

ESCOLA AVANÇADA DE FÍSICA EXPERIMENTAL

Práticas Experimentais em Física de Altas Energias Módulo I: Cintiladores

Jan-Fev/2024

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas / COHEP

autor: André Massafferri Rodrigues

- Aquisição de dados
 - ◊ Noções básicas Padrão NIM
 - ◊ Noções básicas Padrão VME
- Medida de fluxo de múons cósmicos com Cintiladores plásticos

AQUISIÇÃO DE DADOS

Noções básicas Padrão NIM

O sistema NIM (*Nuclear Instrumentation Module*) consiste em um dos primeiros sistemas de aquisição de dados largamente utilizados em física de partículas experimental. Seus módulos fazem operações específicas, como amplificação e discriminação de sinais, operação de lógica, e muitas outras. Esses módulos são manipulados no *front-panel* e apresentam sinais sensíveis a corrente.

Padrões digitais são convenções elétricas para definição da lógica 1 e 0. Os mais conhecidos são TTL e NIM (homônima do sistema de aquisição de dados NIM). Este último oferece sinais que, quando acoplados a impedância de $50\ \Omega$, resultam em tensão 0 V em lógica 0 e em tensão de $-0.9V$ em lógica 1.

MATERIAL ENVOLVIDO

Contador CAEN N1145, Discriminador CAEN N840, Logic unit CAEN N405, Linear Fan-in/Fan-out CAEN N625, Dual Delay CAEN N108A, Osciloscópio e Gerador de Funções Tek-Tronix AFG 3252 com duas saídas.

Nesta tarefa iremos aprender a operar os módulos NIM mais comumente utilizados e discutiremos noções de ruído e *timing*.

1. Utilize um função pré-configurada no gerador de sinais, denominada Setup1; trata-se de uma opção que gera dois sinais negativos de amplitude de $-100\ mV$, rápidos ($\sim ns$) e frequência de 1 MHz e 100 Hz, para emular sinais específicos, dentro da faixa dinâmica de certo tipo de detectores como cintiladores acoplados a fotomultiplicadores à vácuo.

O módulo Linear tem 4 canais independentes, cada uma com 4 entradas e 4 saídas. Sua principal função é criar cópias idênticas de sinais analógicos. Verifique, pela posição do LED, se existem canais configurados para inverter a polaridade da saída, ou seja, oferece ganho -1 .

2. Faça três cópias analógicas utilizando o módulo Linear. Observe uma cópia analógica no osciloscópio, utilizando saída TTL do gerador como *trigger* do osciloscópio. Lembre-se de configurar sua impedância para $50\ \Omega$. Com o osciloscópio, estime visualmente o *rise-time* (tempo de subida) e a duração (largura) do sinal. Utilize depois o *trigger* do próprio osciloscópio.
3. Conecte a segunda cópia analógica na entrada do módulo Discriminador utilizando um cabo curto. A saída do discriminador oferece um pulso digital NIM, com largura configurável, sempre que o sinal analógico exceder o valor da tensão de limiar definido, V_{th} . Configure o valor V_{th} para $-30\ mV$. Conecte umas das saídas do discriminador no osciloscópio. Observe o comportamento da saída digital quando se varia V_{th} .

4. Faça cópias digitais utilizando o módulo *fanout digital*.
5. Conecte as saídas apropriadas ao contador. Utilizando este módulo podemos realizar contagens durante um tempo definido (taxa) utilizando o *GATE*. O *GATE* pode ser gerado pelo próprio contador, através do *timer* localizado na parte inferior do módulo. Configure o *timer* para a escala de *1 mseg*, ajuste a barra numérica para *1000*, correspondendo a um *timer* de *1 seg*. A contagem será iniciada em *load*. Conecte a saída do *timer* no *GATE* do canal *1* do contador, mude para o *mode GATE+CLEAR* que faz com que o contador seja resetado a cada tomada de dados (*load*). O *timer* pode ser ativado em *loop* na chave *REP* com uma separação fixa de *1 seg* entre os pulsos. Verifique no osciloscópio o funcionamento do *timer*. Compare a taxa de contagens obtida no contador com a configurada no gerador de funções.
6. Reflita sobre o que se espera do resultado do gráfico da taxa de contagens (eixo Y) em função de V_{th} (eixo X), conhecido como *threshold scan*. Realize esta medida na faixa de -30 mV até -130 mV , utilizando δV_{th} de 10 mV e compare com o esperado.
7. Conecte a terceira cópia analógica em outra entrada do discriminador utilizando um cabo bem longo. Compare as duas saídas no osciloscópio.
8. Utilize os resultados referentes ao cabo curto e longo, observados no osciloscópio, para medir a velocidade de propagação do sinal em cabos. Para tal, meça a diferença no tamanho dos cabos e o atraso observado. Compare com a velocidade da luz, $3 * 10^8\text{ m/s}$. Confira com as especificações anotadas nos cabos.
9. Estabeleça a lógica de coincidência, *AND*, entre os dois pulsos, correspondentes aos cabos curto e longo, utilizando o módulo *Logic*. Realize a contagem das coincidências. Utilize o módulo de *Delay* para sincronizar os sinais, estabelecendo conexão adicional apropriada. O módulo *Delay* tem 2 canais independentes constituídos internamente de cabos com comprimentos bem definidos. Portanto, atrasos adicionais em sinais podem ser implementados simplesmente pela adição, em série, de cabos.
10. Descubra qual o valor de tempo mínimo necessário requerido pelo módulo *Logic* para se estabelecer uma coincidência temporal.

