

Técnicas Experimentais em Física de Altas Energias

Fotomultiplicadoras

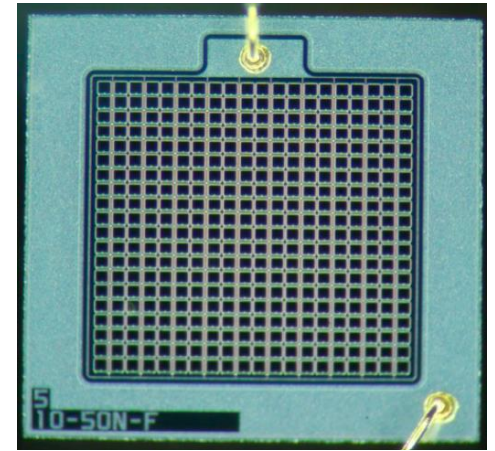
Bibliografía

- W. R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Springer-Verlag. **Capítulo 8.**
- G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, Wiley&Sons 1989. **Capítulo 9.**
- HAMMAMATSU Learning Center.
<http://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/>
- M. Tanabashi et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D 98, 030001 (2018) <http://pdg.lbl.gov/2019/reviews/rpp2018-rev-particle-detectors-accel.pdf>

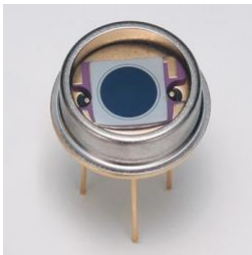
Fotosensores



Fotomultiplicadoras
Photomultipliers tubes - PMTs



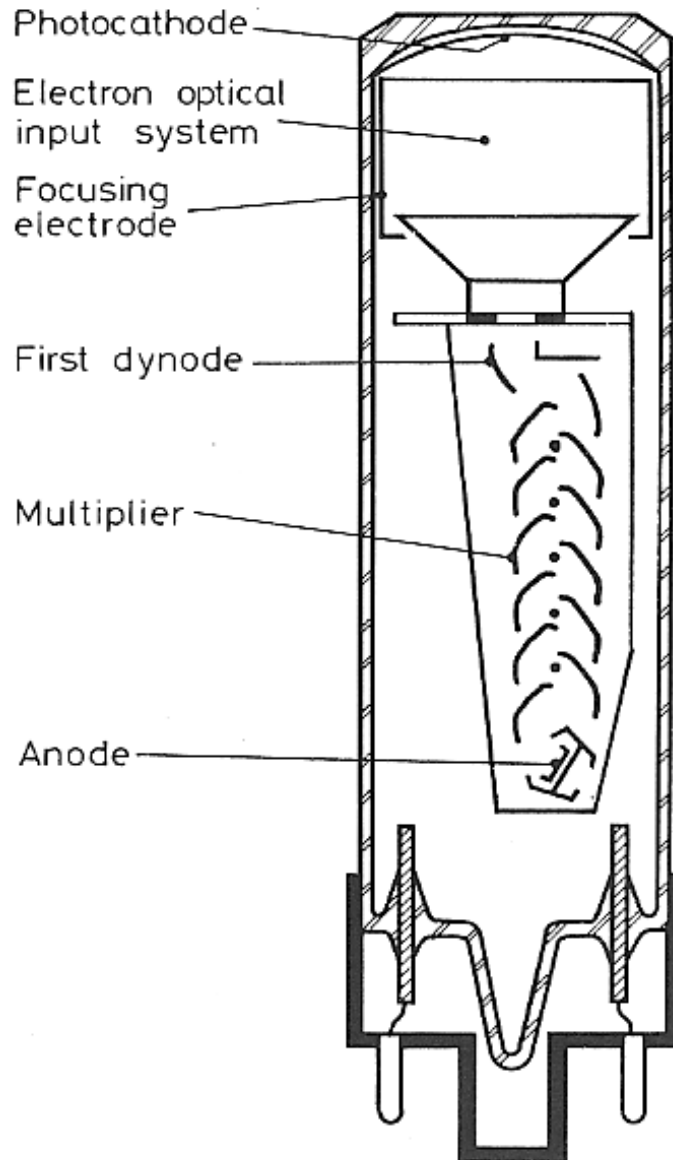
Silicon Photomultiplier
SiPM



Avalanche Photodiodes
APD



Construção e Operação



- Uma alta voltagem é aplicada no cátodo, dinodos e ânodo formando uma escada de potencial.
- O fotoelétron emitido pelo cátodo é dirigido para o estágio de multiplicação produzindo um efeito cascata.
- Os elétrons são finalmente coletados pelo ânodo gerando uma corrente que pode ser amplificada e analisada.
- Pode ser operado no modo *contínuo* ou *pulso*.

Fotocátodo

O Material fotosensível é depositado formando uma fina camada no lado interno da janela da PMT, normalmente feita de vidro ou quartzo.

$$E = h\nu - \Phi$$

Eficiência quântica

$$\eta(\lambda) = \frac{\text{número de fótons liberados}}{\text{número de fótons incidentes}}$$

Sensibilidade radiante do cátodo

$$\mathcal{S}(I) = \frac{I_c}{P(I)}$$

← Corrente de fotelétrons emitida
← Potência luminosa incidente

$$\mathcal{S}(I) = I h(I) \frac{e}{hc} \quad \text{ou} \quad \mathcal{S}(I) = \frac{I h(I)}{1240} [A/W]$$

