

---

Iniciação Científica  
PIBIC-UNICAMP 2020-2021

---

## **Relatório parcial**

Período: 01/09/2020 a xx/xx/xxxx

Projeto: Experimento para medir a vida média do múon

Bolsista: Jorge Henrique de Andrade Pacheco Reis  
Orientador: Prof. Anderson Campos Fauth  
Instituto de Física 'Gleb Wataghin  
UNICAMP

## Sumário

<b>1</b>	<b>Raios Cósmicos</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Vida média do múon</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Relatividade Especial e Múons</b>	<b>2</b>
3.1	PMT . . . . .	3
<b>4</b>	<b>Montagem Experimental</b>	<b>3</b>
<b>5</b>	<b>Análise dos Dados e Resultados</b>	<b>4</b>
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>5</b>
	<b>Referências</b>	<b>6</b>

## Resumo

Resumo...

# 1 Raios Cósmicos

Os múons a serem medidos no experimento são oriundos da *radiação cósmica*. Ela é constituída de núcleos atômicos que viajam a velocidades muito próximas à velocidade da luz. Essas partículas podem vir de supernovas, de núcleos de galáxias, buracos negros dentre outros fenômenos astrofísicos (porém ainda não se possui certeza sobre sua origem).

Essas partículas adentram na atmosfera<sup>1</sup> terrestre e acabam colidindo e interagindo com núcleos de nitrogênio, oxigênio e outras moléculas presentes na atmosfera. Essas interações acabam dando origem a novas partículas, as quais, por sua vez, podem decair em outras partículas. Acontecendo sucessivas colisões, produções e decaimentos, repetidas vezes e em cascata, geram o que se chama de *chuveiros atmosféricos*. O número de partículas secundárias produzidas depende diretamente da energia do raio energético primário.

Como resultado da primeira interação, são produzidos em maior quantidade píons e, em menor quantidade, káons, prótons, nêutrons e as antipartículas correspondentes. Os píons carregados com muita energia sofrem pouco espalhamento e seguem na direção para colidir e gerar novas partículas. Os de baixa energia, devido principalmente ao pouco tempo médio de vida ( $\sim 10^{-8}$ ), acabam decaindo e gerando múons carregados ( $\mu^+$  ou  $\mu^-$ ).

Os múons, por sua vez, acabam decaindo também, resultando neutrinos e elétrons (e/ou suas antipartículas) como segue:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (1)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (2)$$

Ao longo de muitos anos, houveram experimentos que mediram o fluxo de raios cósmicos secundários em diferentes altitudes e os resultados mostram que o fluxo de múons é máximo a uma altitude de aproximadamente 15 km. [O.C. Allkofer, Introduction to Cosmic Radiation (University of Kiel, Germany, 1975).] Como é de se esperar, quanto mais próximo da superfície terrestre, menor o fluxo de múons observado.

## 2 Vida média do múon

O múon é uma partícula instável ....

O processo de decaimento do múon é intrinsecamente aleatório. Isso quer dizer que cada múon tem uma probabilidade de decair num dado instante. Ou seja, não podemos dizer a vida média de um *dado* múon; a desintegração do múon é estatística.

[...falar que a vida média não é afetada por medir só no fim...]

Sendo  $N$  o número de partículas e  $t$  o instante de tempo, tem-se que <sup>2</sup>

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (3)$$

onde  $\lambda$  é uma constante de proporcionalidade. Resolvendo a equação, temos como solução

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (4)$$

[é melhor usar  $A$  ou  $N_0$  mesmo?]

onde  $A$  é uma constante obtida a partir das condições iniciais impostas (isto é, de algum ponto inicial). Para se ter uma função de probabilidade, é necessário que

$$b \cdot \int_0^\infty N(t) dt = 1 \quad (5)$$

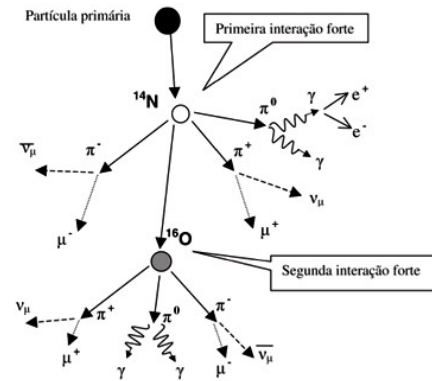


Figura 1: Exemplo de chuueiros atmosféricos na atmosfera terrestre.

