

Ministério da Saúde  
Instituto Nacional de Câncer

**Programa de Qualidade em Radioterapia**  
**Curso de Atualização para Físicos em Radioterapia**





## Introdução

Este capítulo tem como objetivo fornecer informações básicas sobre o funcionamento dos aceleradores lineares para que as pessoas envolvidas no controle da qualidade destes equipamentos possam preparar os programas de controle mais adequados e fazerem uma avaliação melhor das eventuais falhas que este sistema possa apresentar.

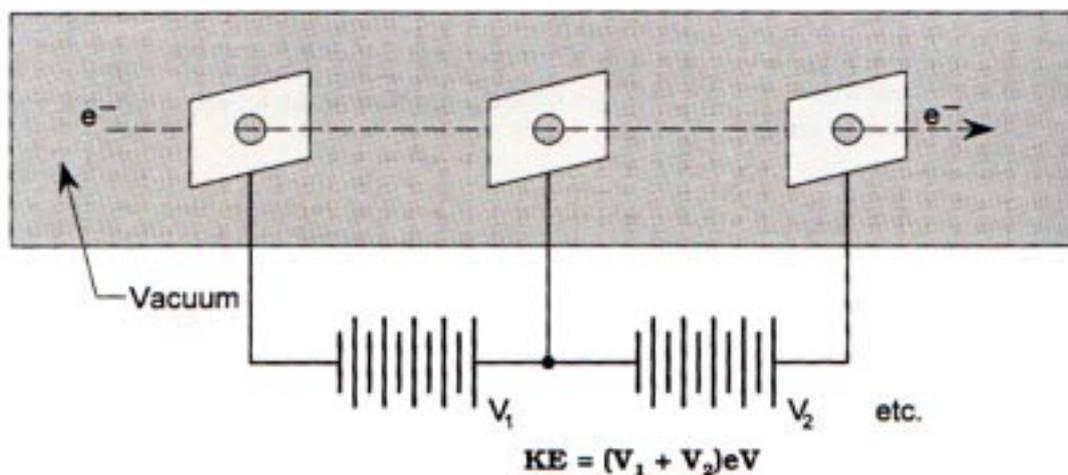
## Processo básico na aceleração dos elétrons.

Nos equipamentos que usam tubos de raios X a energia máxima disponível, fica limitada a algumas centenas de KV devido a problemas principalmente de isolação desta tensão.

Para energia maiores uma das tecnologias disponível é o acelerador linear.

Na figura abaixo temos o exemplo de um acelerador simples usando-se corrente contínua para a aceleração; basicamente os elétrons serão acelerados entre as placas pela diferença de potencial.

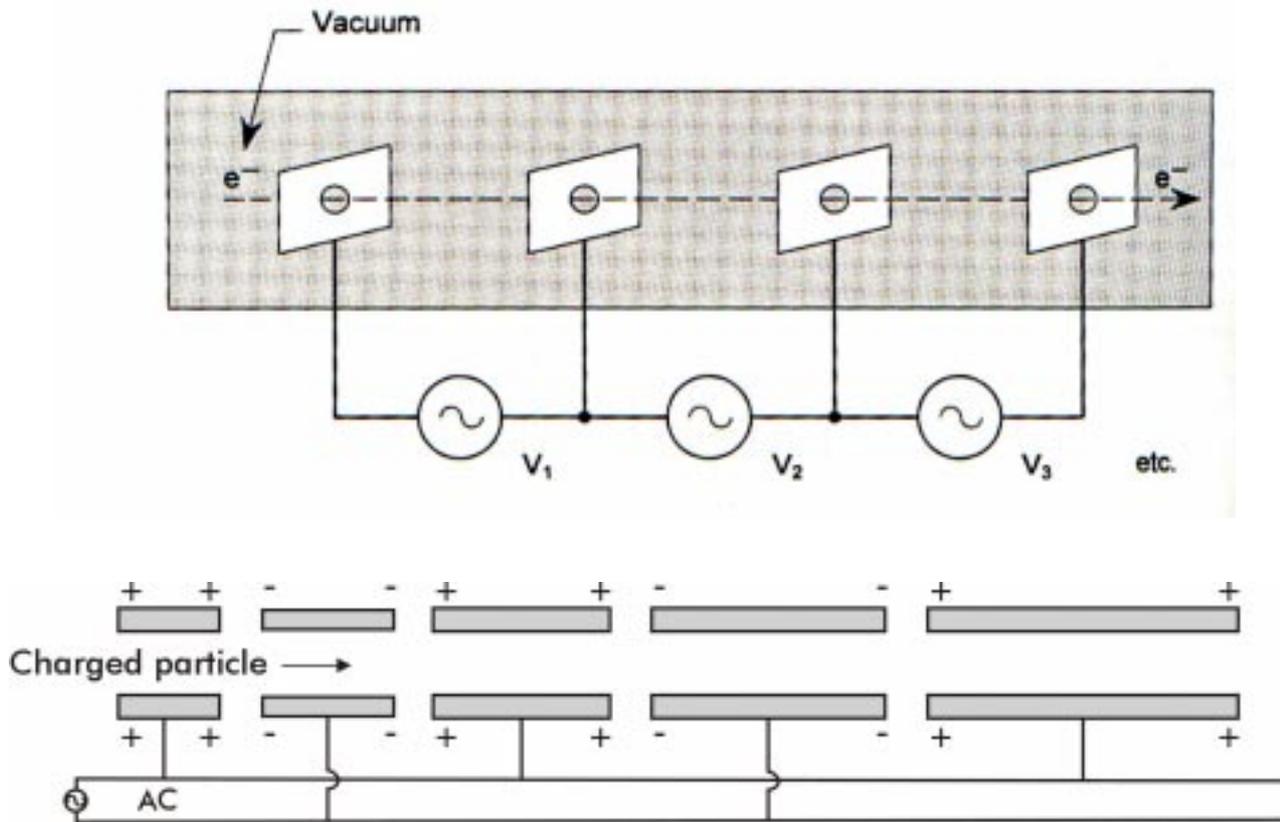
Electrostatic (DC):



Na figura substituímos o gerador de tensão contínua por um gerador de corrente alternada que se devidamente sincronizado com a velocidade dos elétrons vai proporcionar uma aceleração entre as diversas placas do acelerador.

A idéia de se usar tensão alternada para acelerar partículas carregadas já existia no começo dos anos 20. Uma serie de tubos condutivos é conectada a uma fonte de tensão alternada conforme mostram as figuras seguintes. O elétron é acelerado da esquerda para a direita através do eixo do tubo. O primeiro e o segundo tubo irão proporcionar aceleração para o elétron somente quando ele estiver entre os tubos e não quando ele estiver dentro do tubo, neste momento em que o elétron se encontra dentro do tubo a tensão tem que ser invertida para que quando o elétron estiver novamente na borda entre o segundo e o terceiro tubo ele encontre novamente tensões favoráveis para a aceleração, como o elétron esta cada vez mais veloz o comprimento das placas tem que ser maior para que não se perca o sincronismo e este é o principio básico de aceleração num tubo de ondas progressivas.