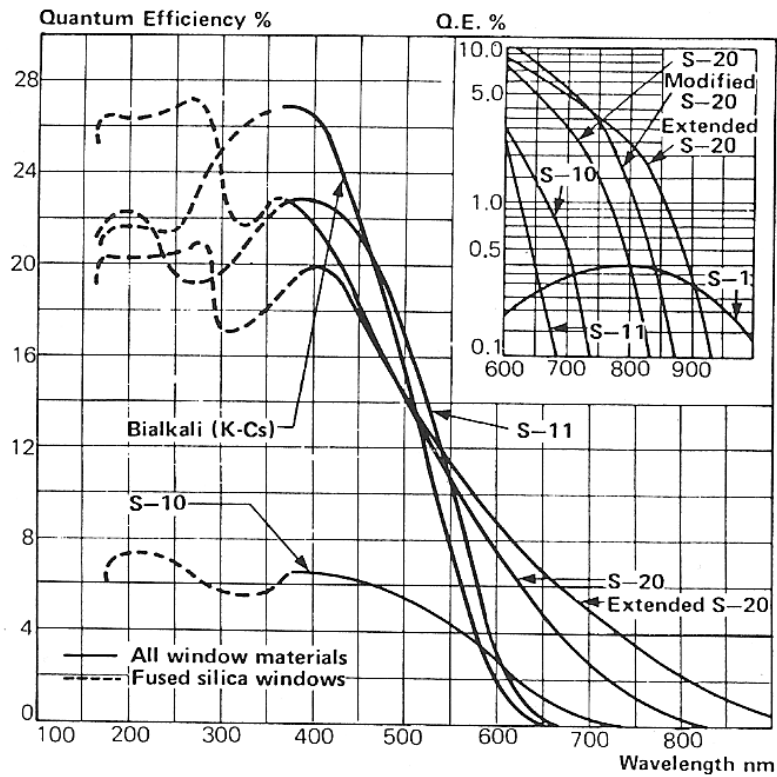


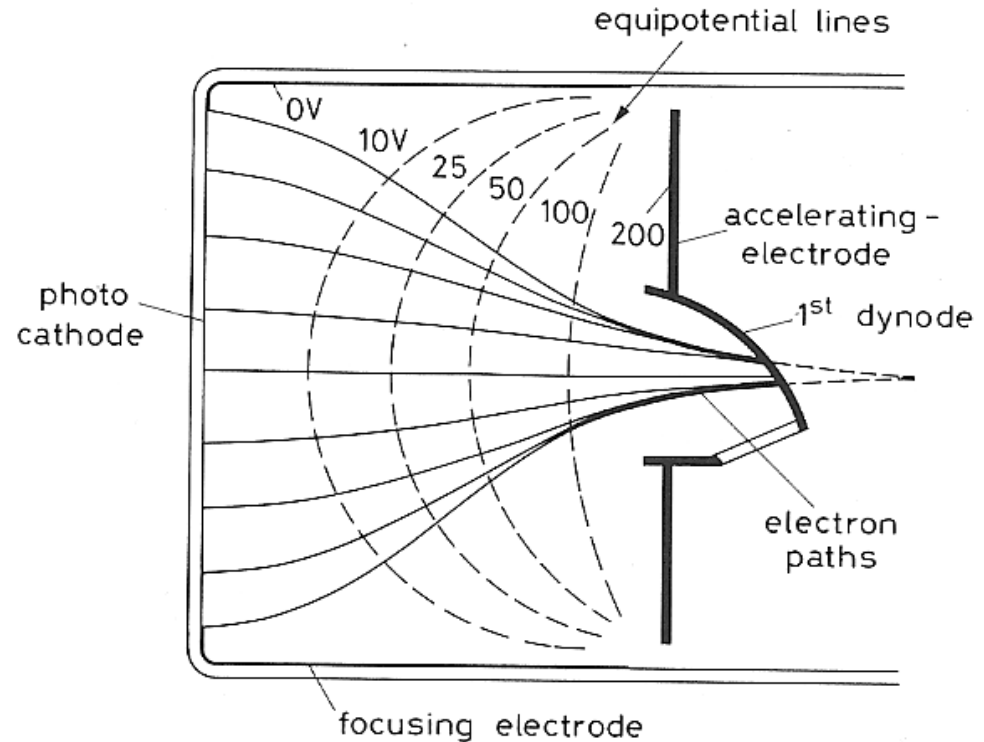
Fig. 8.2. Quantum efficiency of various photocathode materials (from EMI Catalog [8.2])

Table 8.1. Photocathode characteristics (from RTC catalog [8.3])

Cathode type	Composition	λ at peak response [nm]	Quantum efficiency at peak
S1 (C)	Ag - O - Cs	800	0.36
S4	SbCs	400	16
S11 (A)	SbCs	440	17
Super A	SbCs	440	22
S13 (U)	SbCs	440	17
S20 (T)	SbNa - KCs	420	20
S20R	SbNa - KCs	550	8
TU	SbNa - KCs	420	20
Bialkali	SbRb - Cs	420	26
Bialkali D	Sb - K - Cs	400	26
Bialkali DU	Sb - K - Cs	400	26
SB	Cs - Te	235	10

Sistema Ótico

1. A coleta deve ser o mais eficiente possível, independente do ponto de origem no cátodo.
1. O tempo que o elétrons leva para chegar ao estágio multiplicador deve ser independente do ponto de emissão.



Secção Multiplicadora

Amplifica a fraca fotocorrente primária usando uma série de eletrodos de emissão secundária (*dinodos*). O ganho de cada eletrodo é conhecido como *fator de emissão secundária*, δ .

O material constituinte dos dinodos são Ag-Mg, Cu-Be, Cs-Sb. Todos atendem aos seguintes critérios:

- Alto fator de emissão secundária;
- Estabilidade de emissão secundária sob altas correntes;
- Baixa emissão termoiônica.

A maior parte das fotomultiplicadoras possuem entre **10 e 14 dinodos**, ou estágios de multiplicação, com um ganho total de **até 10^7** .

Secção Multiplicadora – Configuração de Dinodos

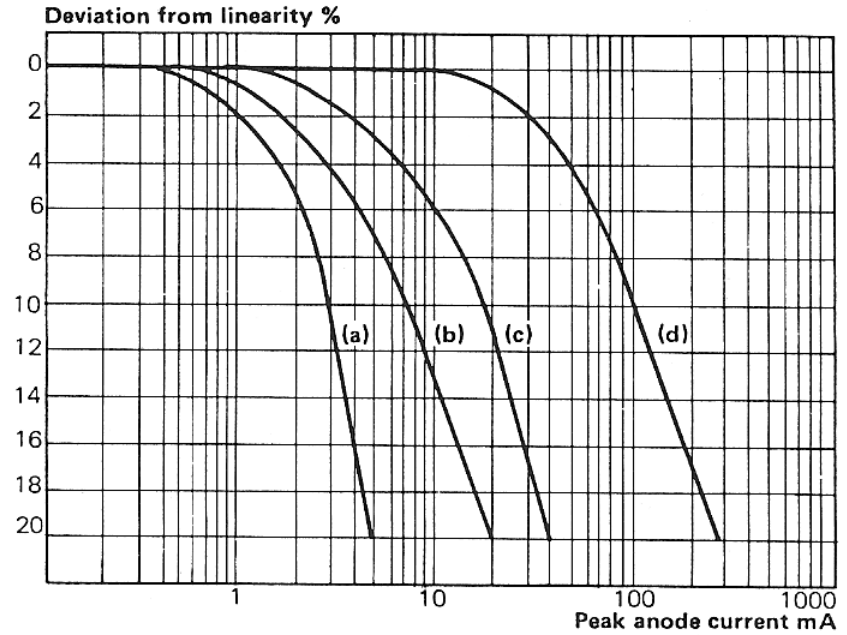
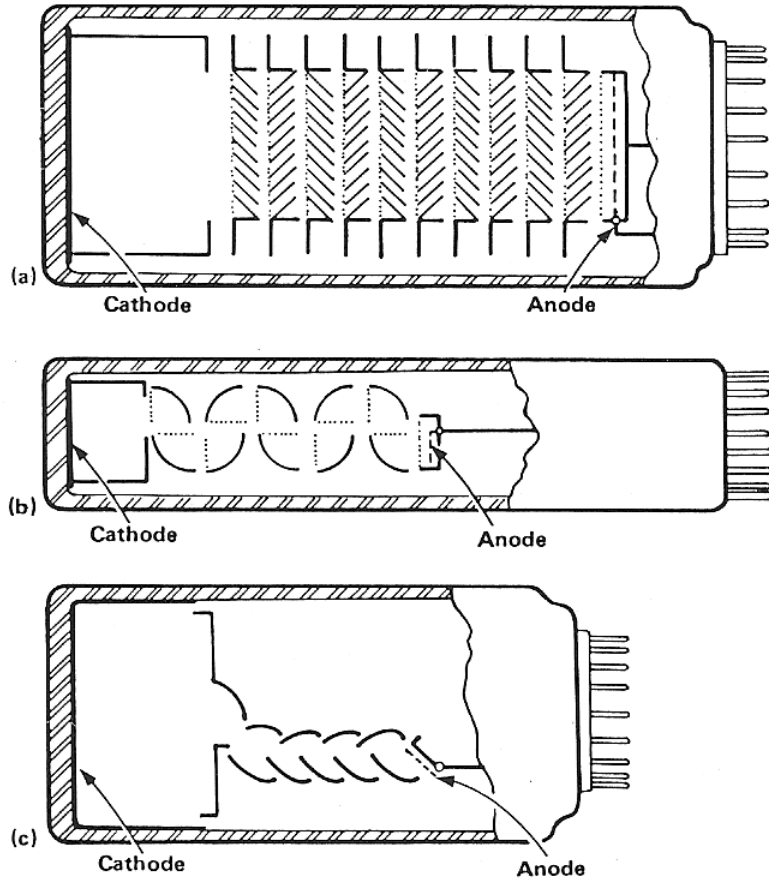
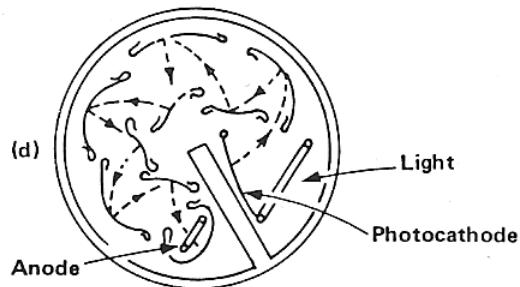