<sup>1</sup>Por causa do campo magnético terrestre, os raios cósmicos podem ser defletidos e adentram na atmosfera com múltiplas inclinações.

<sup>2</sup>Pode-se pensar essa equação como “o decrescimento do número de indivíduos que se têm agora é diretamente proporcional à quantidade atual”.

onde a constante  $b$  é chamada de constante de normalização. Nesse caso, calculando a integral, encontra-se

$$b \frac{N_0}{\lambda} = 1 \Rightarrow b = \frac{\lambda}{N_0} \quad (6)$$

Agora, pode-se calcular a vida média a partir do valor esperado<sup>3</sup> para a distribuição:

$$\tau = E[X] = \int_0^\infty b \cdot t \cdot N(t) dt = \int_0^\infty b \cdot t \cdot N_0 e^{-\lambda t} dt = \int_0^\infty \lambda t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (7)$$

Resultando em<sup>4</sup>

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (8)$$

Escreve-se, portanto,

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (9)$$

Devido ao ruído de fundo no experimento (chuveiros atmosféricos de outras partículas, ruído térmico da PMT, pulsos espúrios, múons e elétrons da radiação cósmica local), a exponencial desloca-se verticalmente. Isso porque, para um tempo longo o suficiente, a exponencial se aproxima de uma constante numérica. Ou seja, os resultados com tempo suficientemente grande serão bem encaixados numa constante. Por causa disso, adiciona-se uma constante  $C$  ao resultado, e o modelo fica sendo [eu não entendi isso aqui]

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + C. \quad (10)$$

### 3 Relatividade Especial e Múons

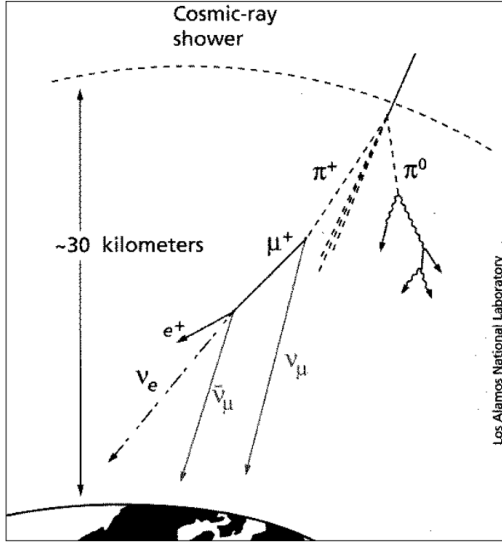


Figura 2: Píon resultante dos chuueiros atmosféricos decaindo em múon.

A massa do múon é conhecida e vale  $105.658 MeV/c^2$ . A vida média dele é de aproximadamente  $2.197 \mu s$ . A energia cinética do múon próximo ao nível do mar é de aproximadamente  $4 GeV$ , o que dá uma velocidade *muito próxima* à velocidade da luz.

Considerando que ele viaja com a velocidade da luz, ele demoraria cerca de  $50 \mu s$  para atravessar a atmosfera,  $15 km$  acima, até o solo (o que é muito acima do seu tempo médio de vida).

Pensando em quantidades, com esse tempo decorrido, tomando como base a (9),

$$\frac{N}{N_0} = e^{-50/2.197} \approx 10^{-10} \quad (11)$$

significando que quase nenhum dos múons chegaria — ou seja, praticamente impossível.

Isso, na verdade, é possível de acontecer se forem considerados os fenômenos relativísticos. No caso, considerando a dilatação do tempo, teremos que o tempo de vida médio precisa ser medido no referencial do múon e não no referencial da terra (de laboratório). A correspondência se dá pelo fator de Lorentz, de modo que

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0 \Rightarrow t = \gamma \tau \quad (12)$$

<sup>3</sup>O valor esperado para uma distribuição contínua é  $E[X] \stackrel{\text{def}}{=} \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx = \int_0^{\infty} x f(x) dx$  para a distribuição, porque a integral é nula de  $-\infty$  até  $0$ . É interessante notar que, no caso, o decaimento exponencial é apenas um múltiplo escalar da distribuição exponencial.

