



RADIOTERAPIA

2º SEMESTRE DE 2020

Unidades de radioterapia

Profa. Patrícia Nicolucci

AVISO

Este material é parte dos recursos didáticos da disciplina *Radioterapia*, do curso de Bacharelado em Física Médica, do Departamento de Física da Universidade de São Paulo, campus de Ribeirão Preto.

As reproduções de imagens e outros materiais têm o único propósito de uso como recurso didático. Desta forma, nenhuma informação, imagem, totalidade ou partes do conteúdo devem ser utilizados para outros fins.

UNIDADES DE TERAPIA

até 150 kVp

Superficial

até 500 kVp

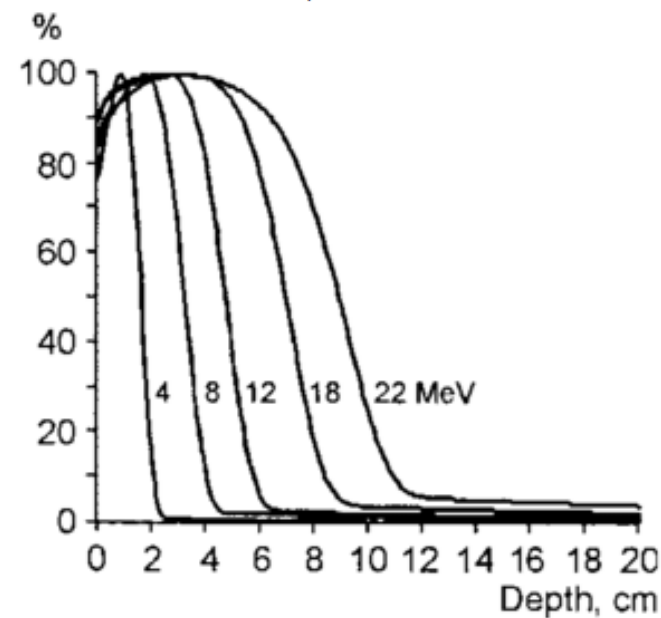
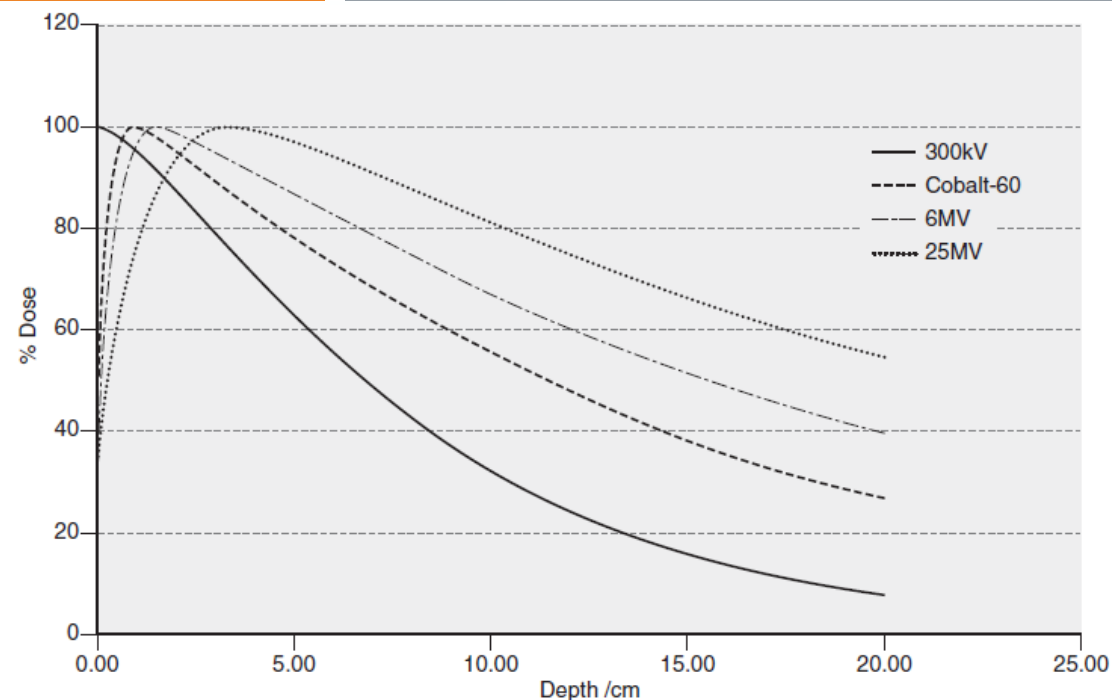
Ortovoltagem