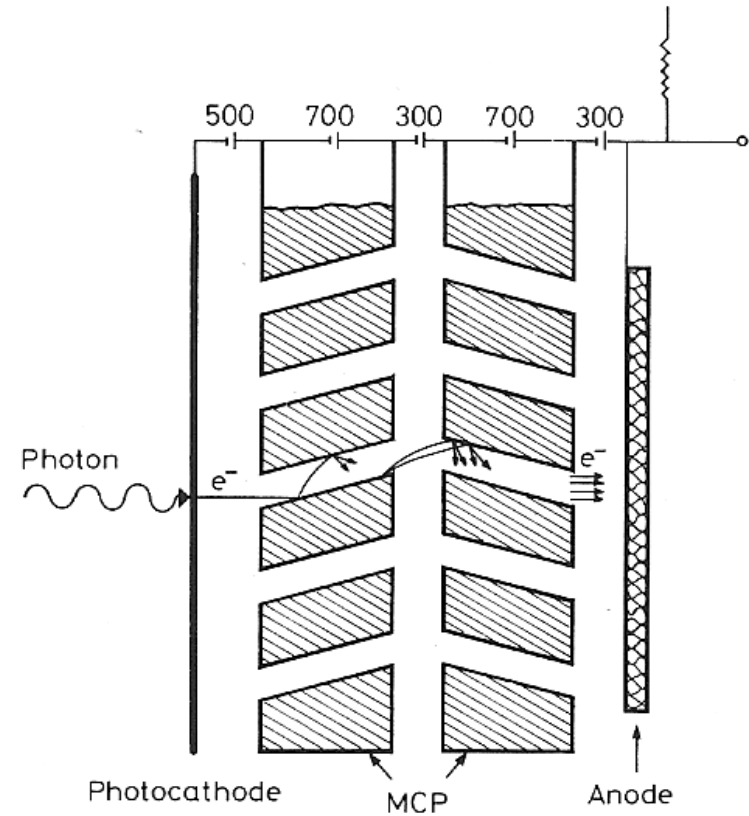
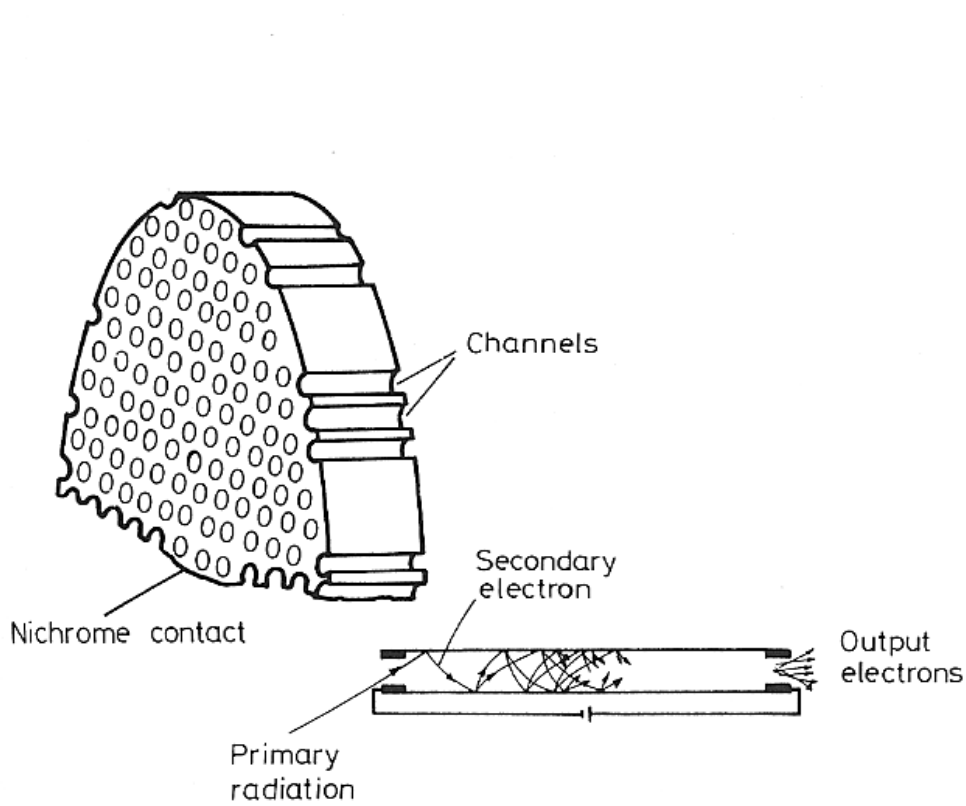
Fig. 8.5. Linearity of different dynode configurations: (a) box and grid, (b) venetian blind with standard voltage divider, (c) venetian blind with high current voltage divider, (d) linear focused with very high current divider (from *EMI Catalog* [8.2])



◀ **Fig. 8.4 a – d.** Various dynode configurations for PM's (from *EMI Catalog* [8.2]): (a) venetian blind, (b) box and grid, (c) linear focused, (d) side-on configuration

