



UNICAMP



Medida da vida média do múon

Morais A.F. e Fauth A.C.

Departamento de Raios Cósmicos e Cronologia
Instituto de Física "Gleb Wataghin" – Caixa Postal: 6165
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP
13083-970, Campinas, SP, Brasil



Resumo

A vida média do múon foi medida utilizando múons da radiação cósmica que param dentro de um detector de partículas. O detector utilizado foi um cilindro de cintilador plástico acoplado a uma fotomultiplicadora. Utilizando módulos NIM e CAMAC foi montado um sistema de aquisição de dados que permite medir a diferença de tempo entre dois pulsos subsequentes, o que foi utilizado para obter o tempo médio de vida do múon. Ainda, além do decaimento dessas partículas no material, foi considerada a captura dos múons negativos pelo núcleo de Carbono do cintilador. O valor obtido para a vida média foi de $\tau_{\mu} = (2,08 \pm 0,08) \mu s$ e o tempo de captura $\tau_c = (18 \pm 13) \mu s$.

1. Introdução.

A vida média dos múons é uma grandeza já bem conhecida e confirmada por vários experimentos de física de partículas. Sendo assim, a medida realizada nesse projeto teve como principal objetivo a familiarização com a instrumentação comumente utilizada em experimentos de física de altas energias. O desenvolvimento e implementação da lógica de aquisição de dados e sua posterior análise são parte fundamental na realização de um experimento e tornam esse projeto de Iniciação Científica bastante instrutivo e atual.

Utilizando módulos NIM e CAMAC foi desenvolvido um sistema de aquisição adequado para realizar as medidas desejadas. A caracterização desse sistema e a análise dos dados coletados são os temas desse painel.

2. Detector utilizado: Cintilador plástico.

Cintiladores são materiais que emitem radiação após a passagem de uma partícula, o que excita alguns átomos do material. Em um curto período de tempo (10ns ou menos) parte dessa energia de excitação é devolvida em forma de radiação e pode ser captada por um tubo fotomultiplicador.