1,25 MeV

Cobalto

Fótons:
4 a 25 MV
Elétrons:
3 a 25 MeV

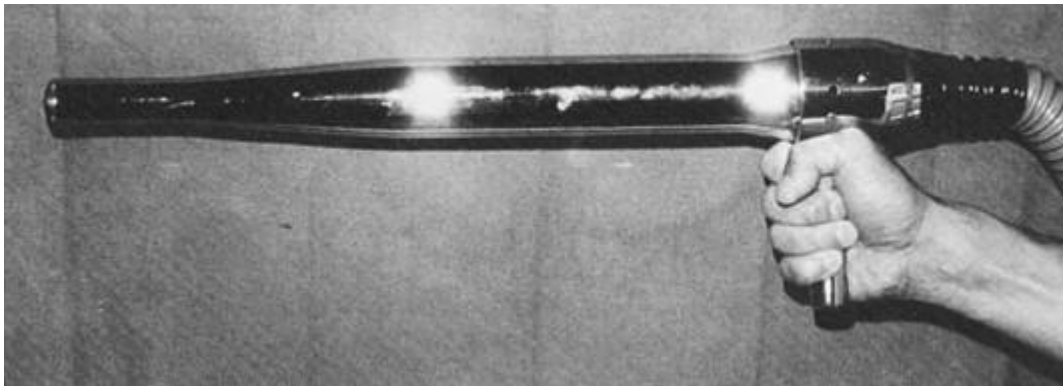
Linac



UNIDADES DE TERAPIA - SUPERFICIAL

1939, Alemanha – Chaoul desenvolve unidade de terapia superficial de contato para tratamento ginecológico

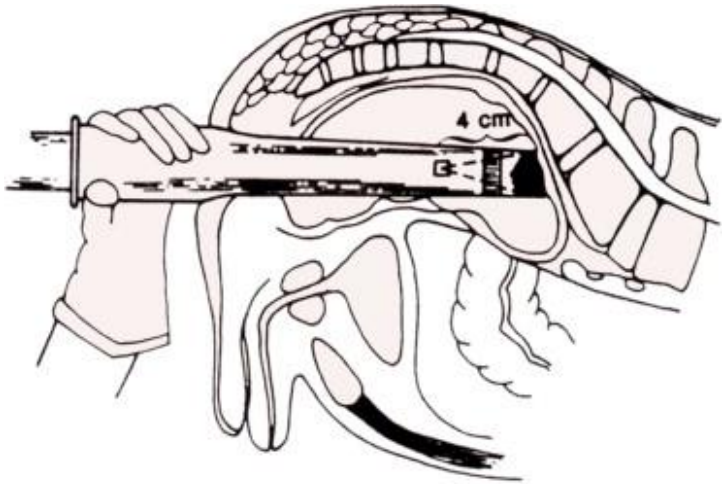
- Raios X ~ 50 kVp
- fortemente filtrados (1 a 6 mmAl)
- HVL = 1 a 8 mmAl
- DFS = 15 a 20 cm



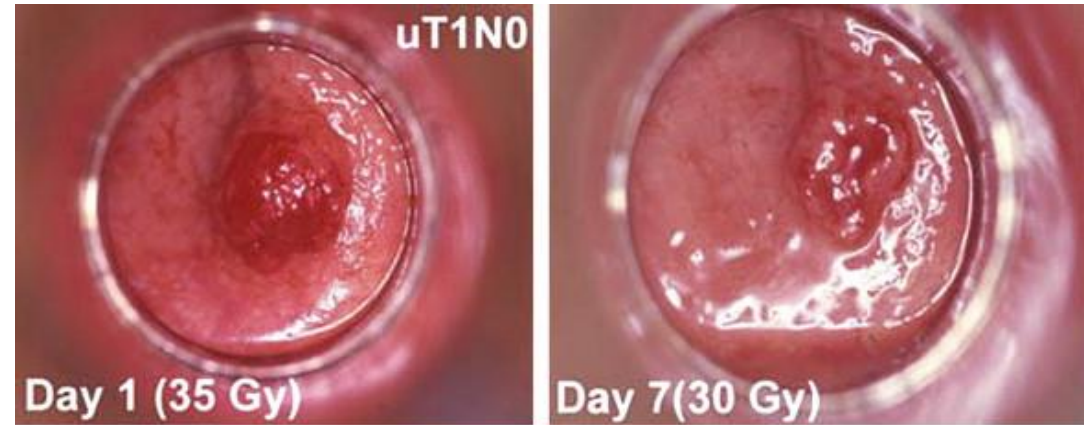
Philips RT 50 kV do início dos anos 1960