Alternating Current (AC):



Também existem os aceleradores com ondas estacionarias porem o principio básico de aceleração é semelhante.

## Modulador

Os aceleradores lineares utilizam um circuito tipo modulador que será descrito abaixo:

A principal finalidade do modulador é fabricar um pulso de alta tensão para ser aplicado a magnetron (ou Klystron), e na maioria dos aceleradores este pulso também é aplicado no gun do tubo acelerador para dar a primeira aceleração nos elétrons .

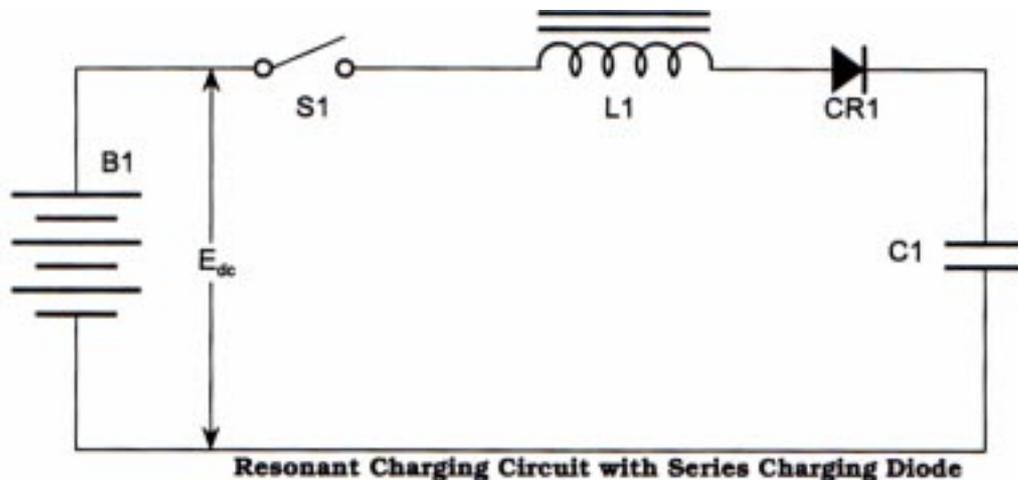


Fig.1: Circuito de carga ressonante com diodo para manter a carga.

Quando S1 é fechado a corrente começa a fluir através do condutor L1 para carregar C1. Inicialmente a impedância de L1 limitara o fluxo da corrente resultando um armazenamento de energia tanto no capacitor como no indutor. Quando o valor armazenado no capacitor C1 fica próximo ao valor da fonte a corrente através do indutor vai diminuindo até que acarrete um colapso no campo magnético de L1 ocasionando a descontinuidade da corrente fluindo em L1 o que cria uma fonte de voltagem adicional para a tensão da bateria B1 então começa a se carregar com um valor maior que a tensão da bateria (normalmente este valor é duas vezes  $E_{dc}$ ) até que tenha transferido toda a energia para C1. A finalidade do diodo é o de impedir que C1 devolva a energia para B1 causando uma oscilação.

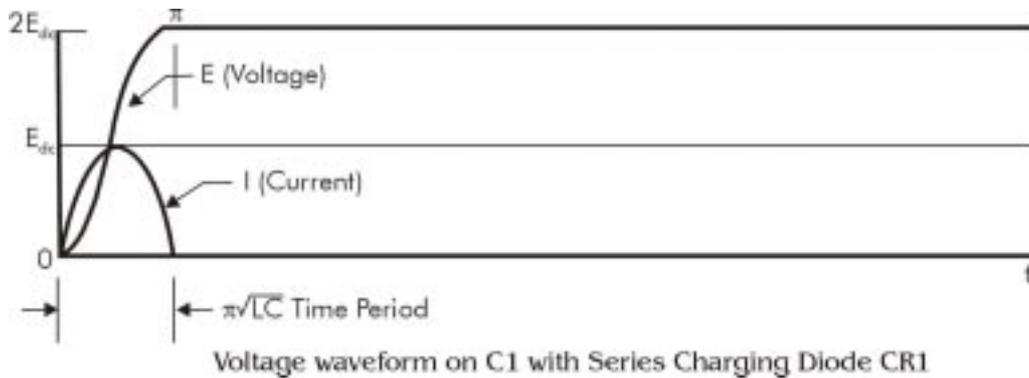


Fig.2: Forma de onda no capacitor C1.

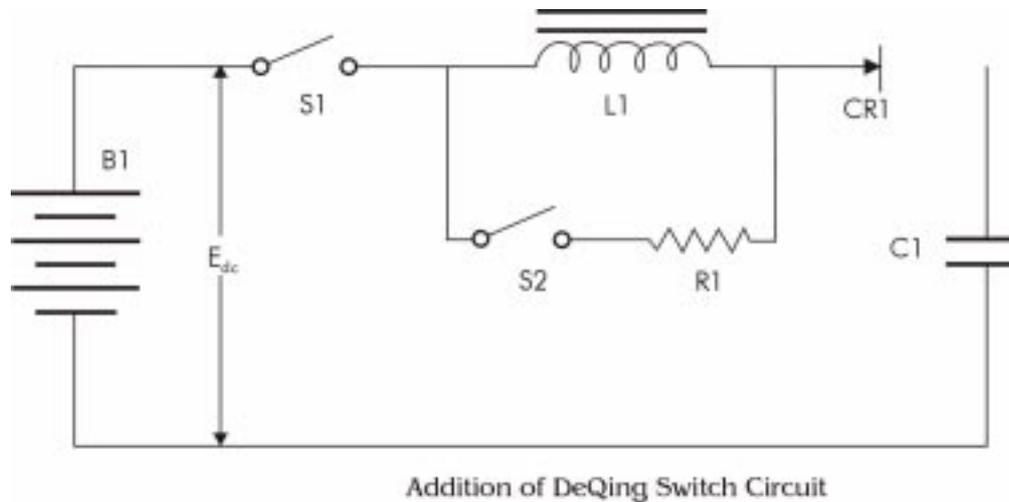
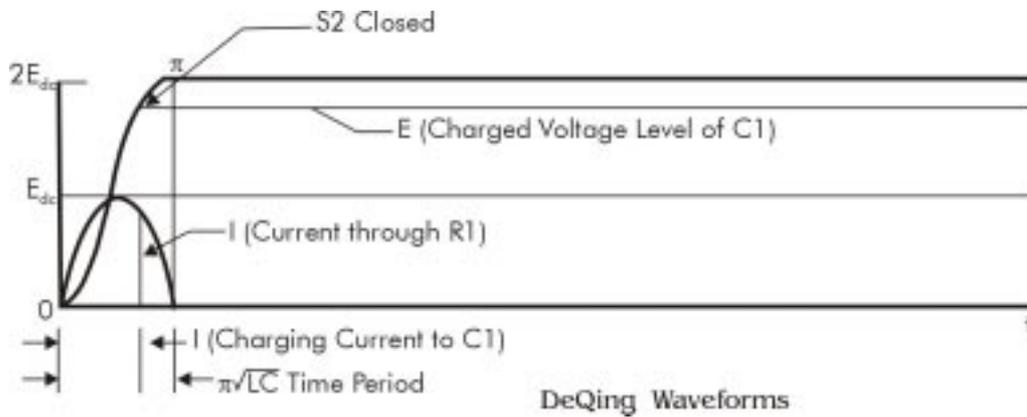