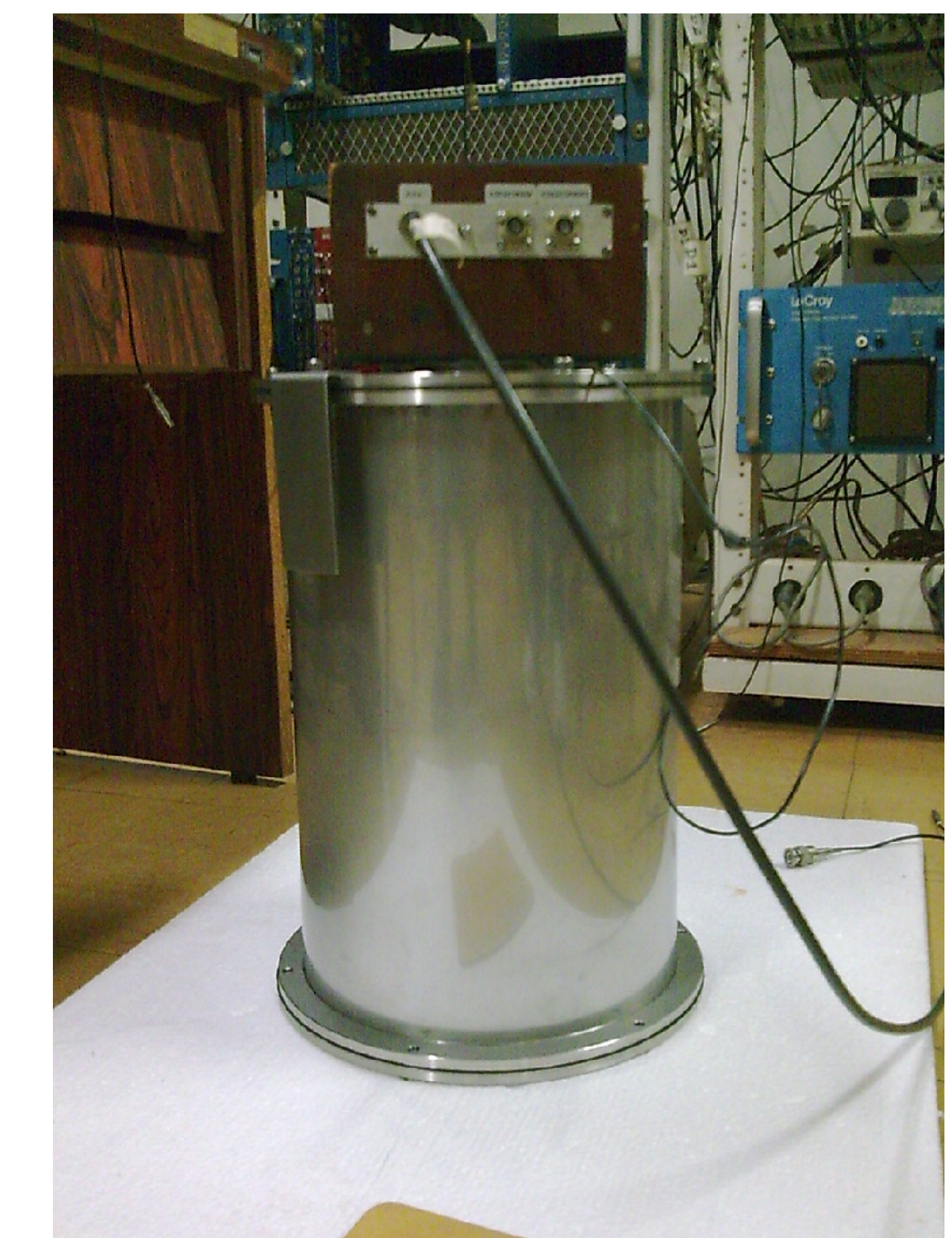


Figura 1: Foto do detector cintilador plástico

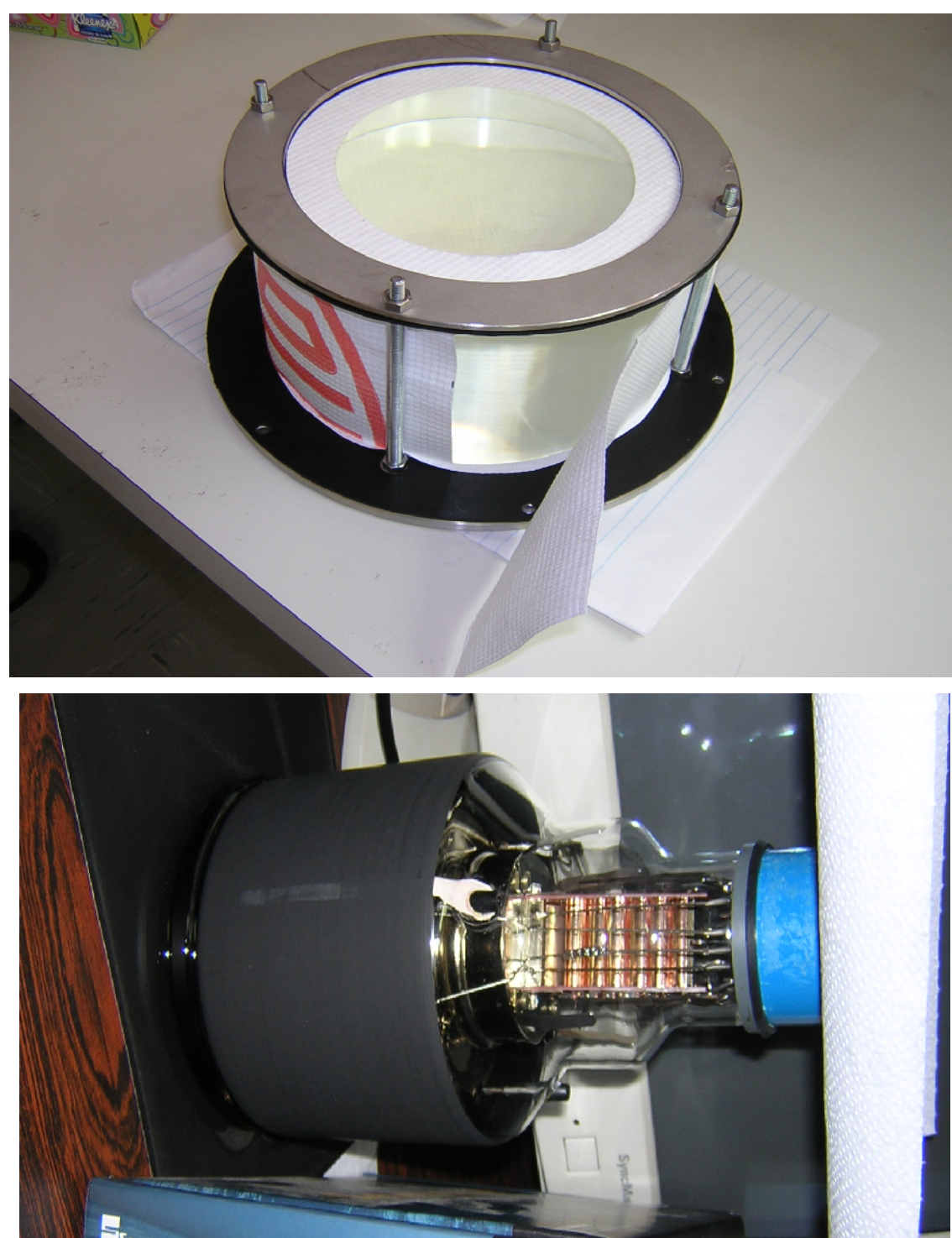


Figura 2: Acima: bloco de cintilador utilizado no detector. Abaixo: Fotomultiplicadora utilizada.

O material cintilador utilizado nesse experimento é equivalente ao NE110. O detector contava com um tubo fotomultiplicador Philips XP2040 de 5 polegadas de diâmetro, funcionava a uma tensão de -1400V e tinha forma cilíndrica com raio e altura iguais a 10cm. Ele está mostrado na Figura 1 e em seu interior, revestindo o cilindro cintilador, há uma folha de Tyvek, que refletirá para a fotomultiplicadora os fótons produzidos no processo de cintilação.