UNIDADES DE TERAPIA - SUPERFICIAL

1946, França – uso para tratamento de tumores de reto (técnica Papillon)



Aplicadores

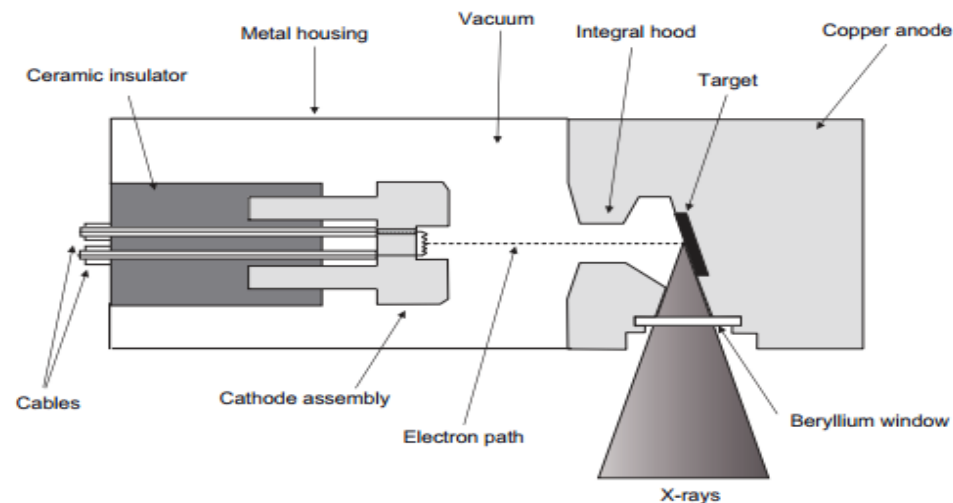


T1 N0 adenocarcinoma retal: dose total = 95 Gy em 4 frações em 5 semanas (35 + 30 + 20 + 10 Gy).

