V	1
C8	1 @ 16V	1
C10	47 @ 50V	1
C12	1 @ 16V	1
C15	150 @ 10V (Tântalo)	3

Capacitores cerâmicos (em pF):		Folha
C2	100k @ 50V	1
C3	100k @ 50V	1
C4	100 @ 50V	1
C5	100k @ 50V	1
C7	100k @ 50V	1
C9	100k @ 50V	1
C11	100k @ 50V	1
C13	100k @ 50V	2
C14	100k @ 50V	2
C16	100k @ 50V	3

Potenciômetros miniatura com 15 voltas, tipo "Trimpot" (em Ohms):			Folha
P1	10k	Calibração da tensão de monitoração de +12V	1
P2	10k	Calibração da tensão de monitoração de +5V	1
P3	2k	Calibração da tensão de referência de +8,0V (V_2)	1
P4	1k	Calibração da tensão de referência de +2,0V (V_1)	1
P5	10k	Calibração da tensão de monitoração de V_2	1
P6	10k	Calibração da tensão de monitoração do eletrômetro #1	2
P7	10k	Calibração da tensão de monitoração do eletrômetro #2	2

(continua)

Potenciômetros miniatura (continuação):			Folha
P8	10k	Calibração da escala de teste de 10s	3
P9	100k	Calibração da escala de teste de 100s	3
P10	500k	Calibração da escala de teste de 200s	3
P11	1M	Calibração da escala de teste de 500s	3
P12	10k	Calibração da tensão de monitoração de VTeste	3

Chaves:			Folha
S1	Interruptor 1 polo, 2 posições (Liga/Desliga)		1
S2	2 polos, 2 posições (tipo H-H - 110/220)		1

Transformador:			Folha
T1	Primário 110+110, Secundário 13+13 (1A) com derivação central		1

Fusível:			Folha
F1	500mA, rápido (tipo miniatura)		1

Conectores:			Folha
CnA	Tipo "Mini-Modul" em linha dupla com 20 pinos		4
CnB	Tipo "Mini-Modul" em linha dupla com 20 pinos		4
CnC	Conexão de cabo de força (para painel) com 3 pinos		1
BNC1	Tipo BNC, entrada para tensão do eletrômetro #1		2
BNC2	Tipo BNC, entrada para tensão do eletrômetro #2		2
BNC3	Tipo BNC, saída do sinal de ZERO para o eletrômetro #1		2
BNC4	Tipo BNC, saída do sinal de ZERO para o eletrômetro #2		2

Caixa de alumínio, marca Taunus (dimensões aproximadas em mm):

Largura: 310

Altura: 80

Profundidade: 250

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. KNOLL, G. F. Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons, 1989.
2. WOODS, M. J.; KEIGHTLEY, J. D.; CIOCANEL, M. Intercomparisons of ^{67}Ga and ^{123}I Assays in UK Hospitals, 1996, *Appl. Radiat. Isot.* Vol. 49, No 9-11, pp. 1449-1452, 1998.
3. WOODS, M. J.; MUNSTER, A. S.; SEPHTON, J. P.; LUCAS, S. E. M.; WALSH, C. P. Calibration of the NPL secondary standard radionuclide calibrator for ^{32}P , ^{89}Sr and ^{90}Y , *Nucl. Instrum. and Meth. In Phys. Research A* 369, 698-702, 1996.
4. WALSH, C. P.; WOODS, M. J.; SEPHTON, J. P.; WOODS, S. A.; LUCAS, S. E. M.; ROSSITER, M. J.; WILLIAMS, T. T.; Bass, G. A. ^{131}I diagnosis and therapy capsules and low dose rate ^{125}I and ^{137}Cs brachytherapy sources. Calibration of the NPL secondary standard radionuclide calibrator, *Nucl. Instrum. and Meth. In Phys. Research A* 369, 703-708, 1996.
5. RYTZ, A. The international reference system for activity measurements of γ -ray emitting nuclides, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* 34:8, 1047-1056, 1983.
6. WEISS, H. M. 4π - γ Ionisation chamber measurements, *Nuclear Instrum. Meth. Vol.* 112, 291-297, 1973.
7. BAERG, A. P. Measurement of radioactivity disintegration rate by the coincidence method, *Metrologia*, 2(1), p: 23-32, 1966.
8. BAERG, A. P. Absolute measurement of radioactivity. *Metrologia*, 3(4), p: 105-108, 1967.
9. BAERG, A. P. The efficiency extrapolation method in coincidence counting, *Nuclear Instruments and Methods*. 112, p: 143-150, 1973.