3. Sistema de aquisição.

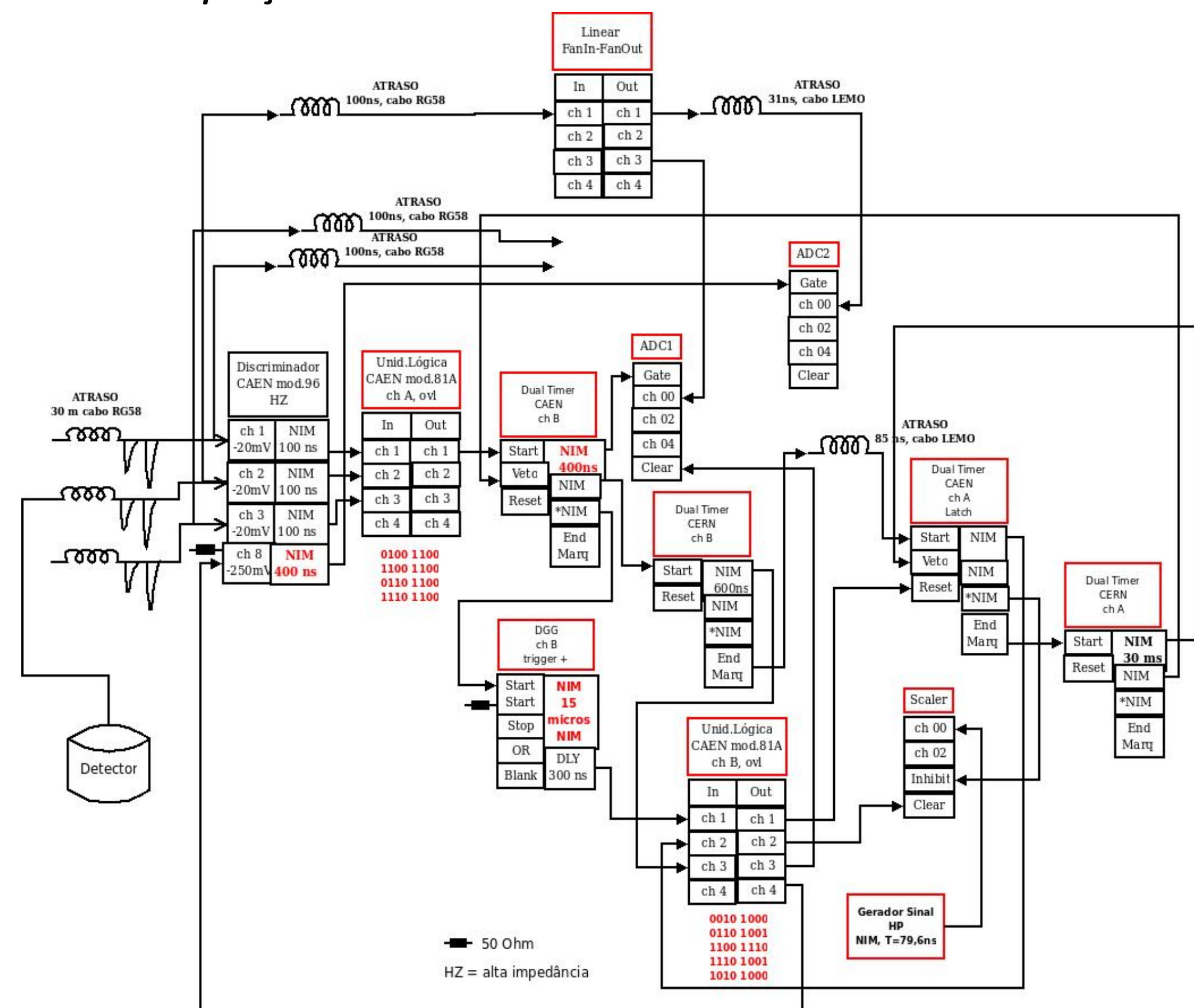


Figura 3: Diagrama da eletrônica de aquisição

3.1. Calibração dos tempos.

Para obter a equação de conversão entre a contagem realizada pelo Scaler e o intervalo de tempo entre a entrada do múon no detector e seu decaimento, utilizou-se um sistema gerador de pulsos que simulava tal processo.

Para construir a curva de calibração ajustava-se o valor do gerador de pulsos, verificava-se tal valor no osciloscópio e então o programa de aquisição era iniciado, de modo a ler a contagem realizada pelo Scaler, conseguindo, assim, um arquivo de dados, com o qual eram obtidos a média, o desvio padrão (σ) e o erro da medida. A reta de calibração obtida está mostrada na Figura 4.

É possível, portanto, recuperar o intervalo de tempo entre os pulsos que entram na eletrônica. A expressão que deve ser usada para tanto é:

$$\Delta t [\mu s] = 0,11 + 0,0785 \cdot \text{contagem}$$

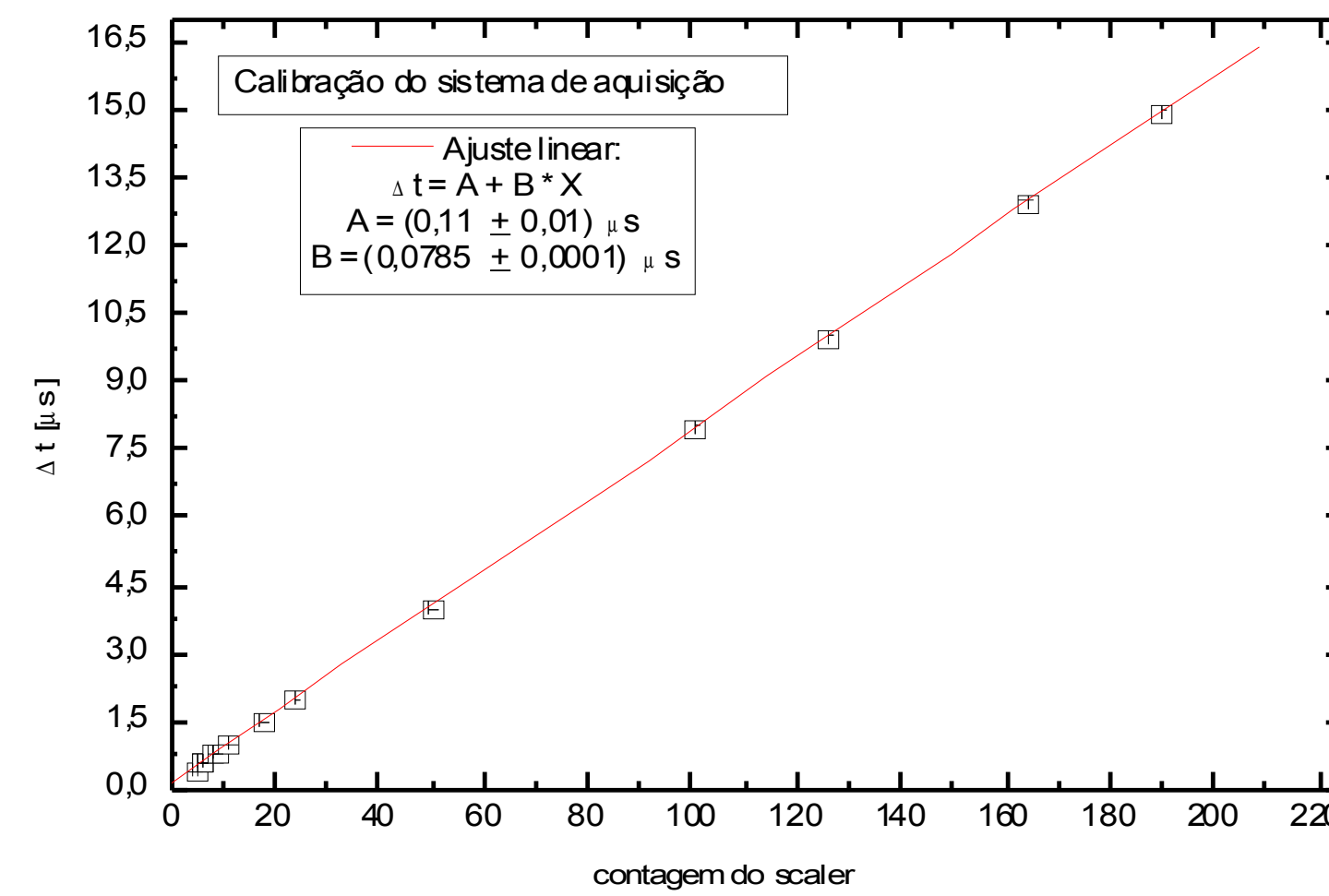


Figura 4: Gráfico da Calibração

4. Estudo da captura de múons negativos em cintilador plástico e água.

Considerações teóricas mostram que quando um múon negativo é trazido ao repouso por um meio absorvedor ele, muito rapidamente (um tempo muito menor que seu tempo de vida médio), torna-se parte dos átomos do material, substituindo um elétron atômico. Sua função de onda passa a ter amplitude considerável no núcleo, podendo então interagir com os prótons lá presentes [1]. Tal processo de interação tem um tempo médio característico τ_c e contribui para o desaparecimento dos múons no meio.