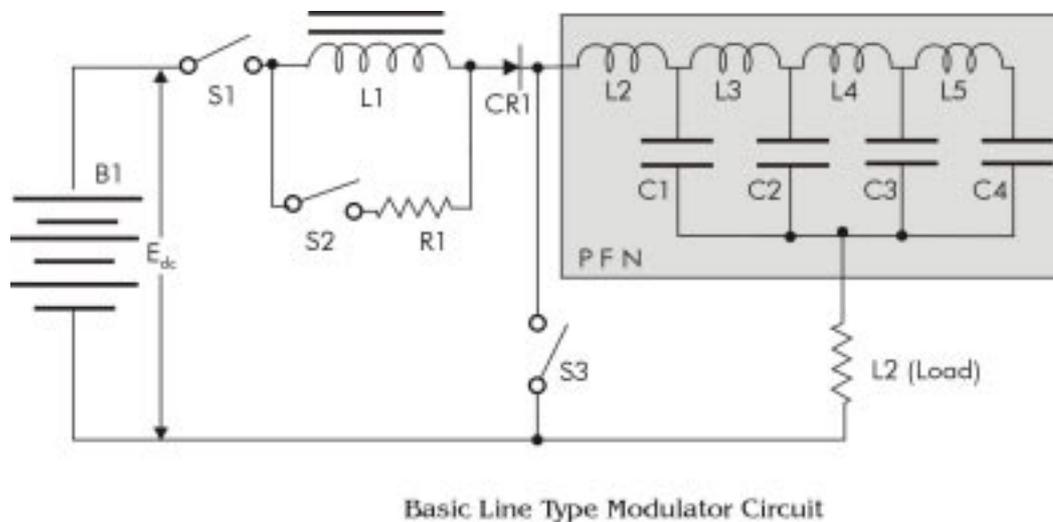
Fig.3: Circuito de carga ressonante com diodo para manter a carga o circuito DeQing.

Referente a fig. 3, se a chave S2 for fechada a qualquer tempo depois que o capacitor atingir o valor da bateria a energia armazenada em L1 não será transferida para C1 mas sim, será dissipada em R1. Controlando no tempo exato em que S2 é fechado conseguiremos controlar o nível de carga em C1.



**Fig.4 : Forma de onda no capacitor C1 com uso do circuito DeQing.**

Na figura 5 o circuito foi incrementado, acrescentando-se a chave S3 para descarregar o circuito, R2 que absorvera a energia e o PFN que armazenara a energia.

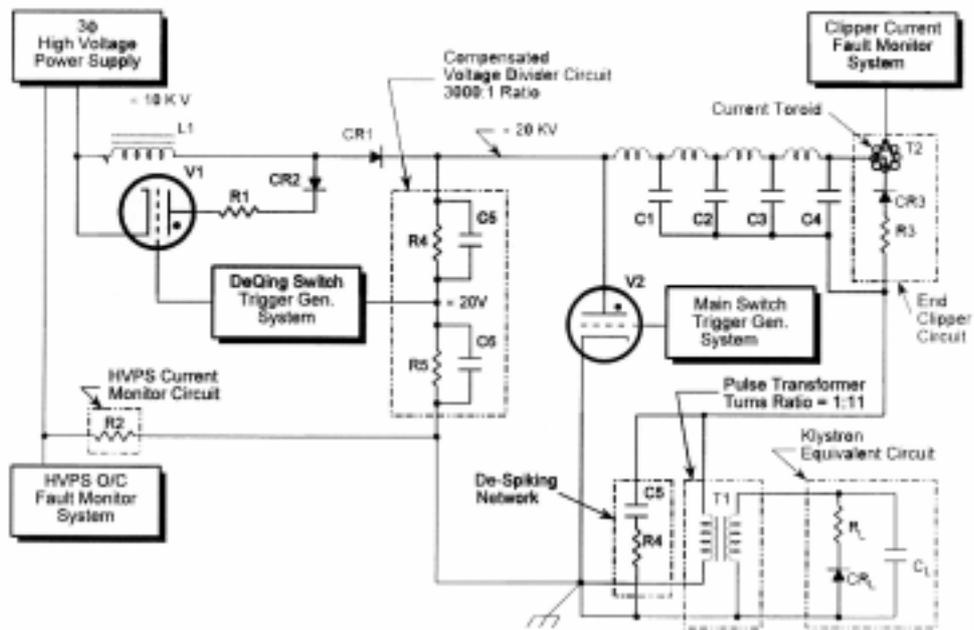


**Fig.5: Típico circuito de modulador**

Toda a vez que a chave S3 for fechada a carga armazenada no PFN será transferida para R2

Na fig.6 temos um típico modulador usado para aceleradores, no qual foram substituídos alguns itens pelo qual é encontrado na pratica conforme explicações abaixo:

1. A bateria foi substituída por uma fonte de alimentação trifásica de alta tensão.
2. As chaves S2 e S3 foram substituídas por válvulas de alta corrente e tensão do tipo thyatrons.
3. A carga R2 foi substituída pelo transformador de pulso T2 e o magnetron.. quando V2 conduz, ( chave S3 fecha ) a carga armazenada na PFN ( capacitor C1) descarrega em T2 o qual transmite um pulso para Klystron ou magnetron.
4. Foi acrescentado um divisor de tensão que fornece uma amostra de alta tensão que está sendo armazenado na PFN possibilitando assim a oportunidade de escolher o momento certo de fazer conduzir V1 ( chave S2 fecha ) e assim armazena sempre o mesmo valor na PFN (capacitor C1).