<sup>4</sup>Nota: “meia-vida” e “vida-média” não se referem à mesma propriedade. A relação entre o tempo de meia-vida (o quanto demora para que metade decaia) e o tempo de vida médio é  $t_{1/2} = \tau \ln(2)$ .

onde

$$\gamma = \frac{E_\mu}{m_\mu c^2} = \frac{4000}{105.658} \approx 37.86 \quad (13)$$

Refazendo agora a estimativa para a relatividade, temos

$$\frac{N}{N_0} = e^{-50/(37.86 \cdot 2.197)} \approx 55\% \quad (14)$$

que é um resultado bem mais condizente com a realidade observada.

### 3.1 PMT

## 4 Montagem Experimental

Para a realização do experimento, foi usado um tanque cintilador de plástico, uma fonte de alta tensão, uma fotomultiplicadora, um osciloscópio e um computador.

O objetivo do experimento gira em torno de detectar dois pulsos dentro do cintilador: um para o múon e outro para o elétron<sup>5</sup>. Para isso, um osciloscópio foi usado para monitorar as tensões e gravar as *waveforms* — os sinais dos pulsos — no computador. [escrever nota para seção da análise de dados]

O fenômeno da cintilação no detector ocorre pela passagem de uma partícula carregada por ele. Essa partícula consegue excitar os elétrons do material e elevar o nível energético deles, ao mesmo tempo que perde um pouco de sua energia (isto é, parte da energia é depositada no cintilador). No processo de de-excitação, os elétrons do material emitem fótons de baixa energia. A quantidade de fótons é proporcional ao número de partículas carregadas incidentes, embora por si só não são capazes de produzir um valor de tensão que possa ser medido — para isso são usadas as fotomultiplicadoras; vide [seção das fotomultiplicadoras]. [variação do dipolo  $-i$  emitir fótons?]

Cintiladores de plástico fazem parte do grupo dos detectores mais simples e mais fáceis de usar hoje em dia. Eles são feitos de um material que é muito flexível para a produção, podendo ser facilmente fabricados com basicamente qualquer tipo de forma, espessura, tamanho etc. e são relativamente baratos. Além disso, para efeitos de aplicação, eles possuem uma rápida resposta de sinal (da ordem de alguns *ns*) e uma relativamente alta produção de luz — em relação a outros tipos.

Os múons que chegam à superfície da terra (como já discutido antes na [referenciar seção]) possuem velocidades próximas à da luz — ou seja, possuem altas energias. Por causa disso, podemos considerar que eles estão na seção de mínimo ionizante<sup>6</sup>. Segundo [referenciar autor], esse valor de energia ocorre por volta de  $v \approx 0.96c$  o que, para o múon, corresponde a uma energia de

$$E_{\mu,min} = (\gamma - 1)m_\mu c^2 = \left( \frac{1}{\sqrt{1 - 0.96^2}} - 1 \right) \cdot 105.658 \approx 300 MeV \quad (15)$$

Para cintiladores de plástico, como o que foi usado nesse experimento, a deposição de energia na região do mínimo ionizante tem o valor  $dE/dx \approx 1.9 MeV/gcm^2$ . Como nessa região a energia depositada  $dE/dx$  é praticamente constante para o intervalo de valores, tem-se que

$$\Delta E = \int_0^L \frac{dE}{dx} dx \approx \frac{dE}{dx} x = 1.9 \cdot 1.03 \cdot 10 = 19.57 MeV \quad (16)$$

considerando que a densidade do cintilador é de  $1.03 g/cm^3$  e que o cintilador tem uma espessura  $L = 10 cm$ . Esse resultado expressa a energia média depositada dentro do detector. [substituir os valores para o