4.1. Lei de decaimento e captura dos múon.

A lei de decaimento para partículas instáveis é idêntica àquela do decaimento radioativo de um isótopo instável. Ao aplicá-la para o decaimento dos múons em meio material, porém, deve-se tomar algum cuidado, visto que os múons negativos podem, antes de decaírem, serem capturados pelos prótons do material, processo esse que tem um tempo característico $\tau_c = 1/\lambda_c$.

Sendo dN o número de múons que decaem no intervalo de tempo entre t e $t + dt$, pode-se escrever:

$$dN = dN_+ + dN_- \quad (4.1)$$

onde dN_+ e dN_- são, respectivamente, o número de múons positivos e negativos que decaíram nesse intervalo. Pode-se escrever ainda, visto que o múon positivo decai com uma taxa, $\lambda_+ = 1/\tau_+$ (igual à taxa de decaimento no vácuo) e o múon negativo com uma taxa $\lambda_- = \lambda_+ + \lambda_c$ (já que tais partículas desaparecerem graças à dois processos: decaimento e captura):

$$dN_+ = -\lambda_+ N_+ dt \quad dN_- = -(\lambda_+ + \lambda_c) N_- dt \quad (4.2)$$

e portanto, como $N = N_+ + N_-$ e sendo $r = \frac{N_-}{N}$:

$$dN = dN_+ + dN_- = [-\lambda_+ N_+ - (\lambda_+ + \lambda_c) N_-] dt = [-\lambda_+ (N_+ + N_-) - \lambda_c N_-] dt \quad (4.3)$$

$$dN = dN_+ + dN_- = (-\lambda_+ N - r\lambda_c N) dt = -(\lambda_+ + r\lambda_c) N dt \quad (4.4)$$

$$N(t) = N(0) \cdot \exp[-(\lambda_+ + r\lambda_c)t] \quad (4.5)$$

$$-\frac{dN(t)}{dt} = A \cdot \exp[-(\lambda_+ + r\lambda_c)t] \quad (4.6)$$

onde $A = N(0) \cdot (\lambda_+ + r\lambda_c)$ é uma constante positiva.

Visto que a medida realizada nesse experimento é a da quantidade $-dN(t)/dt$ utilizou-se a expressão 4.6 para ajustar os dados obtidos e assim obter a taxa efetiva de decaimento dos múons:

$$\lambda_{eff} = \lambda_+ + r\lambda_c \quad (4.7)$$

e a taxa de captura λ_c .

5. Resultados e análise dos dados.

Foi realizada uma aquisição de dados com duração de 80 horas, obtendo-se assim cerca de 5000 eventos candidatos à decaimento de múons. O gráfico de $-dN(t)/dt$ vs t obtido desses eventos é mostrado na Figura 5, juntamente com o melhor ajuste da função de decaimento 4.6 somada de uma constante que representa um ruído de fundo uniformemente distribuído. Foi utilizado $r = 0,45$ [2]. Para escolher o ponto de início para a realização do ajuste foi considerado que o menor intervalo de tempo que a eletrônica podia medir era de 400ns. Vários ajustes foram, então, feitos com vários pontos de início de modo a perceber com qual deles se obtinha um menor erro para o parâmetro λ_{eff} e, conseqüentemente, para λ_c . Ainda mais, o ponto a partir do qual tais valores se mantinham estáveis. O resultado obtido está organizado na Tabela 1 e estão de acordo com os encontrados nas referências [3] e [4], que divulgam, respectivamente, $(0,394 \pm 0,011) \times 10^5 s^{-1}$ e $(0,372 \pm 0,013) \times 10^5 s^{-1}$ [média] para a taxa de captura dos múons negativos e, que correspondem à tempos de captura de $(25,4 \pm 0,7) \mu s$ e $(26,9 \pm 0,9) \mu s$.