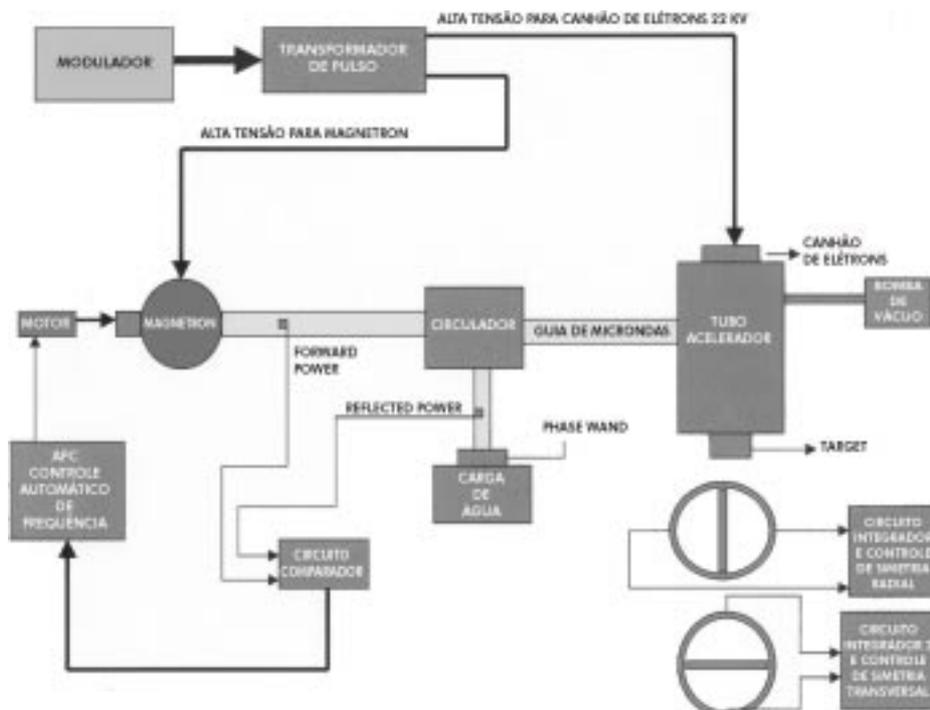


**Fig. 6: Modelo simplificado de um típico modulador para acelerador.**

Foi acrescentando também uma resistência R2 que da uma amostra de corrente fornecida pela fonte de alta tensão que dispara um circuito de segurança em caso de corrente mais alta que o normal.

As falhas mais comuns neste tipo de circuito, são sem dúvidas nos thyratons que estão sujeitos a um desgaste. Como os thyratons funcionam como chave o que ocorre nelas é a possibilidade delas não conduzirem ( não fecharem ), conduzirem sempre ( não abrirem ), ou não conduzirem corretamente ( mau contato ).

As outras falhas mais constantes é a possibilidade de algum componente perder a isolação o que ocasionaria erros que podem ser vistos diretamente ou através do aumento de corrente na resistor R2.



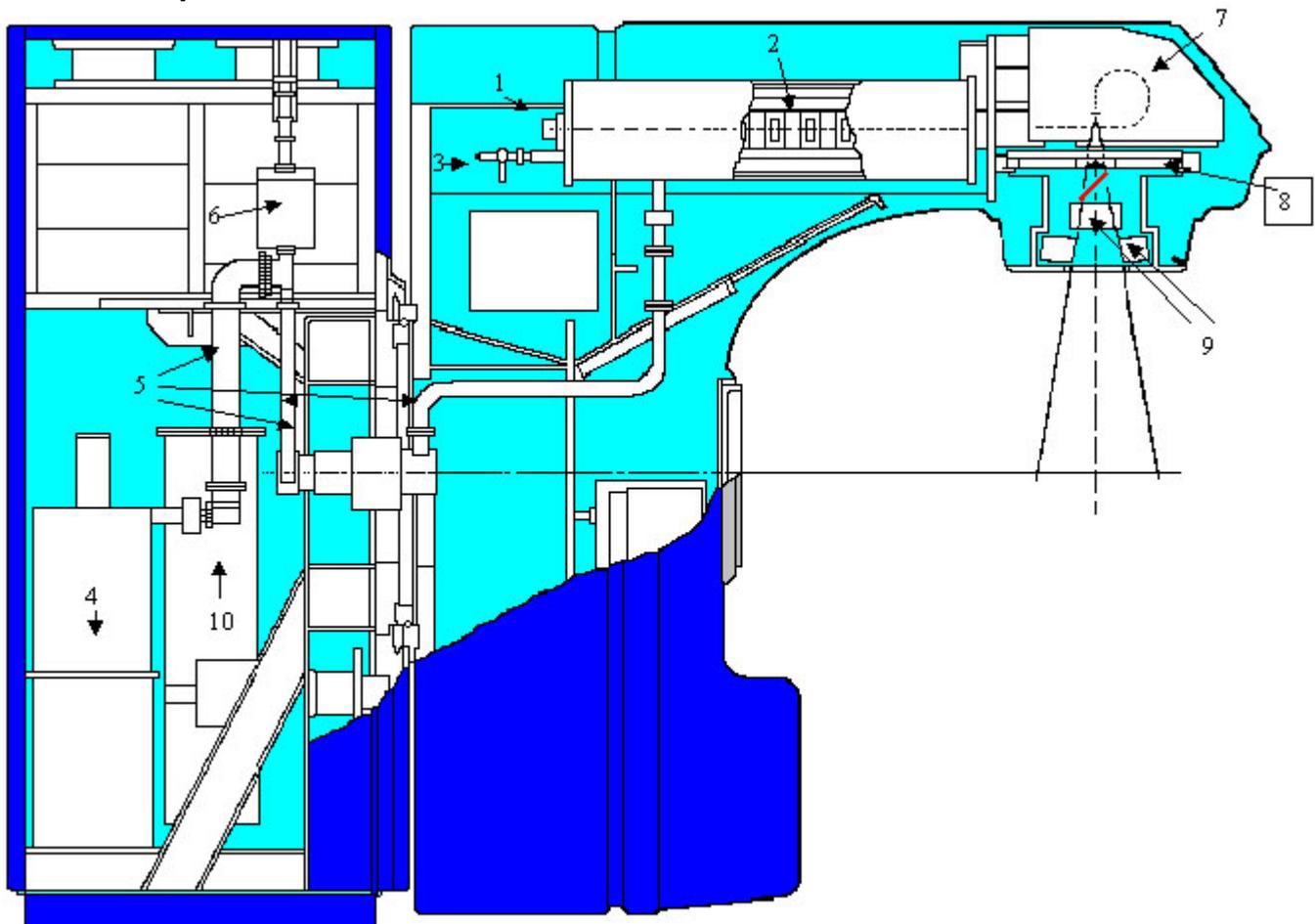
**Típico acelerador de baixa energia**

## Sistema de Dosimetria

Os aceleradores lineares usam em geral um sistema com duas câmaras de ionização divididas ao meio conforme figura acima que possuem duas funções principais: medida da quantidade de radiação fornecida pelo acelerador e controle da simetria do feixe.

Para contagem da dose somamos os sinais das duas metades da câmara obtendo o total da radiação emitida pelo acelerador. O canal 1 é usado como principal e o canal 2 como segurança no caso de uma eventual falha do canal 1.

Quando o feixe está simétrico a quantidade de radiação nas duas metades da câmara serão iguais e quando subtraídos deverão ser zero, caso a simetria esteja alterada a diferença não será zero e este sinal poderá ser utilizado para ativar uma segurança ou um circuito de centragem automática.



1- Canhão de elétrons – Área responsável pela geração dos elétrons que serão acelerados.

2- Tubo acelerador- Estrutura que acelera os elétrons até a velocidade (energia) desejada.

3- Bomba iônica de vácuo- Área responsável por manter o vácuo em toda a estrutura aceleradora.