O diagrama de blocos referente a esta prática pode ser visto no figura 1.

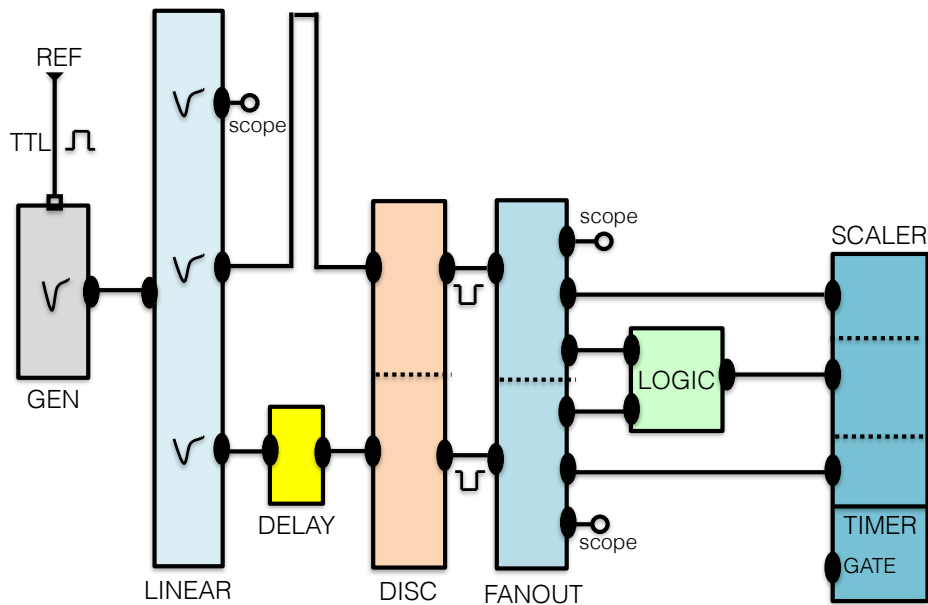


Figure 1: Diagrama de blocos do *setup* de medida no crate NIM.

Noções básicas Padrão VME

O padrão VME consiste em um sistema de aquisição de dados em física de partículas experimental que oferece *interface* com o computador. O módulo de *interface*, inserido sempre no primeiro *slot* do *crate*, é geralmente denominado *controlador* ou *bridge*. A comunicação entre os diversos módulos presentes no *crate* VME e a *bridge* é estabelecida em barramento paralelo. Para tal, cada módulo é univocamente reconhecido por um endereço, em formato hexadecimal, que deve ser configurado fisicamente no *hardware*, aqui denominado *BASE*.

Os comandos são realizados através de processos de leitura e escrita, em 16 ou 32 *bits*, em registradores específicos dos módulos que, para serem acessados, devem ser somados ao endereço *BASE*. A aquisição de dados também se dá pelo gerenciamento de sinais analógicos e pulsos digitais entre os módulos, via painel frontal, tal qual é realizado em aquisição do tipo NIM. Para se operar módulos VME é necessário a consulta do manual correspondente contendo o mapa de registradores associados a cada comando disponível.

MATERIAL ENVOLVIDO

Controlador *CAEN v1718* e contador (*scaler*) *LeCroy V1151N*.