UNIDADES DE TERAPIA - ORTOVOLTAGEM

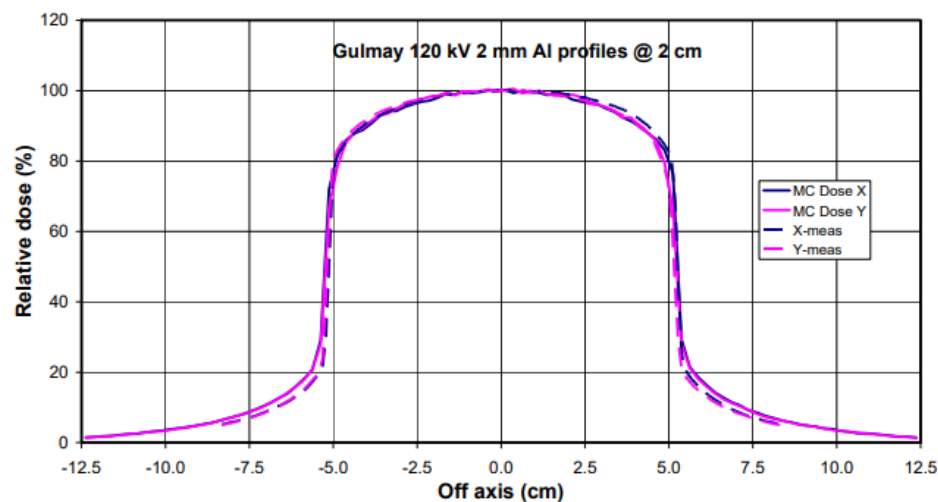
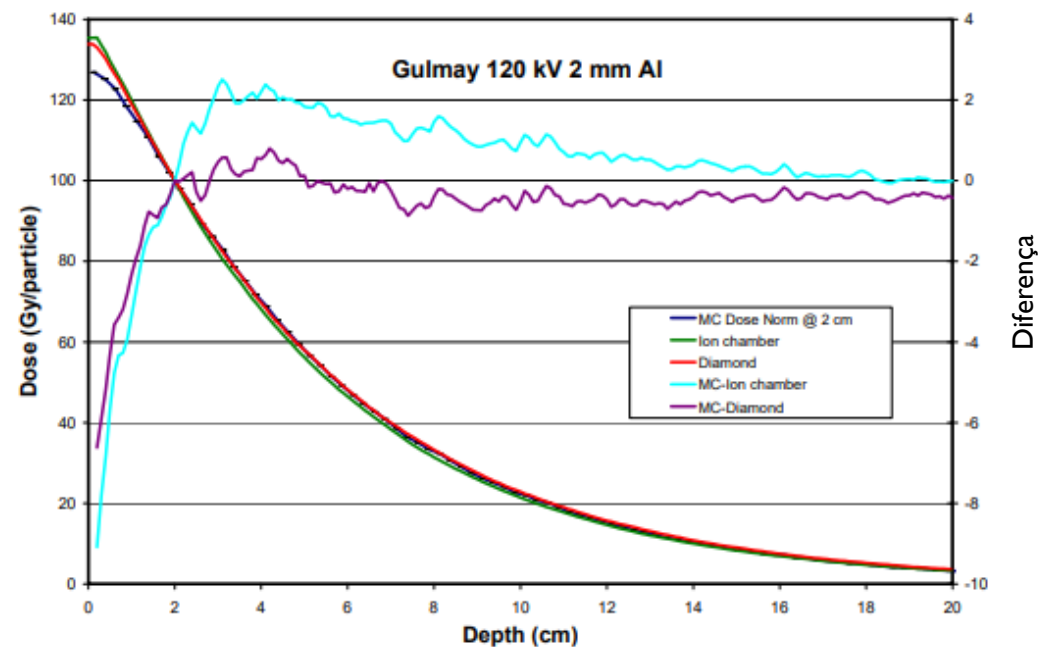
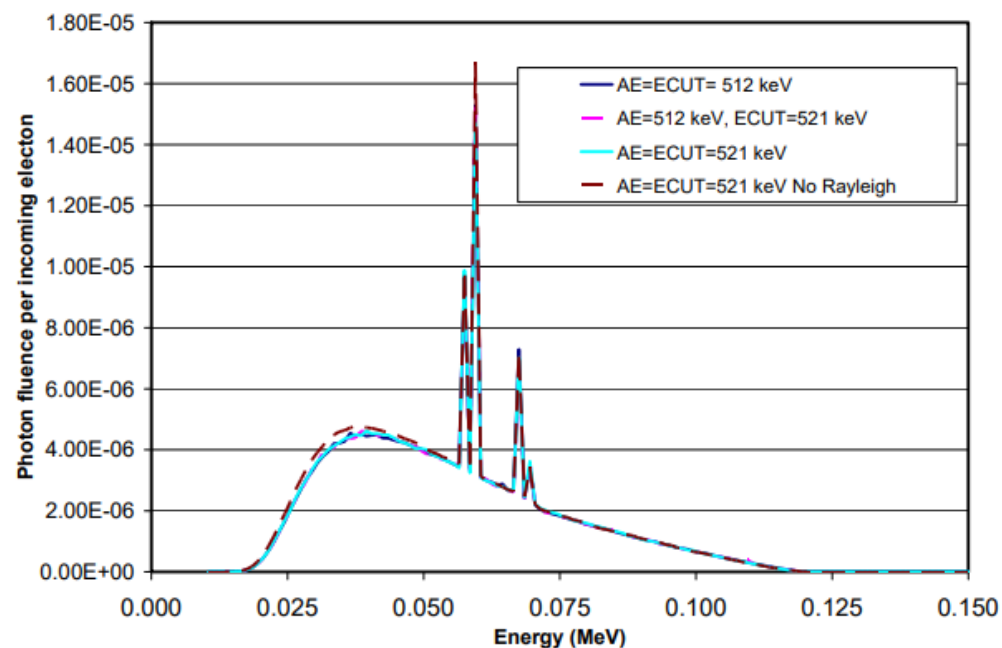
Normalmente, uso em tratamentos de pele