4- Circuito de radio frequência- Neste exemplo podemos ver uma klystron porém poderíamos usar uma magnetron, dependendo da energia desejada.

5- Guia de onda- Estrutura usada para transportar a radio frequência até o tubo acelerador.

6- Circulador e carga de água- Componentes responsáveis pela absorção da onda de radio frequência que não é absorvida pelo tubo acelerador.

7- Desviação- Componente responsável pelo direcionamento do feixe de elétrons através de 270 graus de curvatura para a área do colimador.

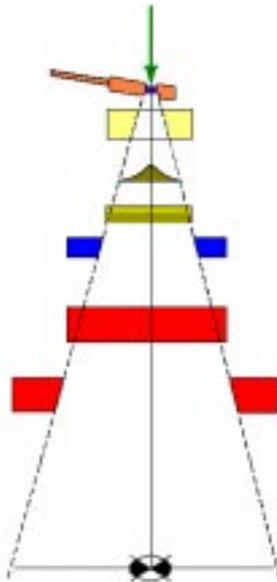
8- Carrossel- Área responsável pela colocação do correto filtro equalizador para fótons ou do correto filtro espalhador para elétrons.

9- Colimadores- Área responsável pela definição do campo a ser tratado.

10- Circuito de água- Responsável pela circulação de água em todo o equipamento com o intuito de refrigerar as diversas áreas do equipamento.

## Acelerador para a Produção de Raios X de Alta Energia

Quando elétrons de alta energia deixam o acelerador, eles colidem com um alvo de metal. Os elétrons diminuem a velocidade quando passam perto do núcleo carregado positivamente, causando a eles um acréscimo de energia. Por ser a energia dos elétrons incidentes tão elevada, ela é liberada em forma de Raios X, os quais são emitidos do lado oposto da incidência dos elétrons no alvo. Este tipo de radiação é chamada BREMSSTRAHLUNG, com um spectrum de energia contínua e um valor de pico em função da energia dos elétrons que colidiram no alvo.



*Fig. 1 Desenho esquemático de um acelerador para fótons*

## Sistema de dimensionamento do feixe

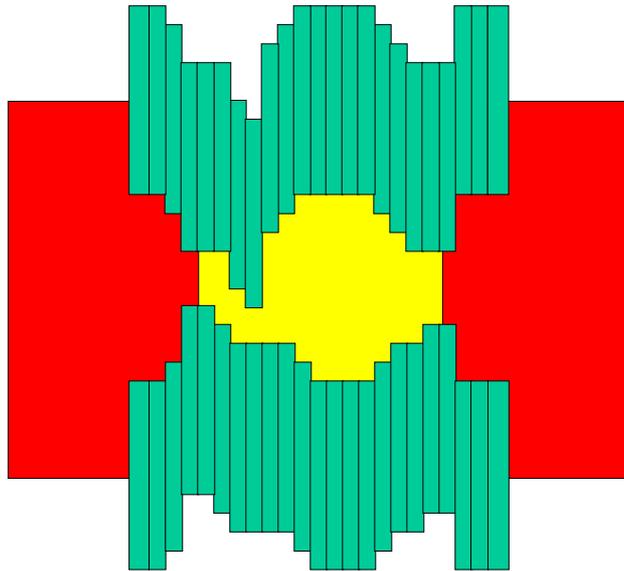
A finalidade deste sistema é definir o formato e o tamanho do campo a ser aplicado no paciente. Uma luz de campo e um telêmetro ativo são incorporados para ser usado durante o posicionamento do paciente para determinar o tamanho do campo e a distância alvo para superfície (pele) respectivamente.

Como mostrado na figura 1, o colimador primário estabelece o máximo ângulo de dispersão do feixe de tratamento confinando-o num cone de 30°. Após isto, o feixe passa atrás do filtro equalizador, o qual tem a função de deixá-lo uniforme, atenuando mais a área central, por ser mais espessa, e menos nas bordas do filtro.

Após passar pela câmara de ionização, o feixe é limitado pelo colimador secundário, que restringe o campo projetado para um campo de 40x40 a 1 metro de distância do alvo/superfície. A forma final do feixe é obtida através do uso de 2 pares de colimadores móveis. Estes colimadores podem fazer campos retangulares de 0,5x0,5 até 40x40.

O colimador pode também ser rodado para vários alinhamentos de campo no paciente. Vários tipos de blocos podem ser usados para proteger áreas ou órgãos que não precisam ser expostos e não conseguiriam ser protegidos através de campos retangulares.

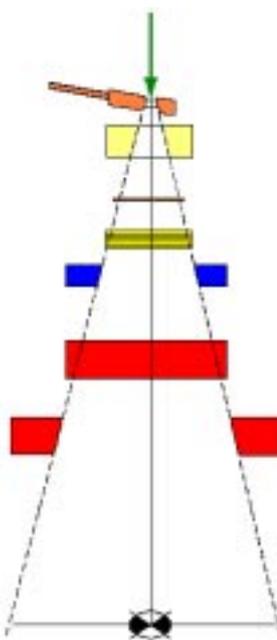
Atualmente, o uso do colimador multifolhas já está mais difundido, o que eliminará, quase que na totalidade, o uso dos blocos.



**Fig. 2 MLC**

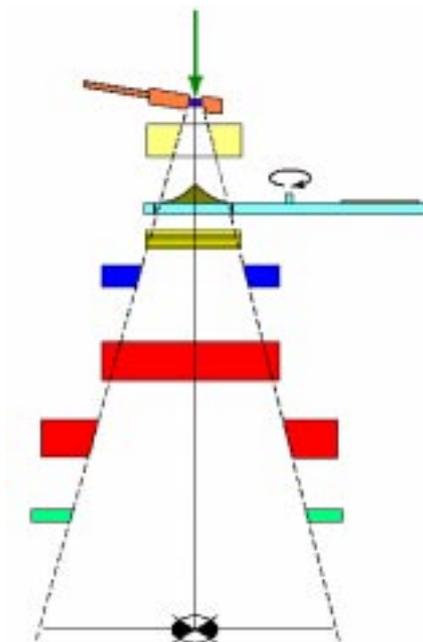
## **Acelerador para a Produção de Elétrons**

No caso do tratamento com elétrons, o alvo é retirado da frente dos elétrons, os quais colidirão com um filtro espalhador. Neste caso, o formato do campo é feito através de aplicadores/ cones de elétrons que devem ter uma distância bastante reduzida da superfície devido às características de dispersão do tipo de radiação.



**Fig.3 Desenho esquemático de um acelerador para elétrons**

Máquinas que produzem dupla energia de fótons e várias energias de elétrons devem possuir um sistema móvel (carrossel) que permita selecionar um filtro equalizador para cada energia de fótons, assim como um filtro espalhador para cada energia de elétrons e, ainda, possibilite a colocação do alvo para tratamento com fótons ou a sua retirada para tratamento com elétrons.