CONTADOR CAEN v1151N

O módulo *V1151N* é um contador com 16 canais que opera em formato digital NIM. A contagem de pulsos é habilitada sempre que um nível lógico 1 for aplicada à entrada *GATE*, comum a todos os canais. Neste módulo, diferentemente dos módulos mais atuais, as contagens não são

armazenadas em memória para posteriormente serem descarregadas. Em vez disso, as contagens são lidas *on-the-fly*, ou seja, realizadas durante o processo de aquisição, através dos registradores de leitura específicos de cada canal. Existe a opção, adotada nesta tarefa, do conteúdo do registrador ser zerado (*reset*) após cada leitura.

O mapa de registradores do módulo *V1151N* é mostrado na Figura 2. Repare que usaremos o modo de leitura dos registradores com endereço entre 0x40 e 0x7C (página 10 do manual).

BASE ADDRESS	FUNCTION IMPLEMENTATION
0xFE	Rev Number, Serial Number
0xFC	Manufacturer Number, Module Type
0xFA	Fixed Module ID
:	:
0xF0	:
:	:
0xBC	Read Scaler 16
0xB8	Read Scaler 15
0xB4	Read Scaler 14
0xB0	Read Scaler 13
0xAC	Read Scaler 12
0xA8	Read Scaler 11
0xA4	Read Scaler 10
0xA0	Read Scaler 9
0x9C	Read Scaler 8
0x98	Read Scaler 7
0x94	Read Scaler 6
0x90	Read Scaler 5
0x8C	Read Scaler 4
0x88	Read Scaler 3
0x84	Read Scaler 2
0x80	Read Scaler 1
:	:
0x7C	Read, Reset, Write, Preset 16
0x78	Read, Reset, Write, Preset 15
0x74	Read, Reset, Write, Preset 14
0x70	Read, Reset, Write, Preset 13
0x6C	Read, Reset, Write, Preset 12
0x68	Read, Reset, Write, Preset 11
0x64	Read, Reset, Write, Preset 10
0x60	Read, Reset, Write, Preset 9
0x5C	Read, Reset, Write, Preset 8
0x58	Read, Reset, Write, Preset 7
0x54	Read, Reset, Write, Preset 6
0x50	Read, Reset, Write, Preset 5
0x4C	Read, Reset, Write, Preset 4
0x48	Read, Reset, Write, Preset 3
0x44	Read, Reset, Write, Preset 2
0x40	Read, Reset, Write, Preset 1
:	:
0x1F	Generator Control
0x10	Interruptions
:	:
0x00	Generate Module 0

Figure 2: Mapa de registradores do módulo V1151N.

SETUP DE TESTE

O tutorial abaixo desenvolve um *setup*, ilustrado na Figura 3, para medir as taxas de contagens da função pré-configurada no gerador de sinais *Setup1* envolvendo os contadores NIM e VME. Realizaremos contagens durante o intervalo de tempo gerado pelo *timer* do contador NIM, já discutido anteriormente.

1. Duplica, utilizando o *fanout* linear, e discrimine, utilizando *Vth* de 30 mV, os dois pulsos

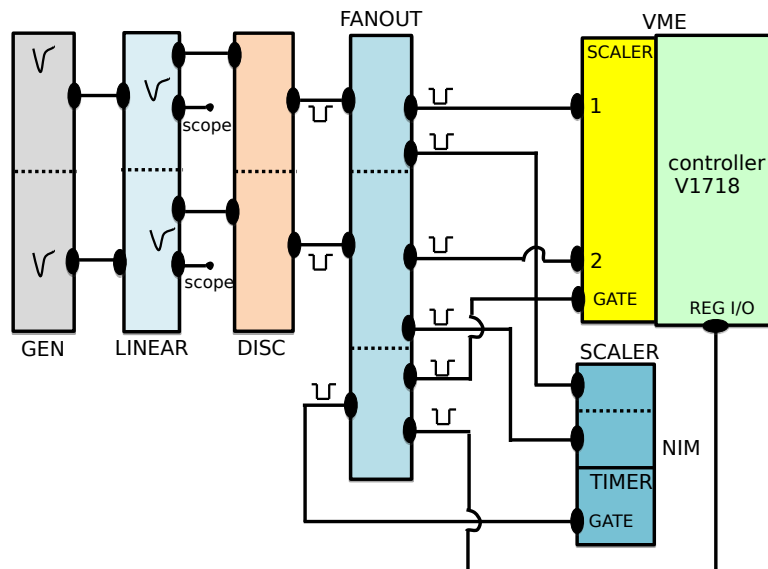


Figure 3: Diagrama de blocos.

de frequências 1 MHz e 100 Hz . Os pulsos digitais produzidos devem ter o número de cópias aumentada no *fanout* digital.