10. CAMPION, P. J. The standardization of radioisotopes by beta-gamma coincidence method using high efficiency detectors, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, **4**, p: 232-248, 1959.
11. SIMOEN, J. P.; OSTROWSKY, A. Mesure de très faibles courants continus. Application en métrologie des rayonnements ionisants, *Bulletin BNM*, No. 36, Avril 1979.
12. GHIHO, J. P.; OSTROWSKY, A.; SIMOEN, J. P.; HILLION, P. Mesure des courants faibles au Laboratoire de Metrologie des Rayonnements Ionisants., C.E.A. , Saclay. *CEA-R-4637*, Décembre 1974.
13. DIAS, M. S.; RENNER, C. Si(Li) Efficiency Curve for X-Ray Parallel Beam. *Nucl. Instrum. and Methods*, Vol. 193:91, 1982.
14. KOSKINAS, M. F.; DIAS, M. S. Coincidence System for Radionuclide Standardization using Surface Barrier Detectors. *Nuclear Instrum. and Methods in Phys. Research*, A280:327-331, 1989.
15. KOSKINAS, M. F.; DIAS, M. S. Measurement of the Gamma-Ray Probability per Decay of ^{31}Si . *Applied Radiat. Isot.* **44**, 1209-1211, 1993.
16. DIAS, M. S.; KOSKINAS, M. F. Activity determination of ^{75}Se Radioactive Solution by Absolute Method. *Phys. Med. Biol.* **39a**, 798, 1994.
17. DIAS, M. S.; KOSKINAS, M. F. Accidental Summing Correction in ^{125}I Activity Determination by the Sum-Peak Method. *Applied Radiat. Isot.* **46**(9), 945-948, 1995.
18. FONSECA, K. A.; KOSKINAS, M. F.; DIAS, M. S. Covariance methodology applied to uncertainties in ^{126}I disintegration rate measurements. *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A* **369**, 437-440, 1996.
19. FONSECA, K. A. Absolute measurements of the activity and gamma-ray probability per decay of I-126, Dissertação de Mestrado, IPEN/Universidade de São Paulo, 1997.
20. KOSKINAS, M. F.; DIAS, M. S.; FONSECA, K. A. Disintegration rate measurements of Ga-67, Attie, M.R.P., K.A. *Applied Radiat. Isot.*, 1998.
21. FONSECA, K. A.; KOSKINAS, M. F.; DIAS, M. S. Measurement of the gamma-ray probability per decay of I-126, *Applied Radiat. Isot.*, 1998.

22. RATEL, G. Activity concentration of a solution of ^{133}Ba : results on an international comparison, *Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Research* - A 316, 318, 1992.
23. RATEL, G. International comparison of activity measurements of a solution of ^{109}Cd , *Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Research* - A 345, 289, 1994.
24. RATEL, G. Activity concentration of a solution of ^{125}I : results on an international comparison, *Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Research* - A 366, 183, 1995.
25. RATEL, G. Measurement of the activity concentration of a solution of ^{75}Se , *Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Research* - A 339, 408, 1994.
26. DIAS, M. S. Programa CÂMARA2, Relatório interno do Laboratório de Metrologia Nuclear, IPEN, 1996.
27. SCHRADER, H. Activity Measurements with Ionization Chambers, BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES, Monographie BIPM-4, 1997.
28. ATTIX, F. H. Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry. John Wiley & Sons, 1986.
29. DIAS, M. S. Calibração de um Sistema de Câmara de ionização de Poço $4\pi\text{-}\gamma$ para medidas de atividade de radionuclídeos. Dissertação de mestrado, EPUSP, 1978.
30. NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. International Intercomparison of ^{18}F Activity, U. K., 2000.
31. BUREAU NATIONAL DE MÉTROLOGIE, Laboratoire de Métrologie des Rayonnements Ionisants. Table de Radionucléids, 1982-1984.
32. BOWLES, N. E.; WOODS, S. A.; WOODS, D. H.; JEROME, S. M.; WOODS, M. J.; DE LAVISON, P.; LINEHAM, S.; KEIGHTLEY, J.; POUPAKI, I. Standardization of ^{153}Sm , National Physical Laboratory, U. K. *Appl. Radiat. Isot.* Vol. 49, No. 9-11, pp. 1345-1347, Elsevier Science Ltd., 1998.
33. DIAS, M. S. Medidas com Câmaras de Ionização IG12/A20 e NPL, Relatórios internos, Laboratório de Metrologia Nuclear, IPEN, 1982-1987.

34. KEITHLEY INSTRUMENTS, INC. Instruction Manual Digital Electrometer Model 616, 1977.
35. LYNX Tecnologia Eletrônica Ltda. CAD 12/32 - Conversor A/D 12 Bits 32 Canais para PC/XT/AT - Manual de Referência Técnica
36. DIAS, M. S. Programa LINFIT1, Relatório interno do Laboratório de Metrologia Nuclear, IPEN, 2000.
37. NATIONAL Semiconductor Corp., U.S.A. Linear DATABOOK, 1980.