**Fig. 4 . Acelerador para produção de fótons e elétrons**



# AQUISIÇÃO DE DADOS PARA SISTEMAS DE PLANEJAMENTO DE TRATAMENTO

Pedro Paulo R. Jr.

## Entidades típicas necessárias - Fótons

- Perfis de campos (Beam Profiles, OCRs-Off Center Ratios, Cross Plots,) em 4 ou 5 Profundidades –  $D_{máx}$  , 5cm, 10cm, 20cm e 30cm. CAMPOS ABERTOS, MAIOR DIAGONAL, "WEDGES" - Transversais & Longitudinal @ 5cm prof.
- PDPs para campos abertos ( 3 x 3 , 5 x 5 ... até 40 x 40), PDPs para filtros em cunha (5 x 5 até Máx) ou BHF ("Hard. Factors"), PSF ou NPSF (X. Allen Li – MP 26(6) Jun/99 – EGS4)
- Fator Rendimento Relativo (FAC, Rel Output,) @  $D_{máx}$ . para Campos retangulares abertos. Fator Rendimento Relativo (FAC, Rel Output,) @  $D_{máx}$ . para Campos com filtros em cunha – Fator filtro & Dependência com Campo. Fatores de acessórios (Bandejas, mesas, blocos, etc.)
- Calibração Absoluta – Protocolo TRS 277, TRS381 ou TRS 399

## Entidades típicas necessárias – Elétrons

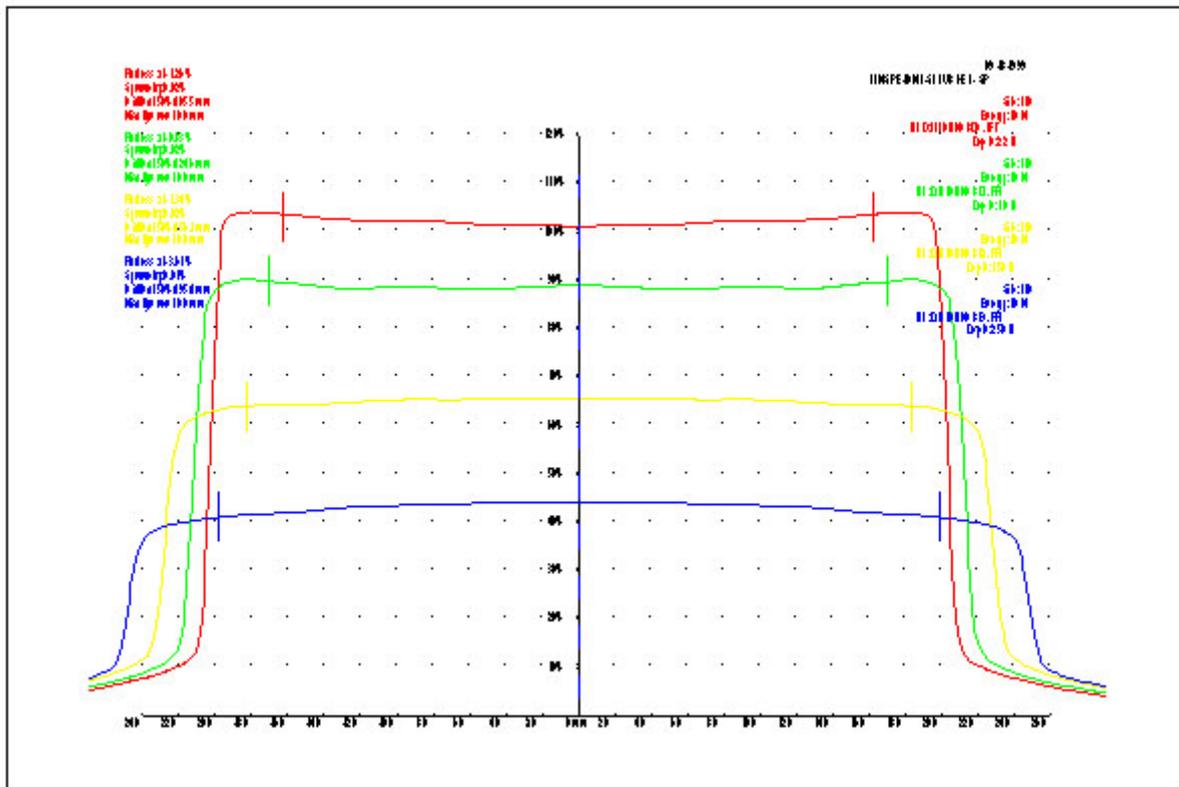
- PDPs para todos os cones ( 3 x 3 , 5 x 5 ... até 40 x 40) e todas as energias - CAMPOS ABERTOS & CAMPOS BLOQUEADOS
- Fator Rendimento Relativo (FAC, Rel Output,) @  $D_{máx}$ . para todos os cones e todas as energias. Fatores "cut-out" para campos bloqueados (D. Rogers, G. Zhang-MP 26(5))
- Perfis de campos (Beam Profiles, OCRs-Off Center Ratios, Cross Plots,) em 3 ou 4 Profundidades –  $D_{máx}$  , 2 X R80, R50 e R30cm.
- Posição Efetiva da Fonte para todas as energias e cones aplicadores.
- Calibração Absoluta – Protocolo TRS381 ou TRS 399

## Sistemas Automáticos de Varredura – "Beam Scanners"



# Perfis de Campo - Fótons

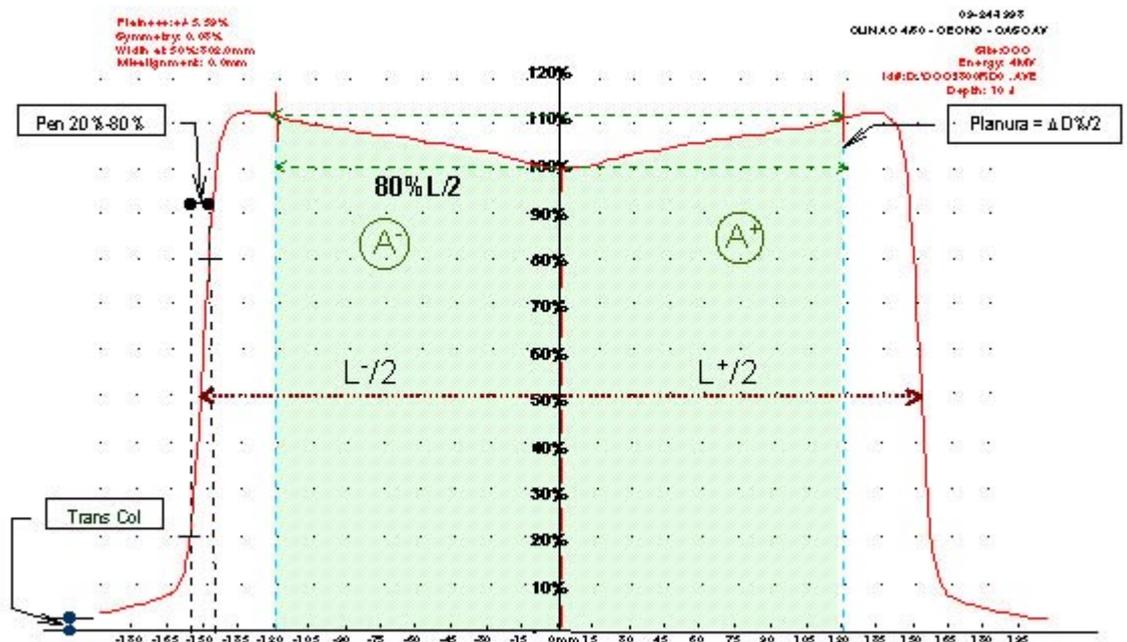
## Família de Perfis - 10MV - Campo 40 x 40