A leitura das contagens deve ser realizada sempre que o *timer* estiver em nível lógico 0 . Esse pulso deve ser também propagado para o *GATE* do módulo *V1151N* de forma a desabilitar a contagem. Para definir o momento de ler os registradores do contador deve ser enviado o pulso de *timer* à uma entrada específica do controlador *V1718* cujo valor do nível lógico está contido em um dos *bits* do registrador de *INPUT_REGISTER*, endereço $0x08$, Figura 4 (página 18 do manual).

2. Duplica o pulso do *timer* no *fanout* digital. Utilize uma cópia para o *GATE* do contador *V1151N* e outra para o registrador do controlador *V1718*.
3. Entenda o programa de aquisição de dados correspondente a esta tarefa, denominado *MACRO-SCALER.C*. Existem 2 entradas (*IN0* e *IN1*) na interface *v1718* disponíveis. Indique como modificar o programa para utilizar qualquer umas das entradas.¹
4. Compare os resultados obtidos de contagem realizado pelo contador *NIM* e *VME*.

¹Importante mencionar que por causa de um BUG no módulo *V1718* as entradas —textttIN0 e *IN1* estão invertidas.

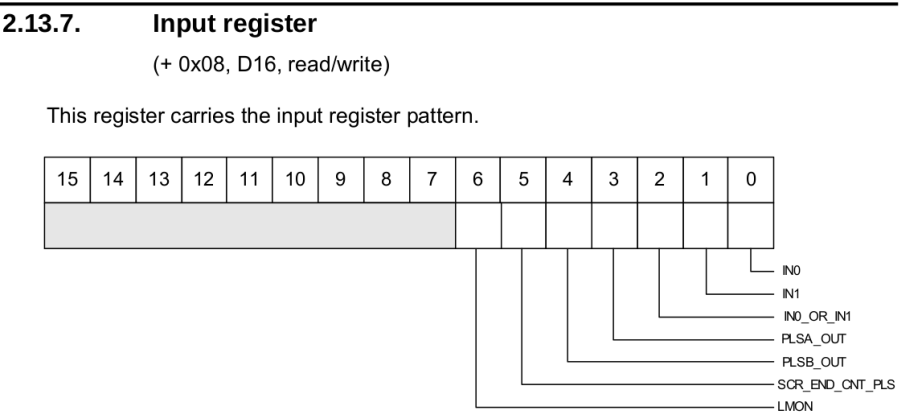


Fig. 2.8: Input register

Figure 4: Descrição do registrador INPUT_REGISTER do controlador V1718.

Medida do fluxo de múons cósmicos

Os detectores empregados nesta medida são compostos por cintiladores plásticos acoplados a PMTs (*Photo-Multiplier-Tube*) por intermédio de guias de onda. Quando atravessados por partículas ionizantes, cintiladores geram fótons através da excitação atômica. Estes fótons são transformados em elétrons, por efeito foto-elétrico, na janela óptica da PMT. A alta tensão aplicada nos dinodos presentes na PMT resulta em vários estágios de multiplicação de elétrons, produzindo ganhos de corrente superiores a 10^6 . Desta forma, um fóton incidente na entrada de uma PMT pode produzir sinais com amplitudes numa faixa dinâmica tal que dispensam o uso de módulos amplificadores. Além dos sinais de interesse, a PMT gera também sinais espúrios incoerentes, devido a fótons térmicos, denominados *corrente de escuro*. Tipicamente, sinais de corrente de escuro apresentam amplitudes inferiores, em média, a sinais de interesse, provocado por fótons externos.

Múons são separados de eventos incoerentes, como os gerados por corrente de escuro e ruído eletrônico, através do método de coincidência temporal entre os detectores e pela comparação da amplitude de saída com uma tensão de referência, V_{th} , em discriminadores.

Note que, diferentemente das atividades anteriores, onde utilizamos sinais gerados por gerador de funções, detectores produzem sinais em uma faixa dinâmica bem mais larga, consequência direta de variações intrínsecas da energia depositada no material cintilante pela partícula incidente, da eficiência na coleta de luz e do efeito estocástico da multiplicação de elétrons no interior da PMT.