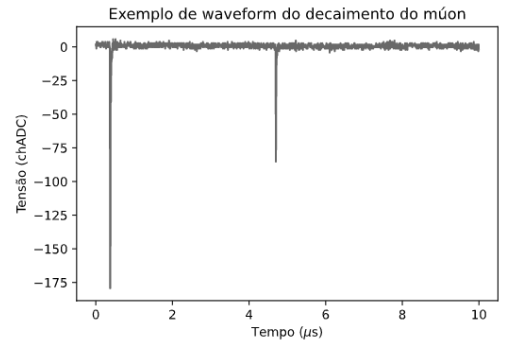


Figura 3: Exemplo de *waveform* coletada. Pode-se ver o primeiro pulso relativo ao múon e o segundo, ao elétron.

<sup>5</sup>Ou para o anti-múon, ou para o anti-elétron, conforme os decaimentos expressos em (1) e (2)

<sup>6</sup>Partículas no chamado “mínimo ionizante” são partículas que produzem o mínimo de deposição da fórmula de Bethe-Bloch. [marcar referência]

nosso cintilador aqui] Com essa perda de energia, espera-se que os múons consigam ser freados ou que parem de vez dentro do tanque, para poder ser observado o seu decaimento em um elétron (ou pósitron; vide (1) e (2)) dentro do cintilador. [o múon para dentro do cintilador?]

[escrever sobre muons inclinados, muons que decaem na borda, como filtrar um bom evento etc]

Considerando que o cintilador possui uma taxa de produção de 9000 [número inventado] fótons/ $MeV$ , tem-se, usando (16), que cerca de 175 mil fótons são produzidos para cada múon que atravessa o cintilador. Esses fótons são distribuídos em todas as direções e uma parcela dos fótons produzidos é refletida em direção à fotomultiplicadora, que é acoplada ao cintilador.

A fotomultiplicadora (do inglês, *photomultiplier tube*, ou simplesmente PMT) tem a função de coletar os fótons produzidos e guiá-los. Além disso, ela também é responsável por converter os fótons que chegam a ela em elétrons (para poder ter um sinal elétrico, com tensão) para ser sensível aos equipamentos de medição.

Durante seu funcionamento, uma fonte de alta tensão alimenta o cátodo, os dinodos e os anodos da PMT, criando uma espécie de “escada” de potencial dentro do tubo. Os fótons incidentes tendem a excitar os primeiros elétrons que, por efeito fotoelétrico, acabam escapando. Daí, por causa da ddp, eles são acelerados e guiados pelo campo elétrico e colidem com novos elétrons do primeiro dinodo, que também tendem a se desprender. O processo continua, cada vez com mais elétrons, como uma cascata em direção ao anodo, onde são coletados como uma corrente elétrica, amplificados e, enfim, capazes de serem analisados.

[escrever sobre os ruídos e problemas associados à PMT]

O objetivo, enfim, está concluído: ao se observar dois picos de sinal elétrico no osciloscópio (gerados no cintilador e convertido na PMT) — claro, impondo algumas condições de *trigger* e de discriminação, para se saber se realmente se trata de um evento de múon [escrever referência para a seção] —, pode-se medir a diferença de tempo entre eles e, então, utilizando uma regressão exponencial, encontrar a vida média do múon.

É importante notar que a PMT está longe de ter uma eficiência de 100%. O rendimento também varia com o comprimento de onda do fóton incidente<sup>7</sup>, mas tem seu valor máximo da ordem de 10-30%. Contudo, conhecendo seu rendimento e a taxa de produção do cintilador, pode-se não só detectar a presença ou ausência de uma partícula, mas também de saber a energia depositada. Isso é particularmente útil quando se está interessado em saber qual partícula passou no detector, já que cada partícula deixa como assinatura um depósito de energia diferente. [isso está correto?]

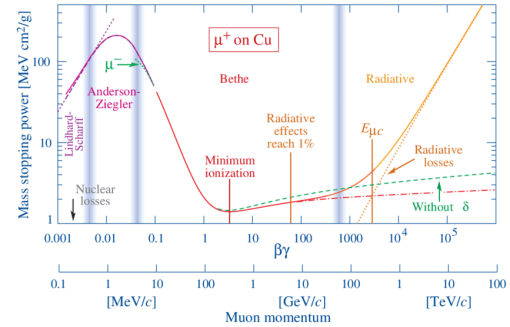


Figura 4: Curva de deposição de energia do múon. A região do mínimo ionizante se encontra por volta dos 300 MeV de energia.