# Perfis de Campo - Fótons

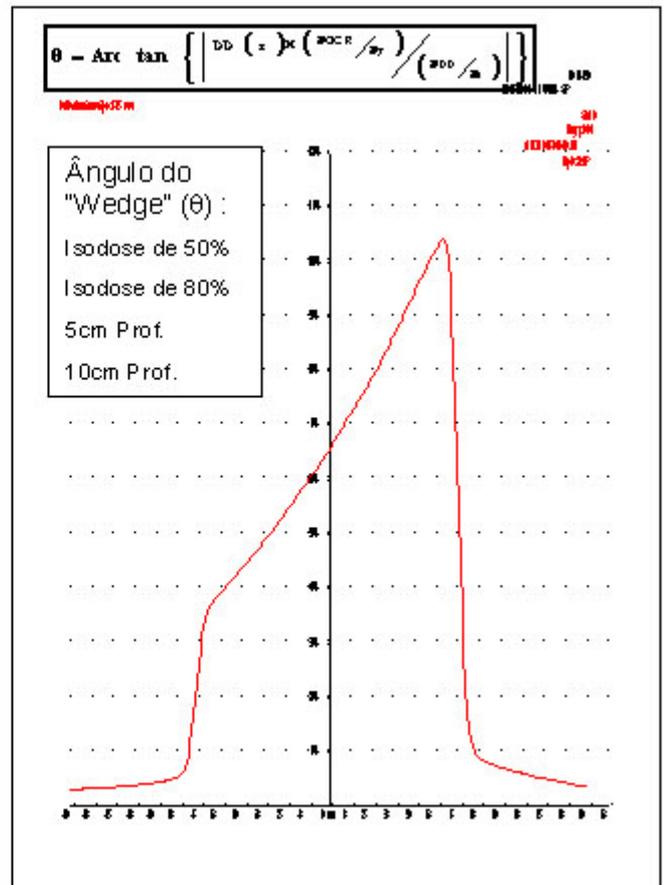
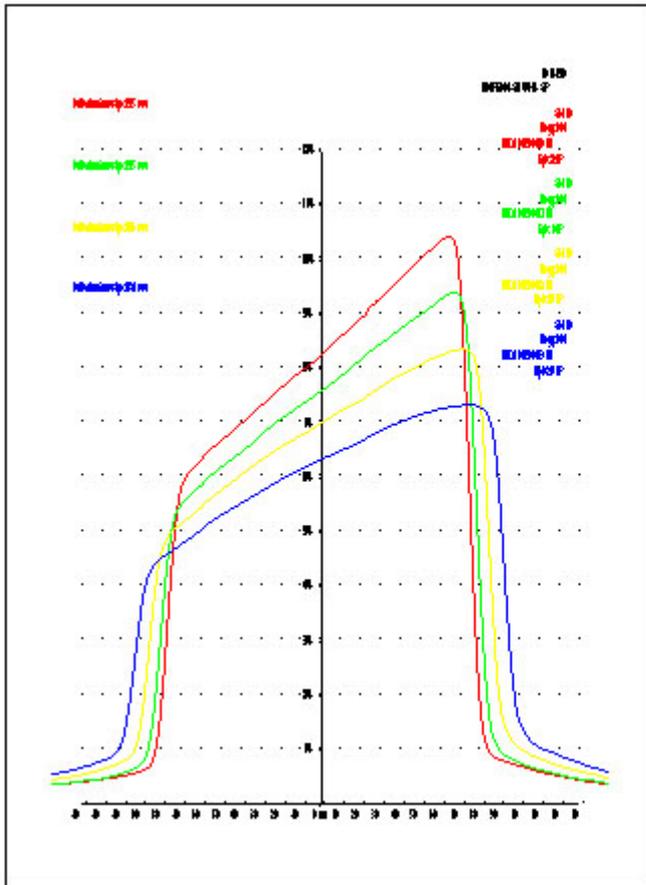
Tamanho de Campo, Simetria, Planura, Alinhamento, Penumbra 20%-80%, Trans. Colimador

- Tamanho de Campo:  
L/2
- Simetria de ponto:  
D+80%+ / D-80
- Simetria de área:  
A+ / A-
- Planura:  
 $\pm \Delta D\% / 2$
- Alinhamento:  
(L+/2) - (L-/2)
- Pen 20%-80%:
- Trans Col:



# Perfis de Campo - Fótons

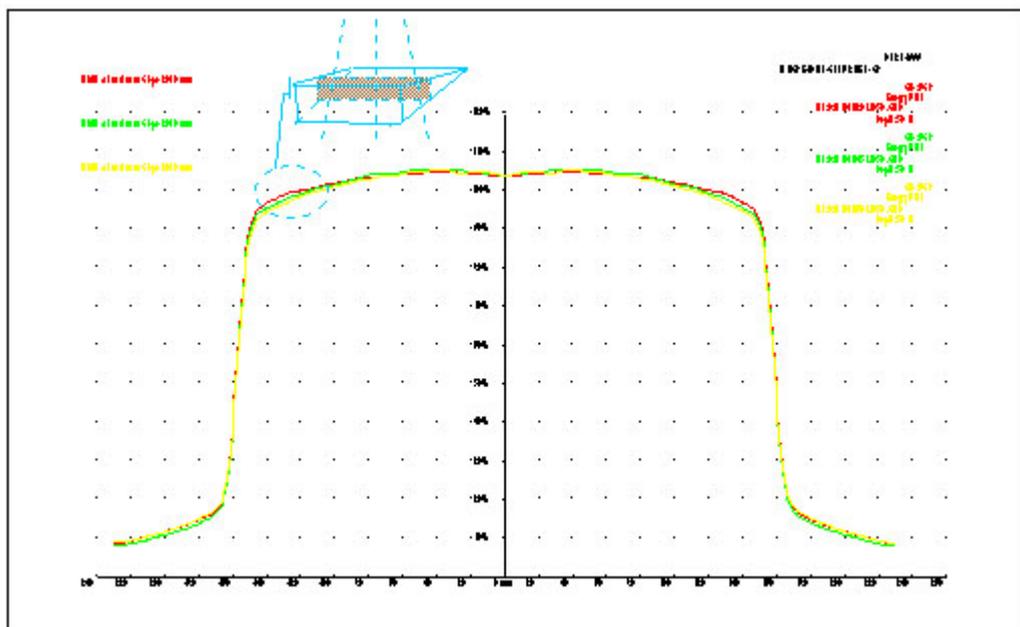
## Família de Perfis – 10MV – Campo 15 x 15 - W45°