- Raios X de 150 a 500 kVp
- Fortemente filtrados (Al, Cu, Pb)
- HVL em mmAl ou mmCu
- Direção do tubo a 90 graus da direção de produção do feixe
- DFS = 20 a 50 cm
- ~1% eficiência de produção de RX



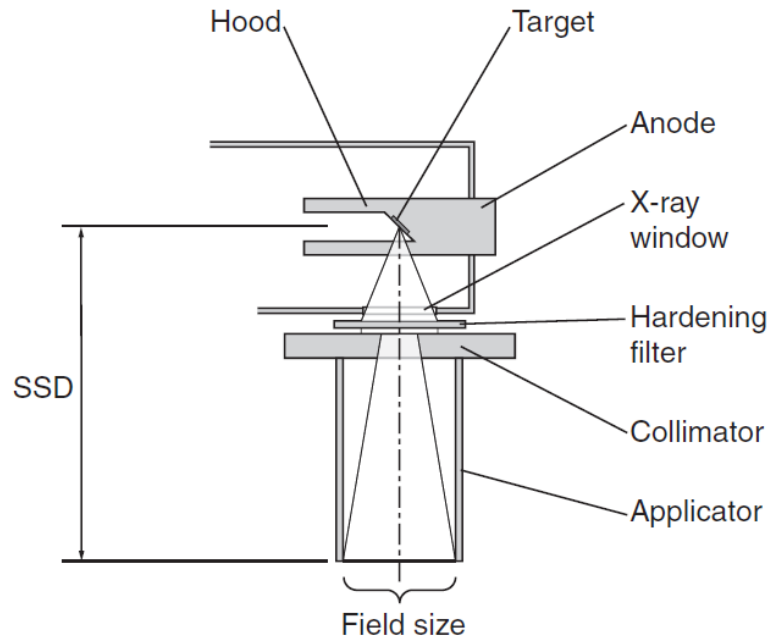
UNIDADES DE TERAPIA - ORTOVOLTAGEM

SMC: feixe de 120 kVp + 2 mmAl



UNIDADES DE TERAPIA - ORTOVOLTAGEM

Colimação do campo é feita por aplicadores, que já delimitam distância fonte-superfície



aplicadores



filtros

Colimação personalizada



UNIDADES DE TERAPIA - ORTOVOLTAGEM

Graus de liberdade de movimentação do tubo permite o posicionamento do feixe e do campo

Aplicador é posicionado em contato com a região a ser tratada e ajusta DFS



UNIDADES DE TERAPIA - ORTOVOLTAGEM

- *Timer* em min e segundos nas unidades antigas e em unidade monitora nos equipamentos mais modernos