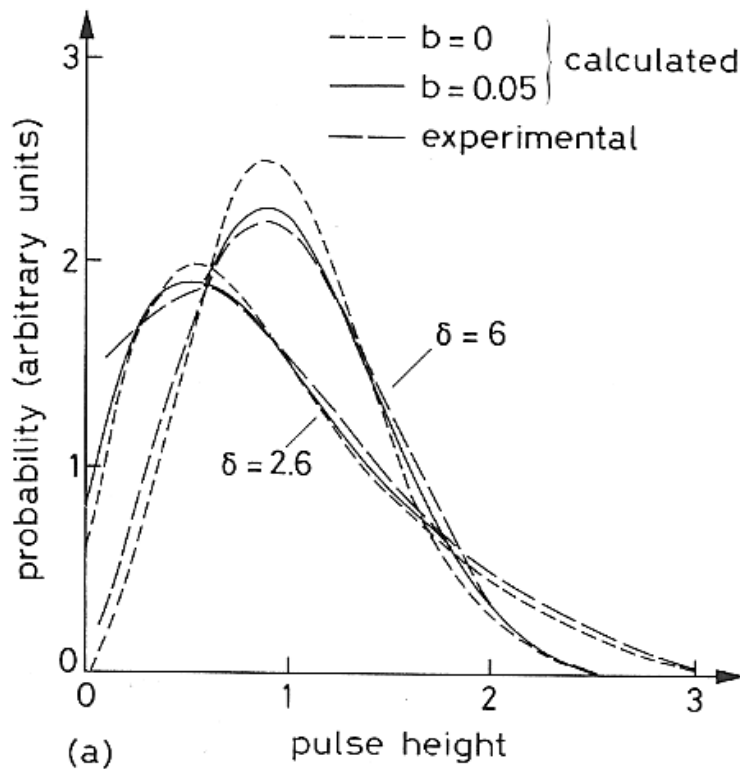
Secção Multiplicadora

Microchannel Plate Multiplier

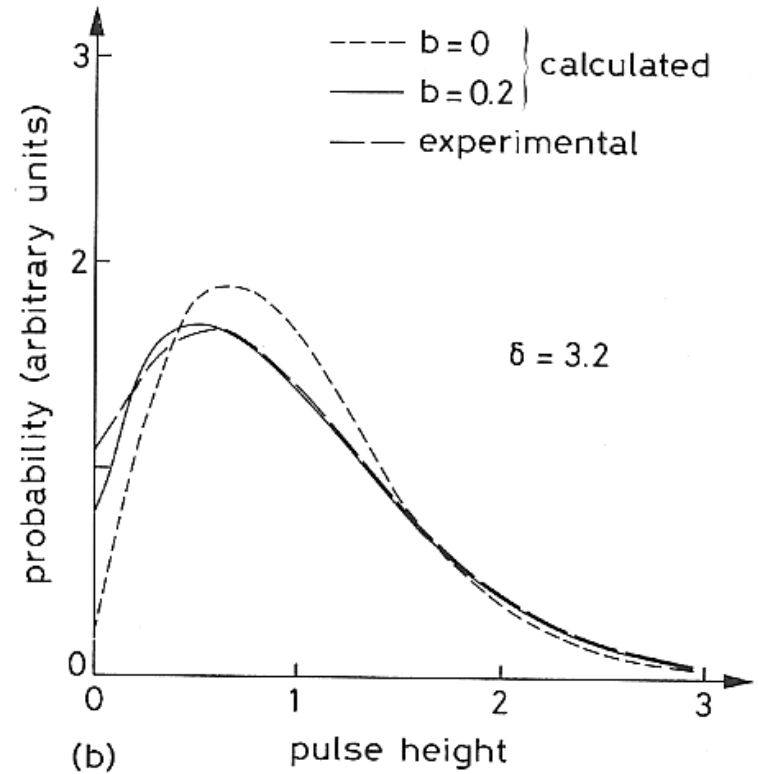


Espectro de um Fotoelétron

b : fator de não-uniformidade da superfície dos dinodos



Linear Focused



Venetian blind

Parâmetros de Operação – Ganho e Alta Voltagem

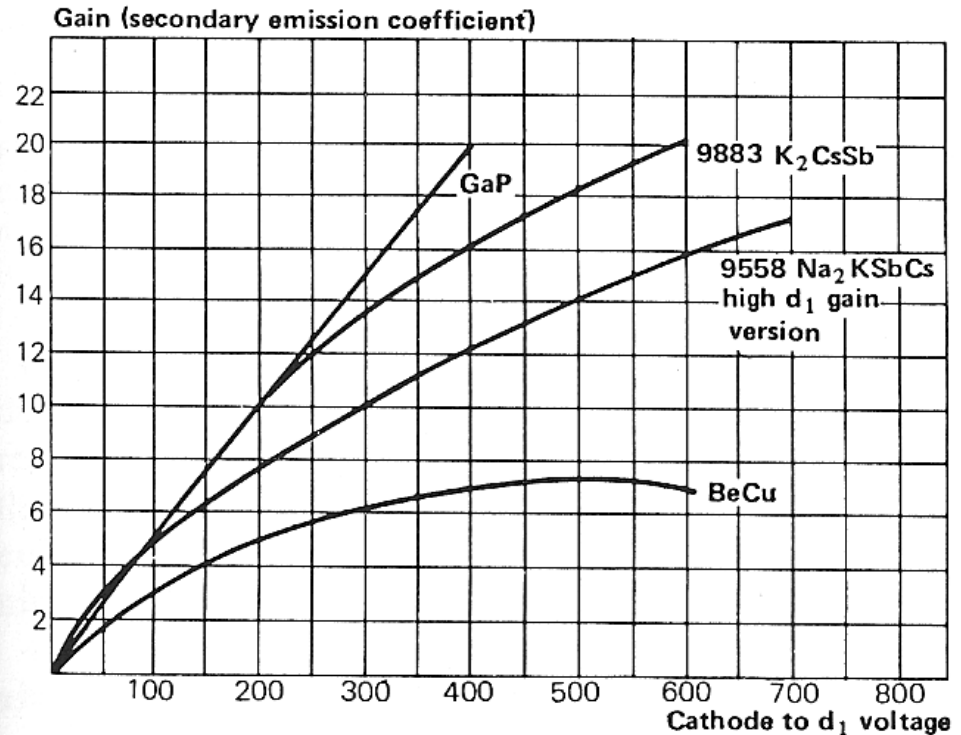
A energia dos elétrons incidentes em dinodo é uma função da diferença de potencial, V_d , entre os dinodos tal que pode-se escrever

$$\delta = KV_d \quad \text{onde } K \text{ é uma constante de proporcionalidade.}$$

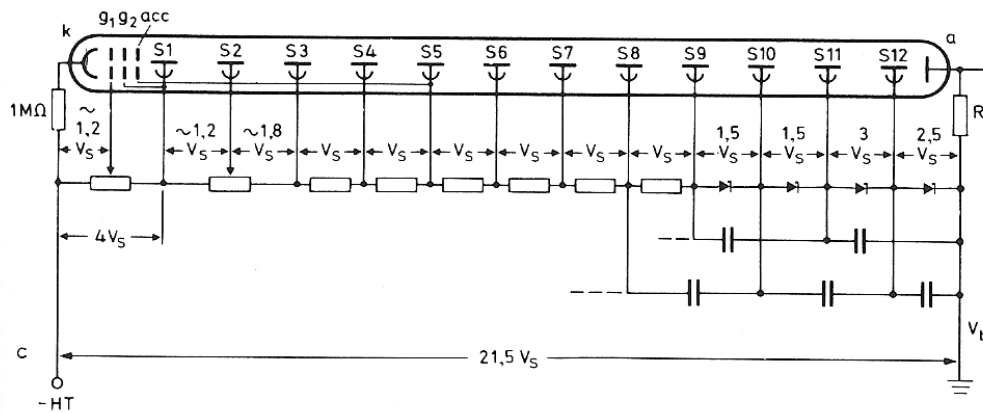
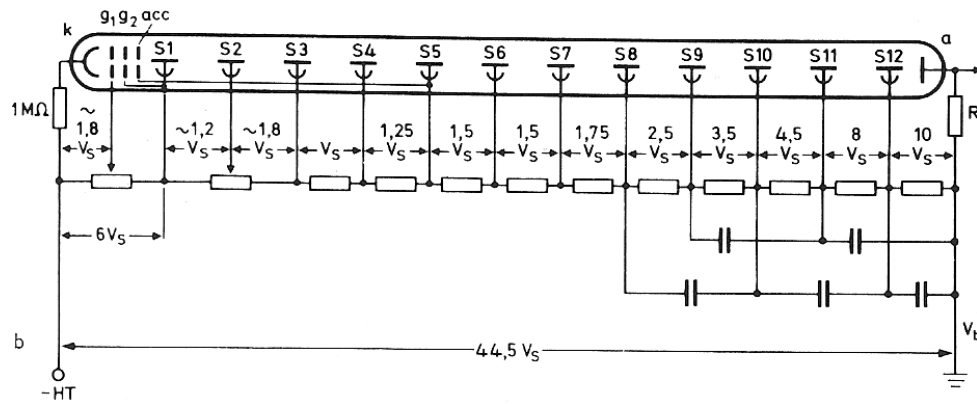
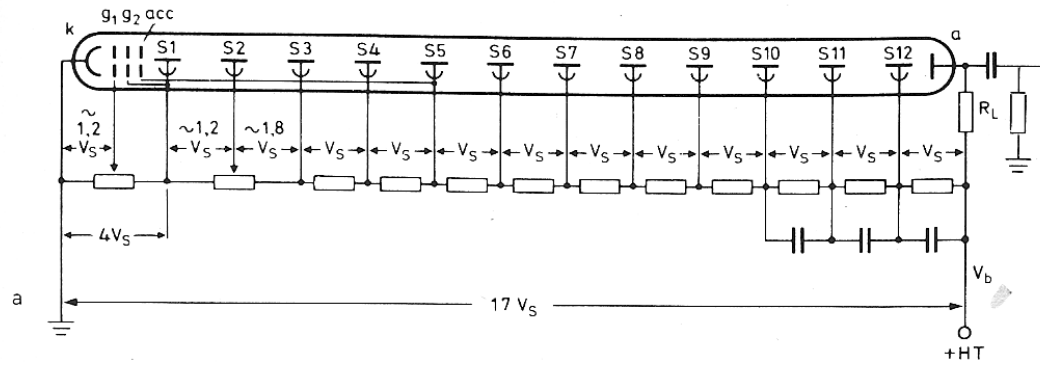
Supondo que a voltagem é igualmente dividida entre os dinodos, o ganho total pode ser escrito como

$$G = \delta^n = (KV_d)^n$$

Para $n = 10$ uma variação de 1% na voltagem implica uma variação de 10% no ganho. Por essa razão a fonte de alimentação deve ter alta precisão.