# Perfis de Campo - Fótons

## Perfis Longitudinais – 6MV – Campo 15 x 15

W30° W45° W60°



## Detectores - Fótons



**Diodo 1mm<sup>2</sup> x 2.5mm**



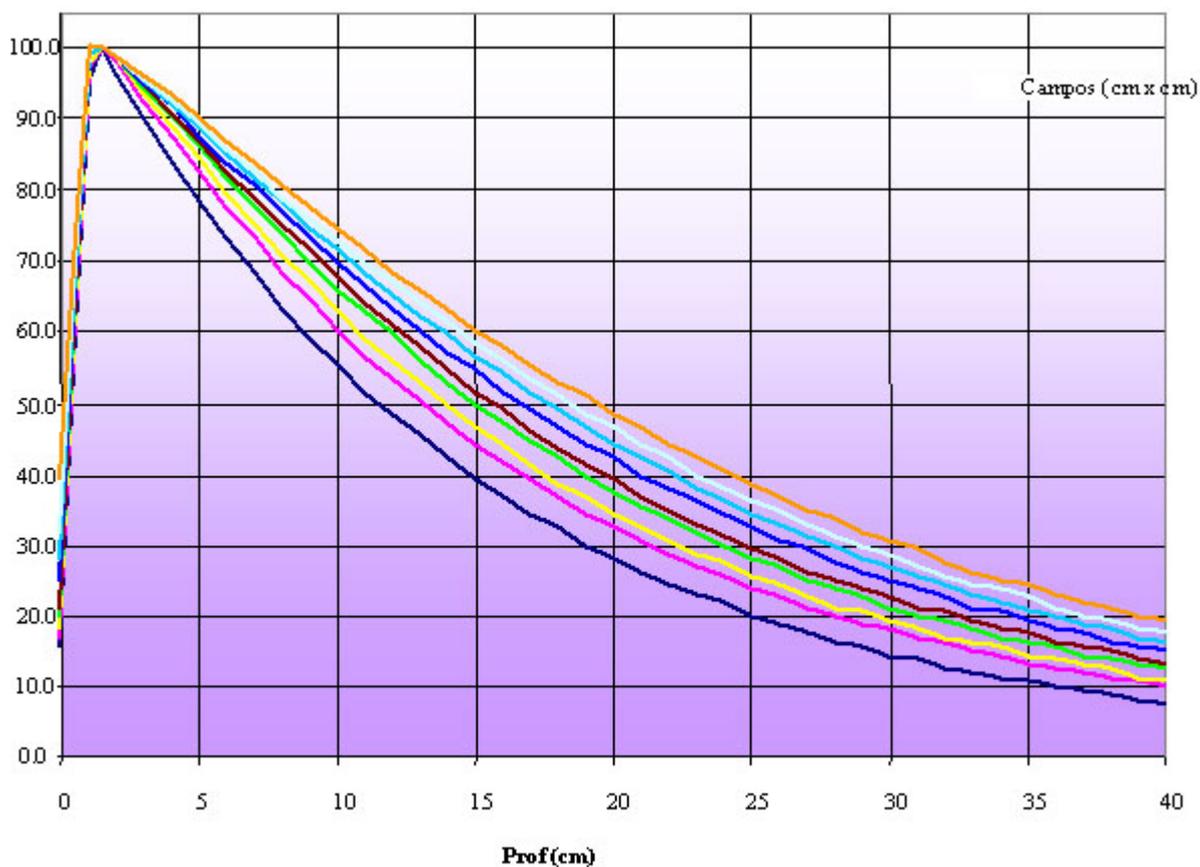
**Micro Câmara PTW 0.125cc**



**Câmara "PinPoint" PTW 0.015cc**

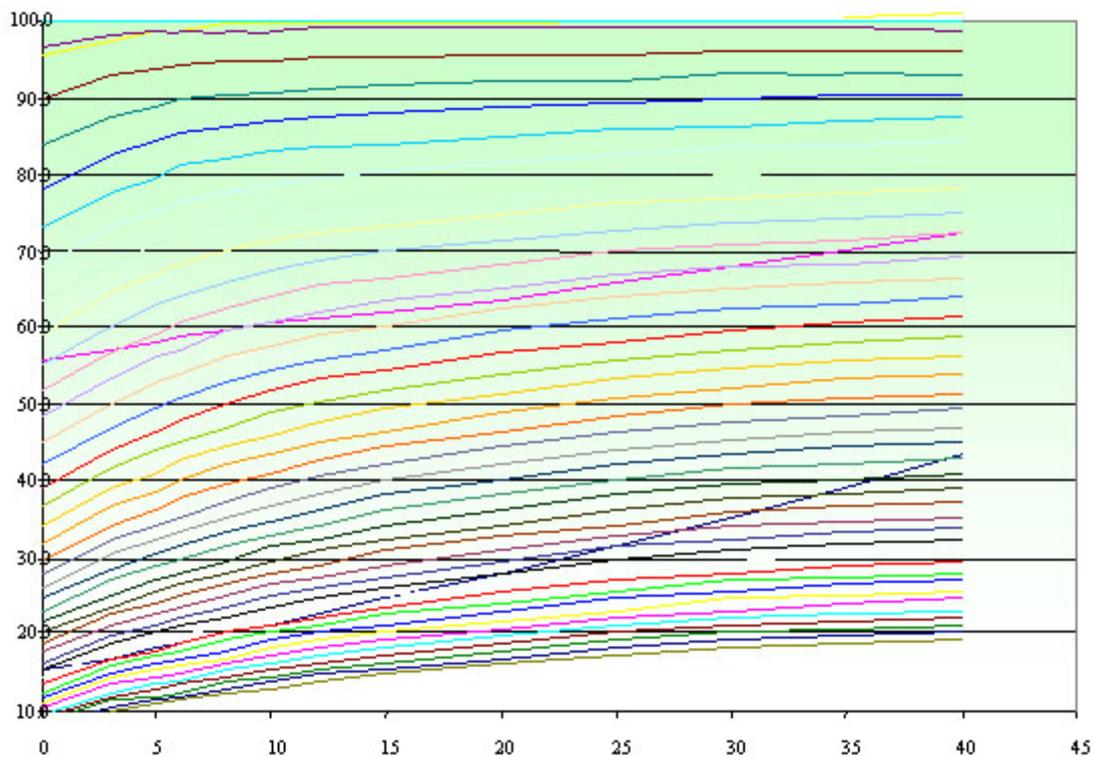
## %DP - Fótons

### Família de %DD - 10MV - Campos Abertos



## %DP - Fótons

### Família de %DD - 10MV - Campos Abertos



## %DP - Fótons

### Dmáx, D20/D10, Dsup - 10MV - Campo Aberto