UNIDADES DE TERAPIA - ORTOVOLTAGEM

Aplicação em tumor de pele

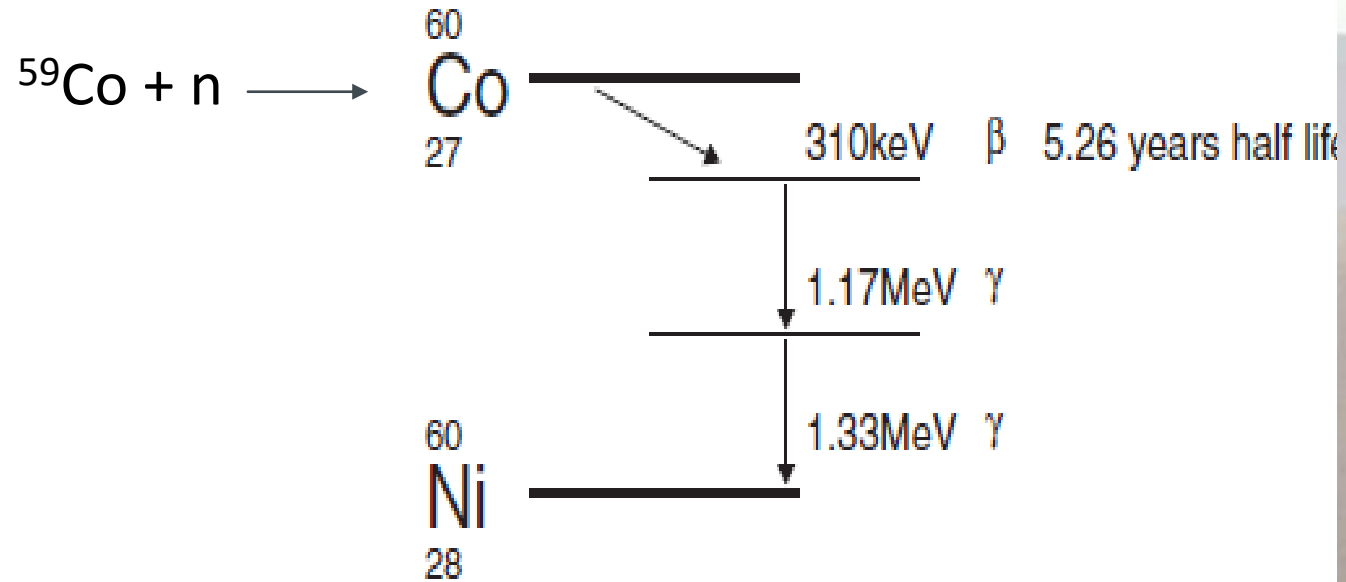


Tratado com cirurgia
e enxerto de pele

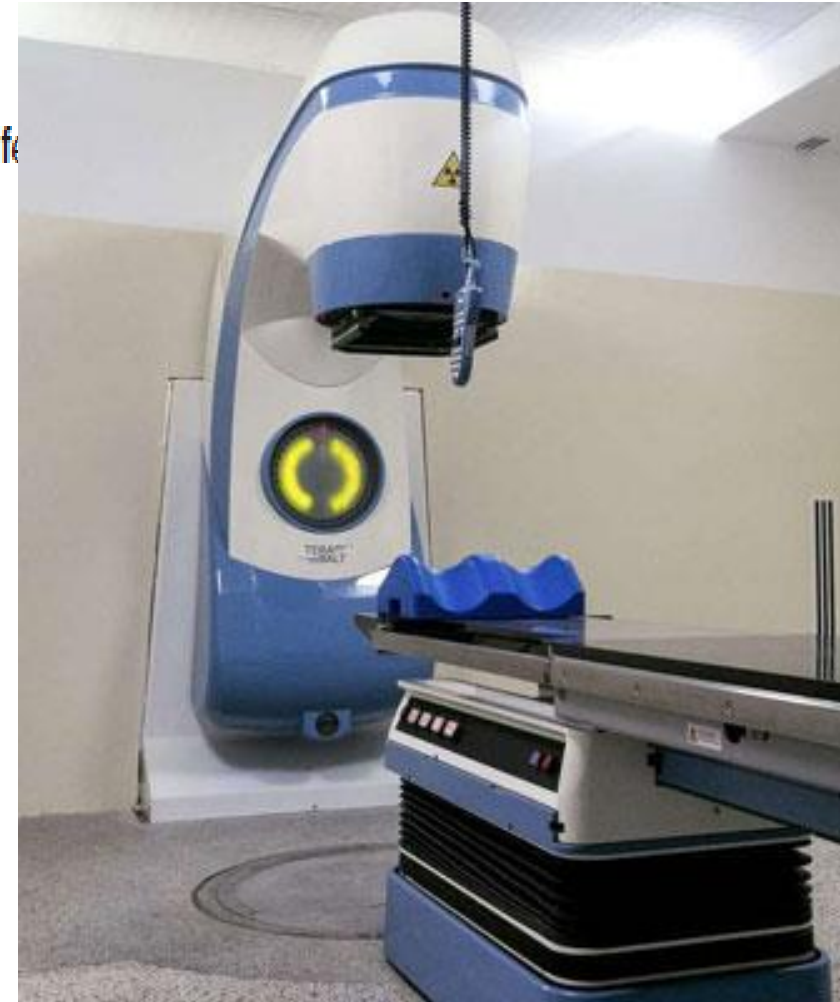
Tratado com RT-ortovoltagem
(melhor resultado cosmético)