## 5 Análise dos Dados e Resultados

Para contemplar a obtenção e análise dos dados experimentais, foram desenvolvidos dois códigos em linguagem Python com as seguintes finalidades:

- Aquisição de dados, por meio do aparato experimental e do osciloscópio
- Análise de dados, onde foi feita a análise para calcular a vida média do múon e os valores depositados de energia

Com os dados adquiridos, fez-se uma regressão exponencial para obter as constantes da expressão [número da equação] — que dará, como um dos valores, a vida média do múon. Seguem os resultados:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t}(t) = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + C$$

Como explicitado acima, o resultado obtido é uma vida média  $\tau = 2.168 \pm 0.009 \mu s$  para o múon. O resultado se mostra insatisfatório, pois, comparando com o valor do PDG<sup>8</sup> ( $\tau = 2.1969811 \pm 0.0000022 \mu s$ ), o resultado está fora da incerteza, embora esteja consideravelmente perto.

<sup>7</sup>Isso é o que se chama *eficiência quântica*

<sup>8</sup>Fonte: <https://pdg.lbl.gov/2020/listings/rpp2020-list-muon.pdf>; página 2

Constante	Valor	Incerteza
$A$	253.731	0.488
$\tau(\mu s)$	2.168	0.009
$C$	1.010	0.238

Tabela 1: Constante dos valores encontrados na regressão

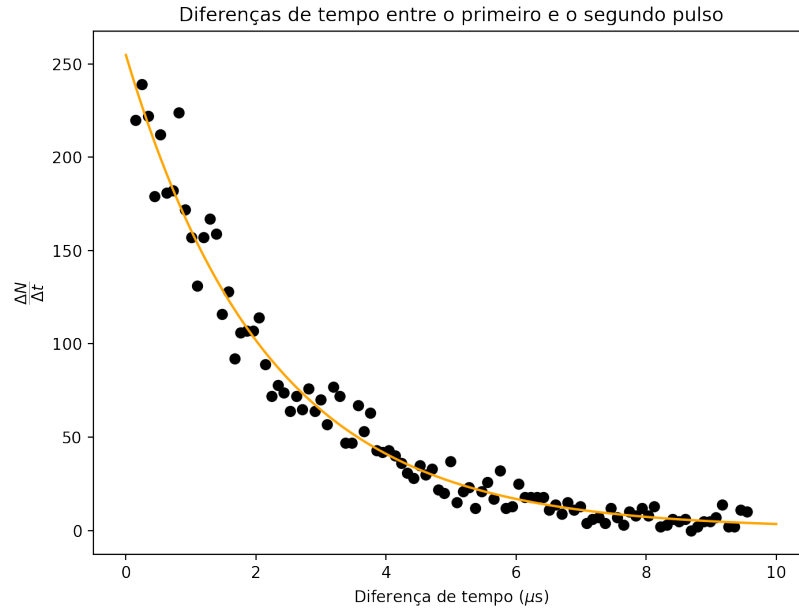


Figura 6: Diferença de tempo entre os picos do múon e do elétron detectados.

Para estimar os valores do depósito de energia, uma outra parte de código foi desenvolvida com o objetivo de montar o espectro de amplitude e de carga para cada um dos pulsos relativos às partículas (isto é, para o múon e para o elétron gerado no decaimento), como segue:

Podemos observar, em ambos os espectros de amplitude, um valor que está notoriamente em destaque. De fato, olhando nos resultados detalhados da análise, vê-se que cerca de 90% de todos os eventos coletados apresentam um único (e exatamente o mesmo) valor de amplitude. Ou seja, os valores de amplitude ficaram limitados a um valor máximo na hora da coleta dos dados. Isso indica que houve uma espécie de “saturação” nos dados. Filtrando<sup>9</sup> os valores saturados, pode-se observar com um pouco mais de detalhe cada um dos espectros.