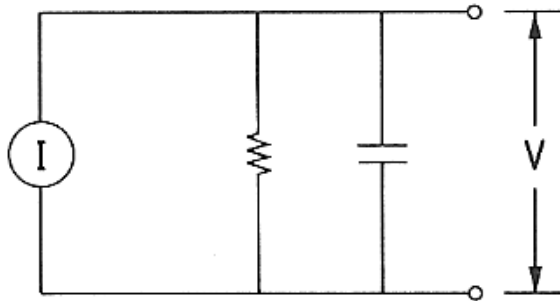


Parâmetros de Operação – Divisores de Tensão



Parâmetros de Operação – Forma do Pulso

A fotomultiplicadora é um gerador de corrente e pode ser representado como um elemento de circuito do tipo



Assumindo um fluxo de fótons de cintilação, descrita por um decaimento exponencial, a corrente no anodo será dada por

$$I(t) = \frac{GN_e}{\tau_s} \exp\left(\frac{-t}{\tau_s}\right)$$

Onde G é o ganho, N o número de fotoelétrons emitidos e τ_s a constante de decaimento do cintilador.

Parâmetros de Operação – Forma do Pulso

A corrente do circuito pode ser representado por

$$I(t) = \frac{V}{R} + C \frac{dV}{dt}$$

o que produz as soluções

$$V(t) = -\frac{GNeR}{\tau - \tau_s} \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad \text{para } \tau \neq \tau_s$$

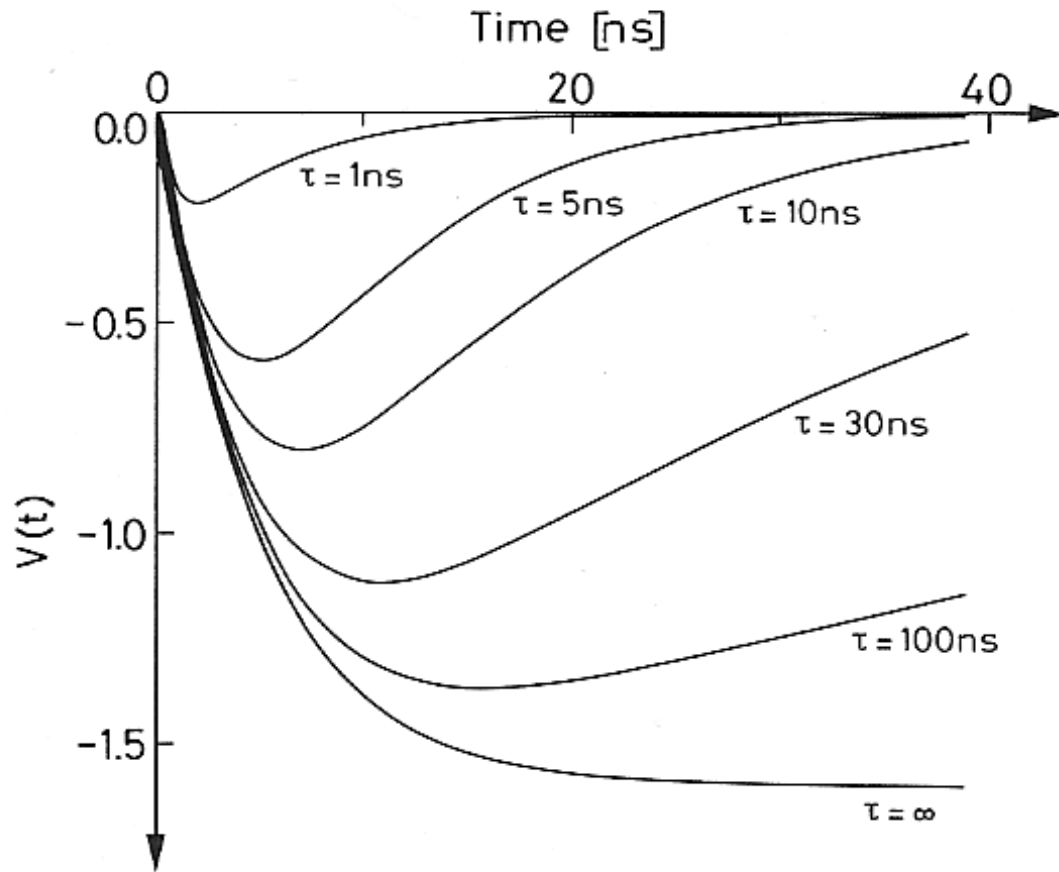
e

$$V(t) = \left(\frac{GNeR}{\tau_s^2} \right) t \exp\left(\frac{-t}{\tau_s}\right) \quad \text{para } \tau = \tau_s \quad \text{onde } \tau = RC$$

Para $\tau \ll \tau_s$ o sinal de saída é pequeno, mas reproduz fielmente o sinal do decaimento do sinal inicial. A subida do sinal (rise time) é rápida e é essencialmente dada pela constante τ . Este é conhecido como *modo corrente* de operação.

Para $\tau \gg \tau_s$ o sinal é grande assim como o tempo de decaimento que passa a ser controlado por τ . Em retorno, o tempo de subida é dominado por τ_s . Este conhecido como *modo voltagem* de operação, e é o mais comumente utilizado.