A medida de fluxo de múons será realizada por dois detectores principais, A e B, contendo cintiladores especiais, alimentados por alta tensão positiva, com $50 \times 50 \text{ cm}^2$ de área e grande espessura, 5 cm , em coincidência $\text{COINC}[A, B]$. Um cintilador auxiliar AUX alimentados por alta tensão negativa, com área sensível menor que os principais, serão utilizados para medida de eficiência. As medidas de eficiência dos detectores A e B são obtidas, respectivamente, pelas razões das coincidências triplas pelas duplas:

$$Eff_A = \frac{\text{COINC}[A, B, \text{AUX}]}{\text{COINC}[B, \text{AUX}]} \quad (1)$$

$$Eff_B = \frac{\text{COINC}[A, B, \text{AUX}]}{\text{COINC}[A, \text{AUX}]} \quad (2)$$

O valor do fluxo de múons é dado pela contagem em um detector dividido pela sua área e pelo tempo de aquisição. Essa medida, entretanto, estará sujeito a pulsos indesejáveis, como corrente de escuro e ruído eletrônico. Para evita-los, faremos, como medida principal, a coincidência entre os detectores A e B. Com a utilização de dois detectores devemos ter ciência que vão existir algumas trajetórias de partículas cósmicas inclinadas que passam nos extremos do detector de cima mas que não passam pelo detector de baixo. Para evitar que o valor obtido seja subestimado iremos

estimar o fator de correção geométrico, A_b , via simulação *Monte Carlo*, denominado MACRO-GEO. Utilizaremos na simulação o modelo de produção de trajetórias de partículas cósmicas mais aceito na literatura, considerando que a incidência de múons na superfície da Terra apresenta uma dependência de $\cos^n \theta$. O valor n depende da região do planeta e tem alta correlação com o campo magnético local e da densidade atmosférica local. Utilizaremos o valor médio igual a 2, o que não deve contribuir com grandes erros sistemáticos já que ambos os detectores estão colados.

O valor do fluxo é dado por:

$$\text{fluxo}(s^{-1} * m^2) = \frac{\text{COINC}[A,B]}{\text{área} * \text{tempo aquisição} * A_b * \text{Eff}_A * \text{Eff}_B} \quad (3)$$

Portanto, as grandezas relevantes são:

- $\text{COINC}[A, B]$,
- $\text{COINC}[A, B, \text{AUX}]$,
- $\text{COINC}[B, \text{AUX}]$,
- $\text{COINC}[A, \text{AUX}]$,

além das contagens individuais.

1. Posicione os detectores A, B e AUX, conforme mostrado na figura 5. Garanta que A e B fiquem exatamente um sobre o outro, que todas as trajetórias retilíneas que passem por AUX também passem por A e B.
2. Alimente as PMTs associadas aos detectores A, B com alta tensão de $+600 \text{ V}$, e o auxiliar com -1400 V (detector já fechado). Observe gradualmente o sinal analógico destes detectores aparecerem no osciloscópio. Estime o valor do ruído do sistema para cada detector utilizando o *trigger* do osciloscópio.
3. Comece a montar o *setup* de aquisição de dados, conforme o que foi aprendido anteriormente, o qual vai envolver a *interface* V1719 e contadores. Não esqueça de adicionar os pontos de monitoramento do osciloscópio e adicionar o módulo de *Delay* no local apropriado para realizar alinhamento temporal. Esse fato é crucial aqui, já que realizaremos coincidência temporal entre detectores com tempos de resposta completamente diferentes.
4. Configure os V_{th} dos discriminadores para operarem de forma confortável acima do ruído: sugestão de -20 mV .
5. Configure a largura do pulso (T) para operar de forma confortável acima do mínimo para obter uma coincidência: sugestão de 40 ns . Note que o aumento exagerado da largura impacta no aumento da probabilidade de coincidência temporal para pulsos incoerentes.
6. Faça o alinhamento temporal dos pulsos utilizando o osciloscópio e o módulo de *Delay*.