Tabela 1: Resultados	
Taxa efetiva	$(0,48 \pm 0,02) \times 10^6 s^{-1}$
Tempo efetivo	$(2,08 \pm 0,08) \mu s$
Taxa de captura	$(0,57 \pm 0,42) \times 10^5 s^{-1}$
Tempo de captura	$(18 \pm 13) \mu s$

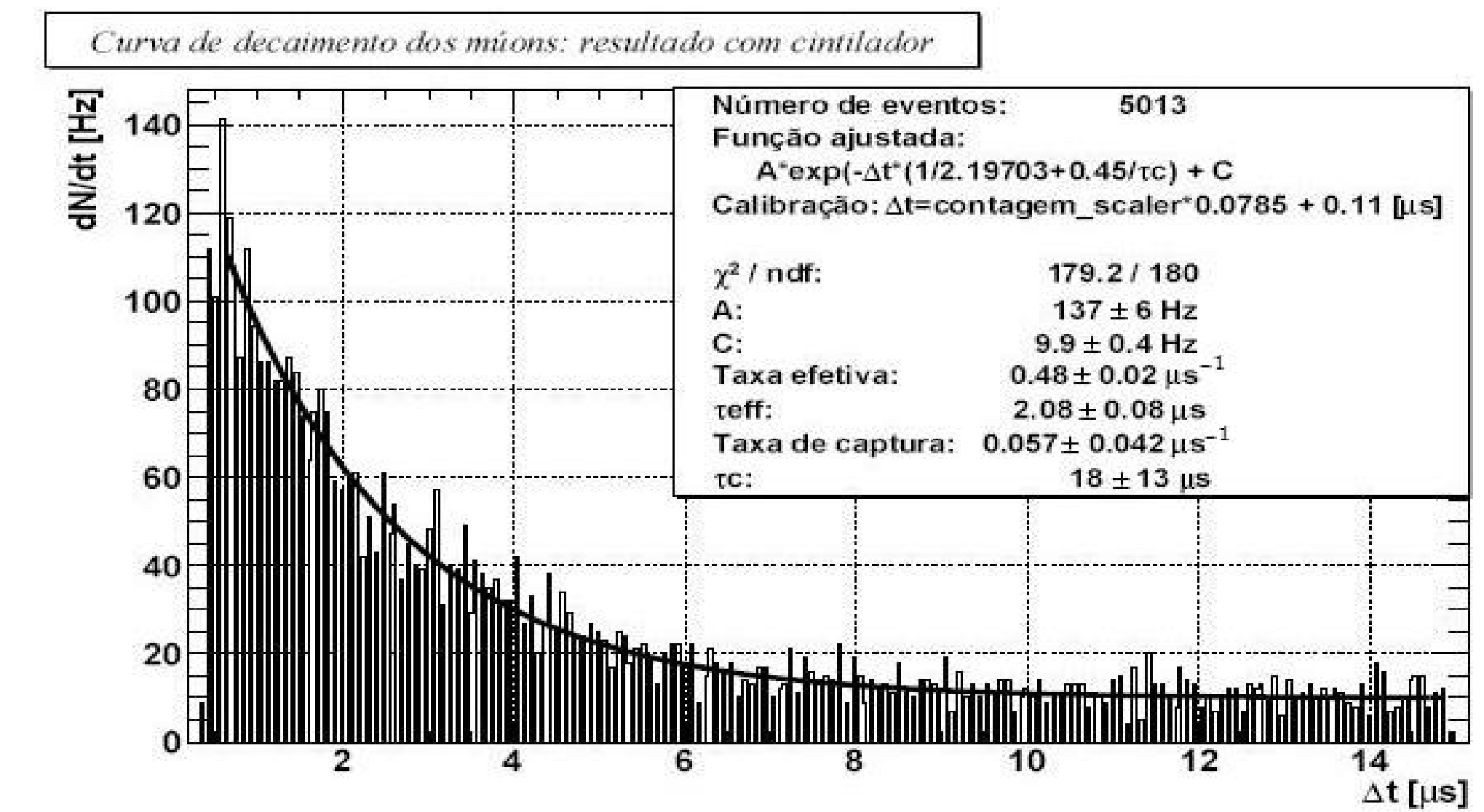


Figura 5: Gráfico resultado com cintilador

6. Discussão sobre o erro do tempo de captura.

Dos resultados acima obtidos nota-se que o erro obtido para τ_c é bastante expressivo. Pode-se fazer uma análise escrevendo-o como função do erro obtido para τ_{eff} .