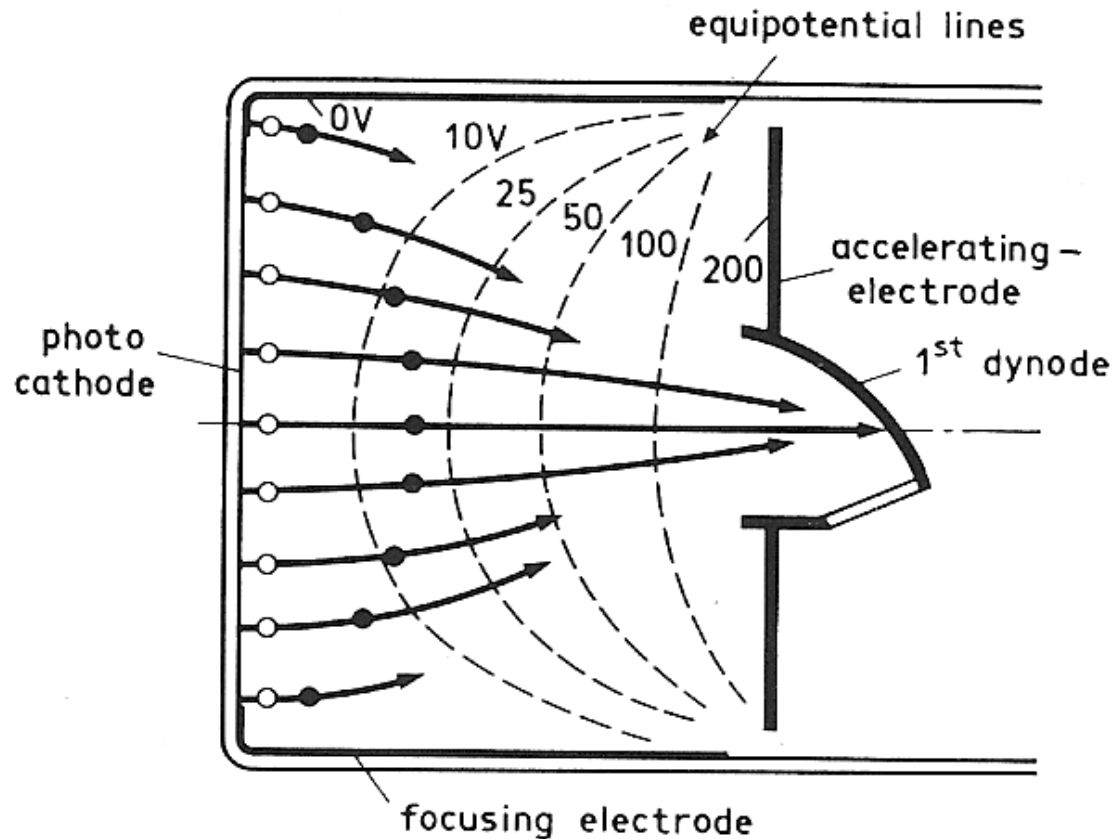
Parâmetros de Operação – Forma do Pulso



Tempo de Resposta

Dois principais fatores influenciam a resolução temporal das FM:

1. Variações devidos ao tempo de trânsito dos elétrons pela FM;
2. Flutuações estatísticas.



Ruídos

Mesmo quando a FM não está sendo iluminada há uma pequena corrente fluindo. Esta corrente é chamada *corrente escura* e pode ter várias origens

1. Emissão termo-iônica do cátodo e dos dinodos
2. Contaminação radioativa
3. Fenômenos luminosos
4. Fenômenos de ionização
5. Vazamento de corrente

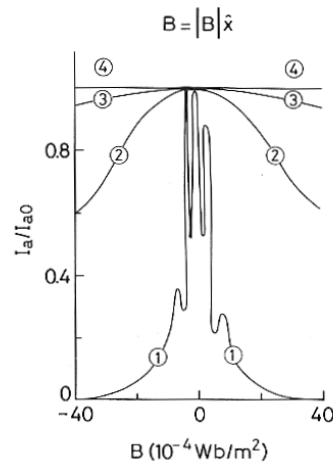
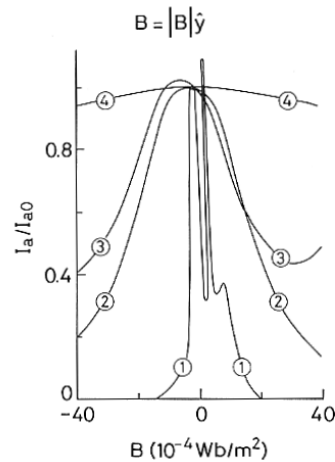
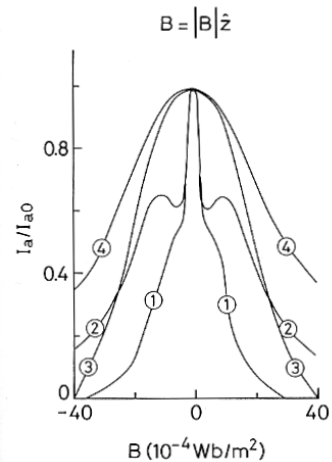
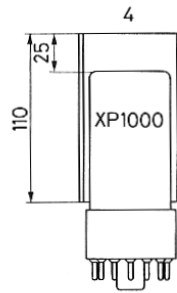
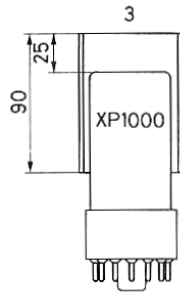
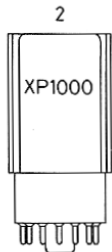
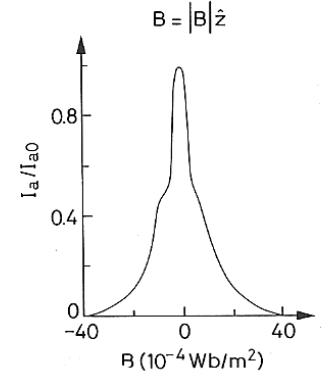
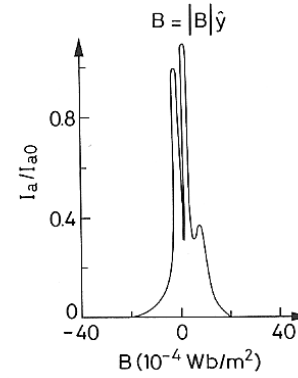
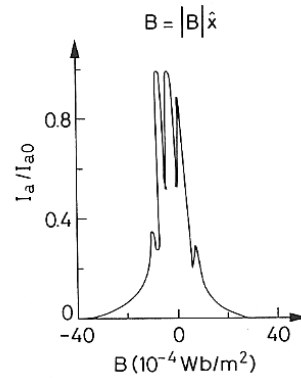
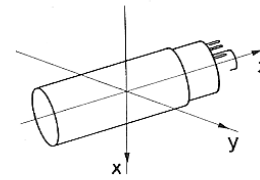
Em geral a corrente escura deve ser muito pequena na maior parte das FMs, não excedendo mais do que alguns nanoamperes

Fenômenos de *afterpulsing* estão também sujeitos a acontecer quando processos na multiplicação de elétrons acabam por criar um novo elétron do fotocátodo.

Fatores Externos

- As FMs não devem ser expostas à luz ambiente quanto alimentadas com voltagem. Isto pode ocasionar efeitos de instabilidade (fadiga) ou mesmo destruir completamente o dispositivo. Mesmo sem alimentação as FMs não devem ser iluminadas excessivamente. Um dos efeitos é o excesso de corrente escura no dispositivo por um certo período de tempo após o início da operação.
- Campos magnéticos são um dos fatores que mais impactam a performance das FMs. Um pequeno campo magnético é capaz de desviar os elétrons da cascata da sua trajetória ideal, alterando o ganho e a eficiência do dispositivo. O uso de uma blindagem de mu-metal é uma prática comum para reduzir os efeitos dos campos magnéticos.

Efeitos do campo magnético em função da sua orientação



Efeitos do campo magnético com o uso do mu-metal

Fatores Externos - Temperatura

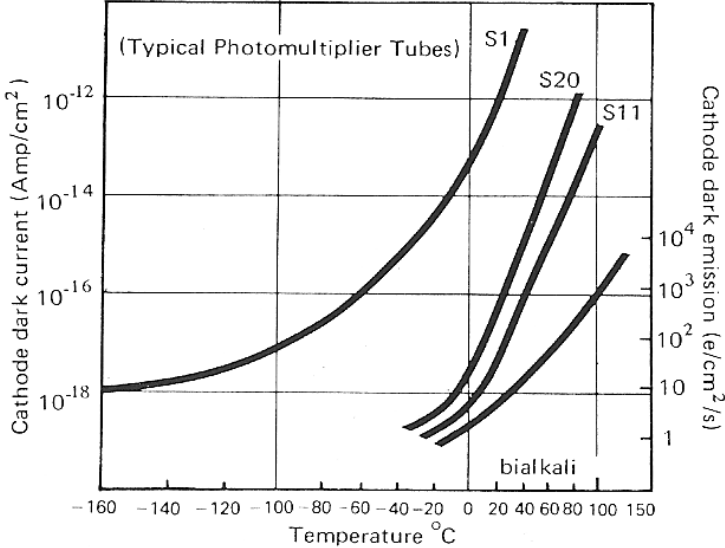


Fig. 8.19. Dark noise vs. temperature for various photocathodes (from *Wardle* [8.10])