Podemos esperar que pulsos dos detectores devem aparecer a partir de um certo valor de alta tensão. Sua taxa deve crescer com o aumento da alta tensão enquanto a faixa dinâmica do detector se situar na região de V_{th} . Idealmente, haverá um valor de alta tensão acima do

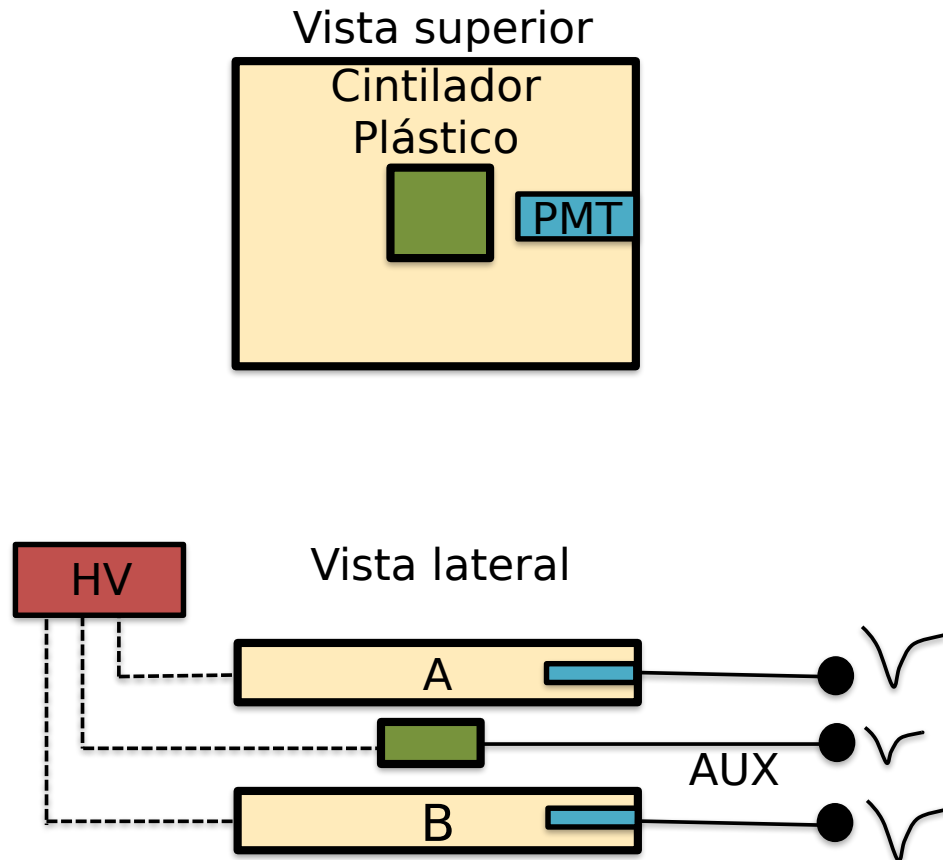


Figure 5: Geometria de montagem dos detectores.

qual os todos os eventos de cósmicos serão detectáveis, caracterizando um *plateau*. Cuidado deve-se ter com os níveis de corrente de escuro, que não apresentam comportamento linear com a alta tensão, de modo que, acima de um certo nível de alta tensão, sua contribuição pode superar largamente os eventos de interesse. Geralmente, o ponto de operação ótimo se localiza no centro do *plateau*.

7. Represente, em um gráfico, as eficiências medidas para diferentes valores de alta tensão dos detectores A e B, mantendo fixos os valores de alta tensão dos detectores auxiliares. Utilize um tempo de aquisição de *120 seg* e passos de *20 V* dentro da faixa de *+500 V* a *840 V*. A cada passo verifique o alinhamento temporal. Identifique os *plateaus* e defina os pontos de operação para ambos os detectores de modo a operar com eficiência máxima. Com base na escolha do ponto de operação realizada, o ponto de operação da alta tensão se modificaria se aumentássemos V_{th} para *-30 mV*?
8. Realize algumas tomadas de dados de *100 seg* e verifique a estabilidade e se os valores estão compatíveis com o esperado para este tipo de medida no Rio de Janeiro, da ordem de $150 \text{ múons por m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.
9. Você considera a forma que estamos fazendo a medida a única forma confiável? Quais as

grandezas estão associadas a incertezas estatísticas e sistemáticas? Proponha variantes do nosso modelo de medida para estimar o erro sistemático.

10. Modifique a posição em z do detector de cima e repita a medida, utilizando o valor de A_b correspondente, obtido na simulação. Precisamos reobter as eficiências? Você considera essa medida alternativa uma boa variante para a estimativa do erro sistemático.
11. Após o *comissionamento* apropriado do nosso experimento iremos realizar uma tomada de dados de longa duração com tempo de aquisição de *10 seg.*