Observa-se, agora, que cada um dos espectros de amplitude está melhor distribuído e não mais concentrado num só valor. Também observa-se o espectro de carga com um novo comportamento [... Falar do espectro de Michael ...]

## 6 Conclusão

Durante o semestre as partes de estudo, desenvolvimento... do cronograma do projeto foram executadas... e obtivemos.... resultados.

No próximo semestre estudaremos e realizaremos....

<sup>9</sup>A filtragem elimina apenas as partes saturadas; se um evento apresenta saturação em apenas um dos picos, ele não é descartado por inteiro, mas só a parte saturada.

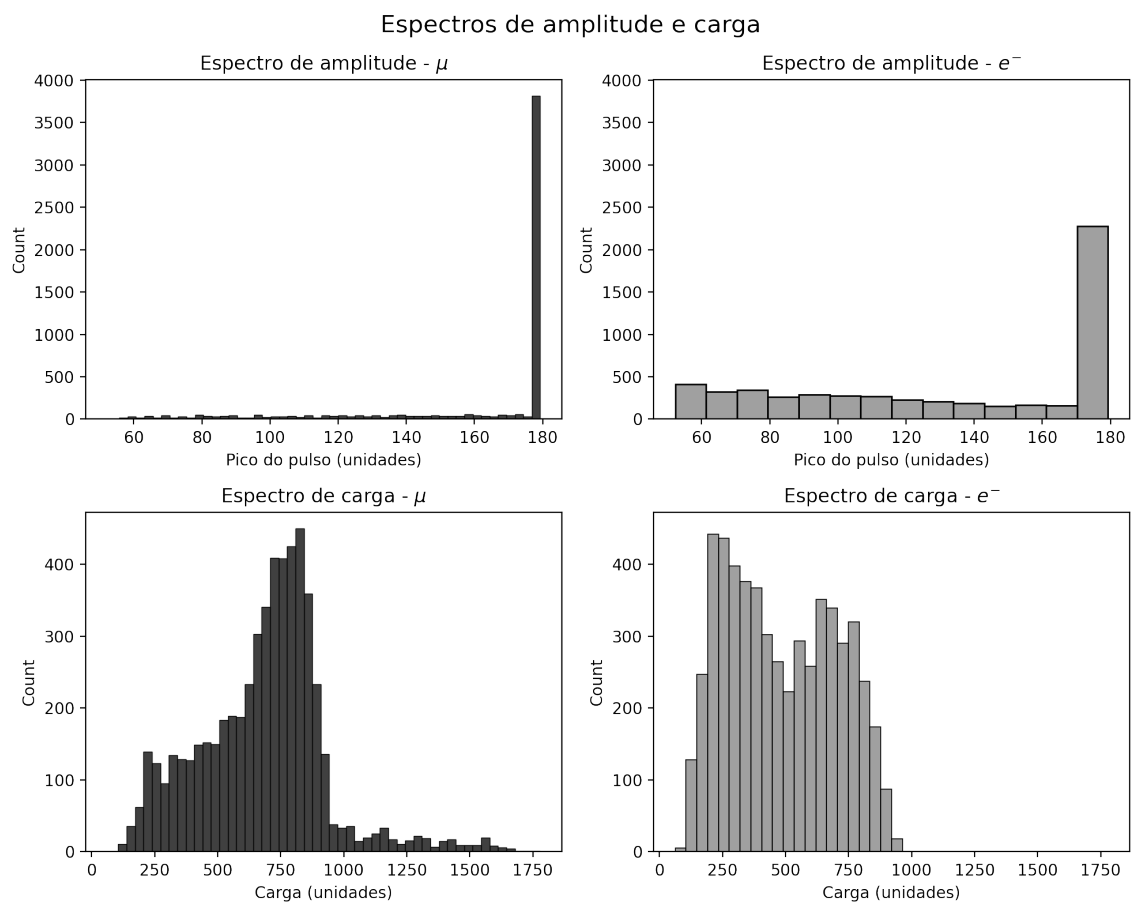


Figura 7: Diferença de tempo entre os picos do múon e do elétron detectados.