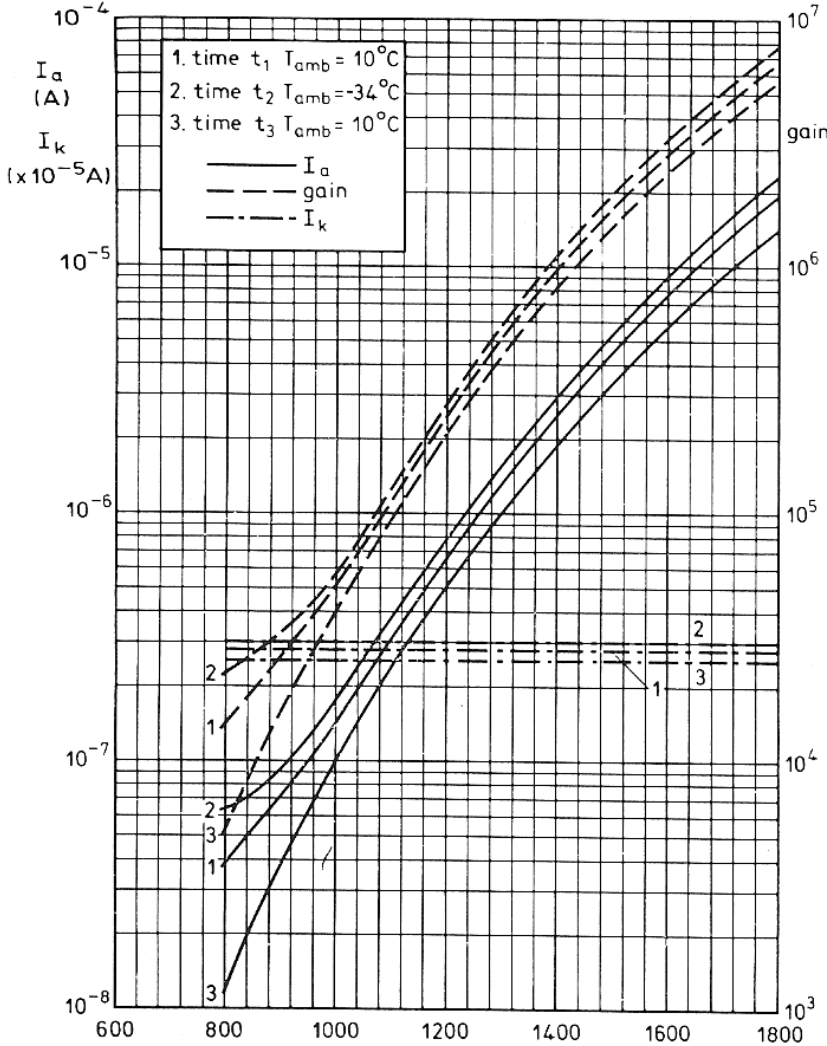
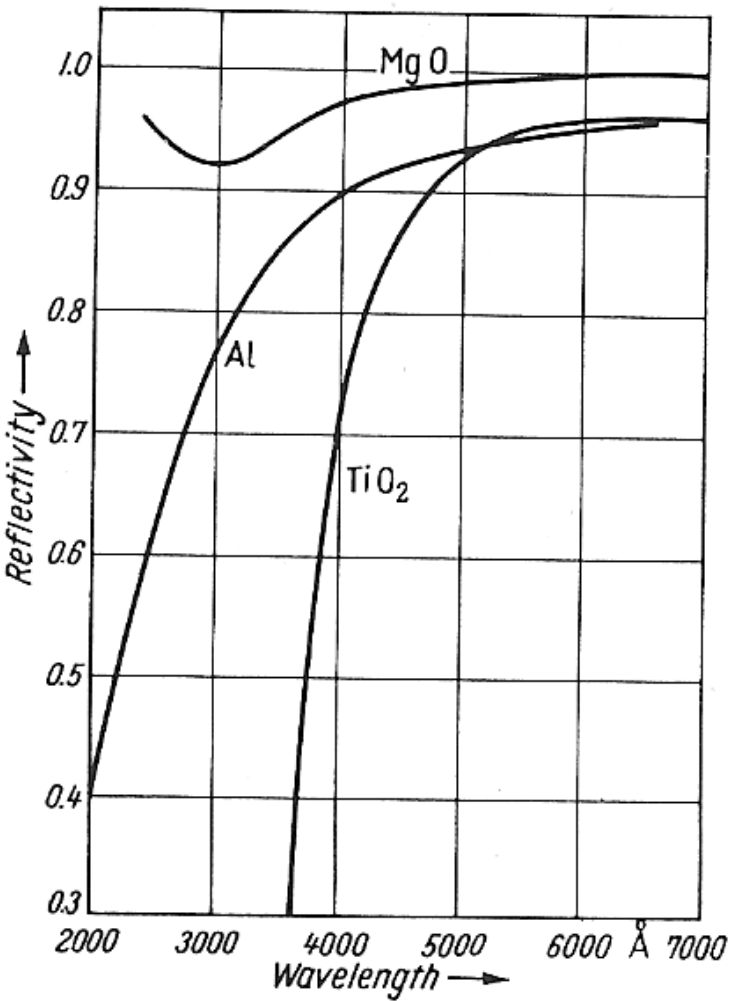
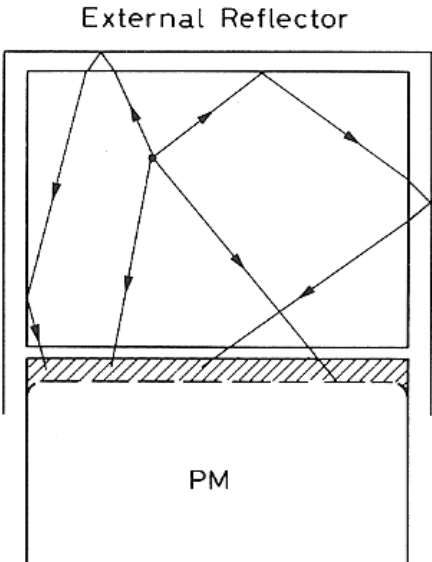
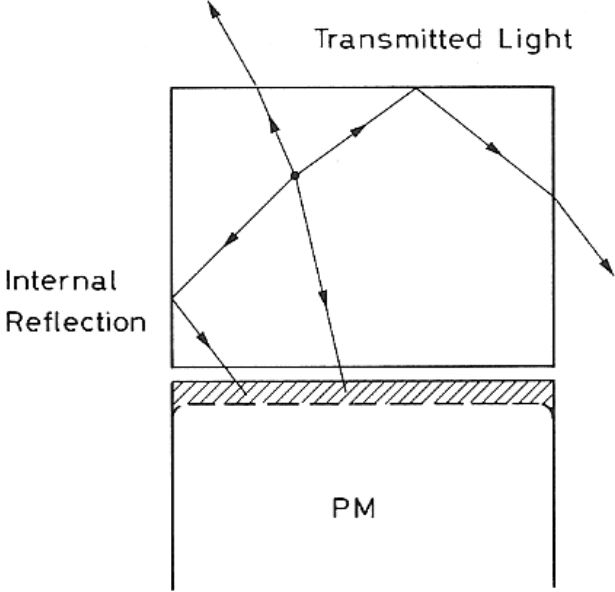