Visto que:

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_+} + r \frac{1}{\tau_c} \quad (6.1)$$

$$\tau_c = r \frac{\tau_+ \tau_{eff}}{\tau_+ - \tau_{eff}} \quad (6.2)$$

pode-se propagar o erro de τ_{eff} para τ_c :

$$\Delta \tau_c = \left| \frac{\partial \tau_c}{\partial \tau_{eff}} \right| \Delta \tau_{eff} = r \Delta \tau_{eff} \left[\frac{\tau_+ (\tau_+ - \tau_{eff}) + \tau_+ \tau_{eff}}{(\tau_+ - \tau_{eff})^2} \right] = r \Delta \tau_{eff} \left(\frac{\tau_+}{\tau_+ - \tau_{eff}} \right)^2 = r \Delta \tau_{eff} \left(\frac{\tau_c}{r \tau_{eff}} \right)^2 = \frac{1}{r} \left(\frac{\tau_c}{\tau_{eff}} \right)^2 \Delta \tau_{eff} \quad (6.3)$$

e daí:

$$\Delta \tau_c = \frac{1}{r} \left(\frac{\tau_c}{\tau_{eff}} \right)^2 \Delta \tau_{eff} \quad (6.4)$$

ou seja, o erro de τ_{eff} é amplificado por um fator $\left(\frac{\tau_c}{\tau_{eff}} \right)^2$ para dar o erro de τ_c .

Com base nos valores obtidos (Tabela 1) tem-se:

$$\Delta \tau_c = \frac{1}{0,45} \left(\frac{18}{2,08} \right)^2 \Delta \tau_{eff} \approx 166,4 \Delta \tau_{eff} \approx 166,4 \cdot 0,08 \approx 13 \mu s \quad (6.5)$$

Conclui-se, então, que o grande erro de τ_c é devido à grandeza do fator

$\left(\frac{\tau_c}{\tau_{eff}} \right)^2$, já que a montagem experimental realizada tem resolução temporal máxima de 80ns, o que dá um limite mínimo para $\Delta \tau_{eff}$ de $0,08 \mu s$, que foi justamente o obtido pelo ajuste da Figura 5, o que confirma a qualidade dos dados.

7. Conclusão.

O tempo efetivo de vida média dos múons em cintilador plástico (Carbono) medido foi de $(2,08 \pm 0,08) \mu s$, o que, com uma porcentagem de múons negativos de 45%, corresponde a um tempo de captura destes de $(18 \pm 13) \mu s$.

Como discutido, o erro no tempo de captura é proporcional à resolução do sistema de aquisição (80ns), sendo este amplificado por um fator 166. Sendo assim, considerando a simplicidade da montagem realizada, os resultados obtidos foram bons e estão de acordo com o encontrado na literatura, por exemplo nas referências [3] e [4].

Agradecimentos – Agradecemos o apoio da Fapesp (processo nº 2009/09192-4) pela bolsa de iniciação científica e ao CNPq (processo 482155/2007-8) pelo apoio na construção do detector.

8. Referências Bibliográficas.

- [1] - Rossi, B.; High-Energy Particles; Prentice Hall; 1965.
- [2] - C. Amsler et al., Physics Letters **B667**, 1 (2008); disponível em: <http://pdg.lbl.gov/>; visitado em: 22/12/2009.
- [3] - Feinberg, G.; Lederman, L. M.; Annu. Rev. Nucl. Sci. 1963.13:431-504
- [4] - Suzuki, T.; Measday, D. F.; Total nuclear capture rates for negative muons; Physical Review C, Vol. 35 N.6, Junho, 1987.