## Referências

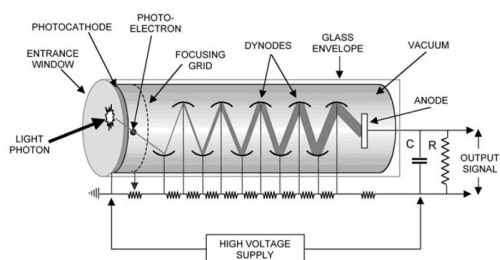


Figura 5: Esquema de uma PMT. Observe como a alta tensão é usada como uma escada de potencial para cada um dos passos do divisor de tensão.



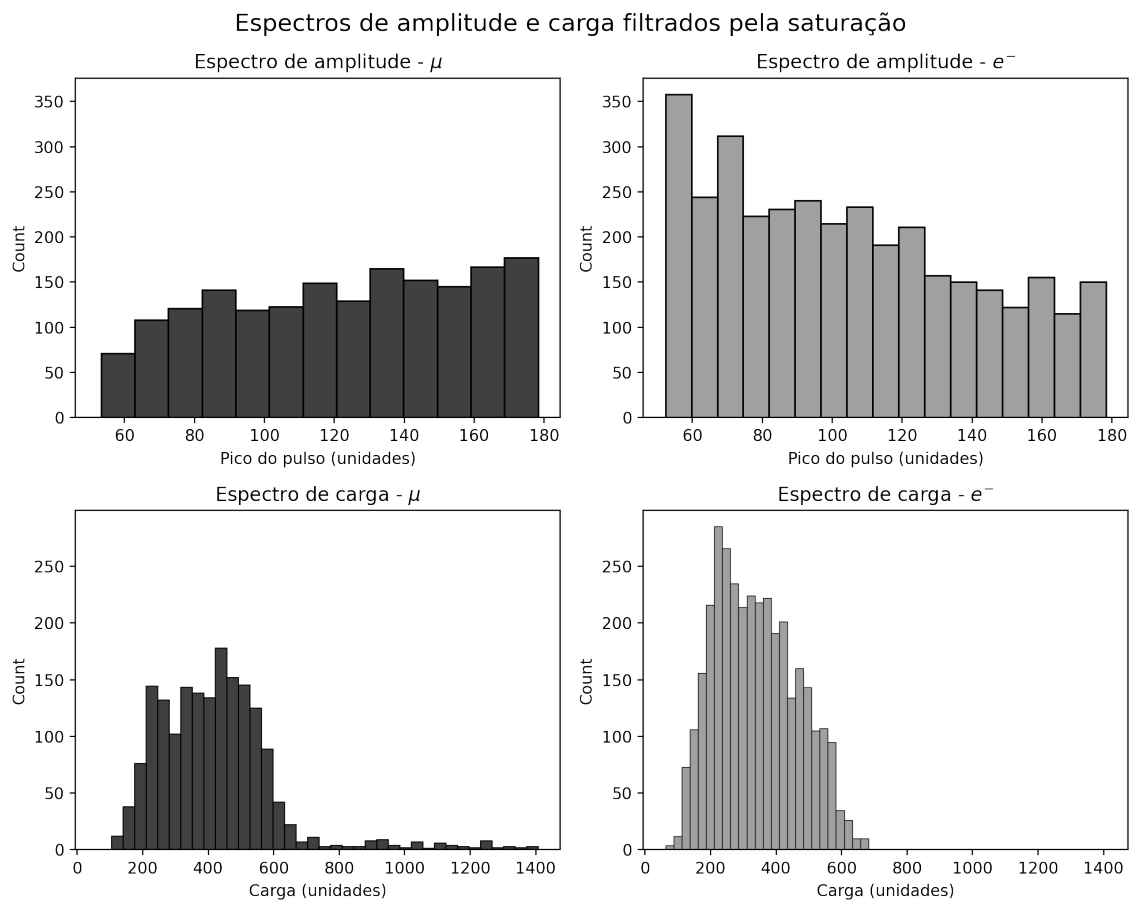


Figura 8: Diferença de tempo entre os picos após eliminar as saturações.