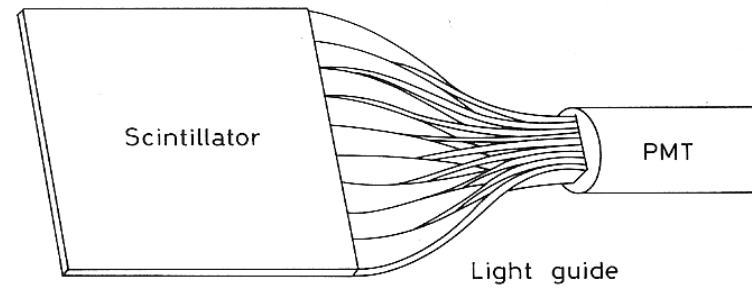
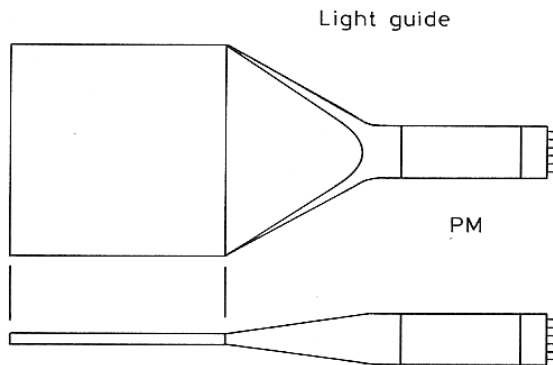
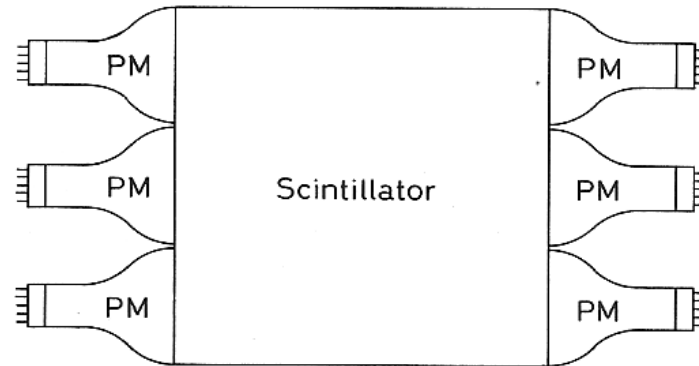
Fig. 8.20. Variation of PM gain, cathode current and anode current for three different temperatures (from *Schonkeren* [8.1])

Conjunto Cintilador-Fotomultiplicadora

Coleta de Luz

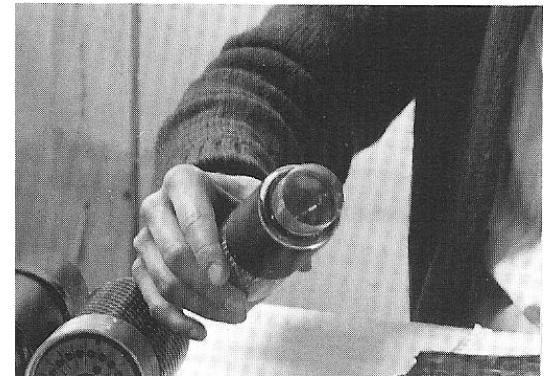
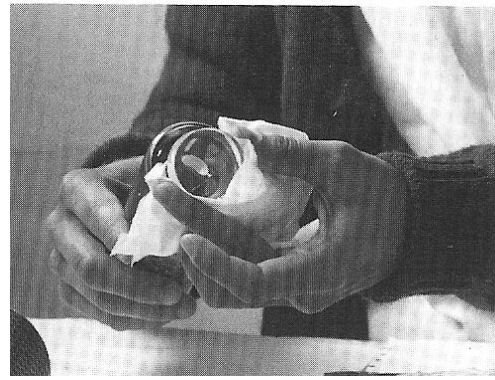
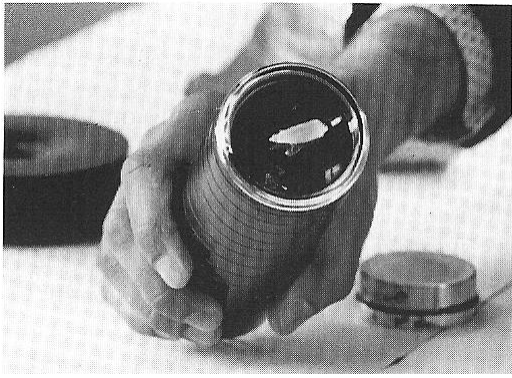


Detectores Cintiladores

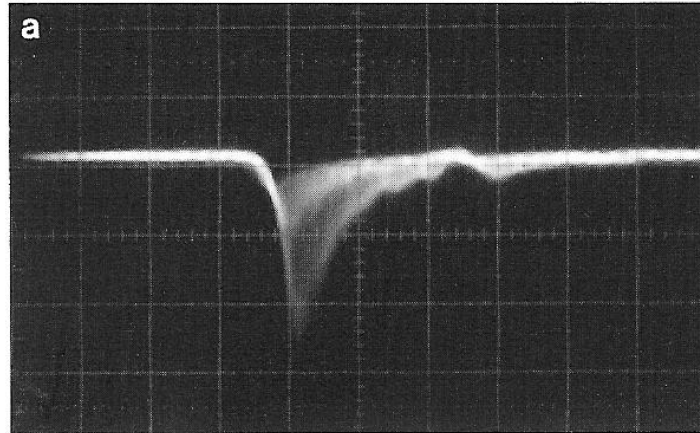
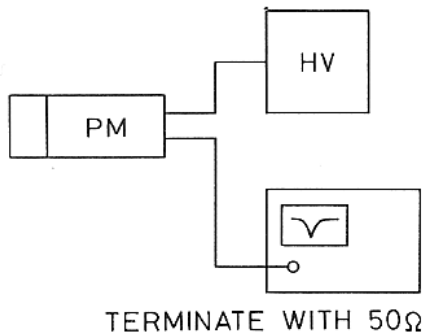


Montando um Detector de Cintilação

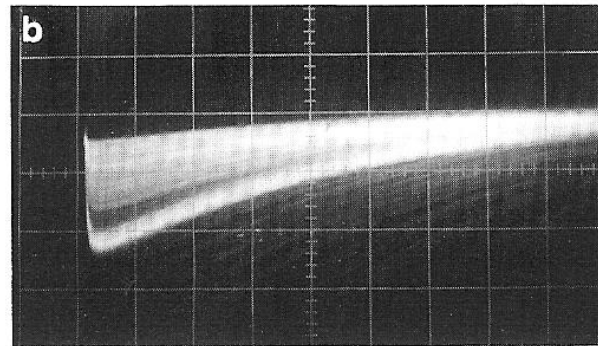




Teste do Detector de Cintilação



Plastic
Vert. scale : 0.2 V/cm
Hor. scale : 10 ns/cm
Source : ^{207}Bi 10 μCi



NaI
Vert. scale : 0.2 V/cm
Hor. scale : 5 $\mu\text{s/cm}$
Source : ^{137}Cs 10 μCi

Fig. 9.16. Anode signals from plastic (a) and NaI (b) scintillation counters

Platô de Operação

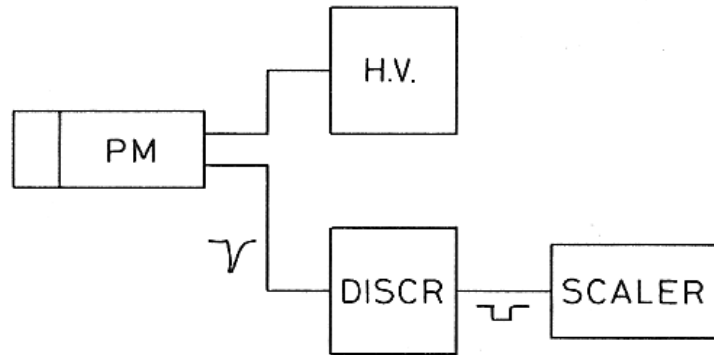


Fig. 9.17. Set-up for counter plateau measurement

Fig. 9.18. Measured plateau curve for plastic scintillator detector shown in Fig. 9.16 using a ^{207}Bi source