UNIDADES DE TERAPIA - COBALTOTERAPIA

1951, Canadá – unidades de cobaltoteleterapia

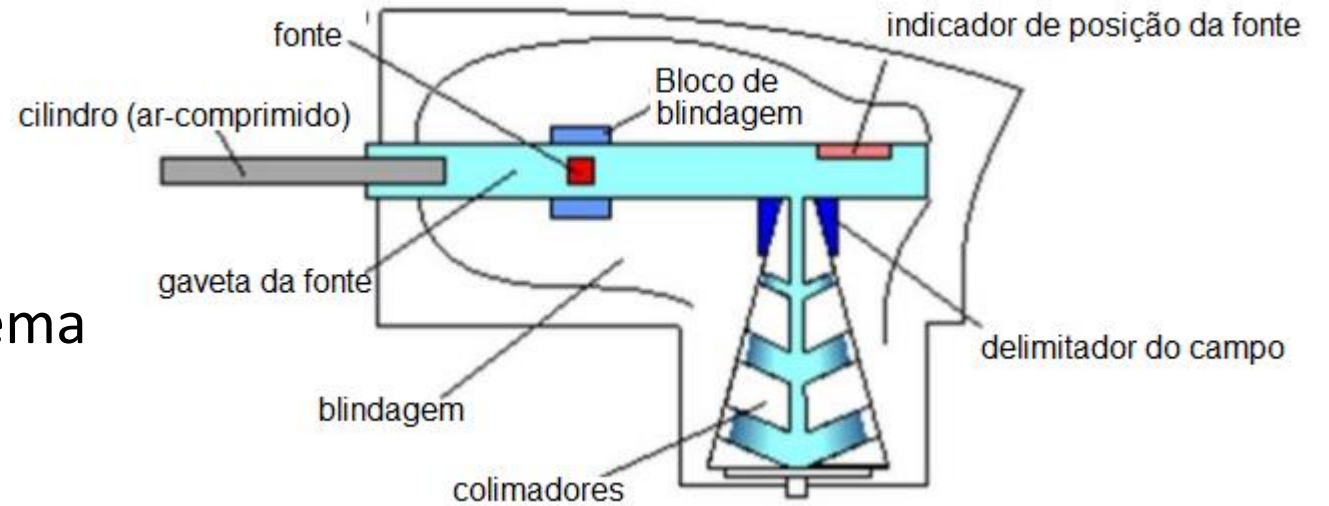


- Fontes de alta atividade – 5 - 10 kCi (185 – 370 TBq)
- Disco de ~ 2,5 cm de altura e 1 a 2 cm de diâmetro
- Meia-vida ~ 5,3 anos

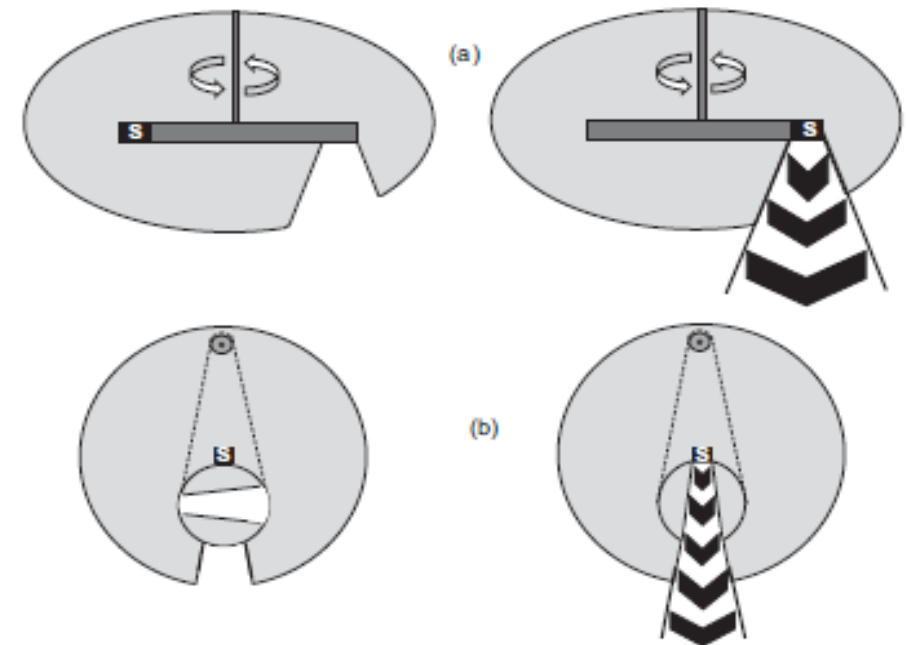


UNIDADES DE TERAPIA - COBALTOTERAPIA

Cabeçote deve prover blindagem e sistema de segurança para a fonte

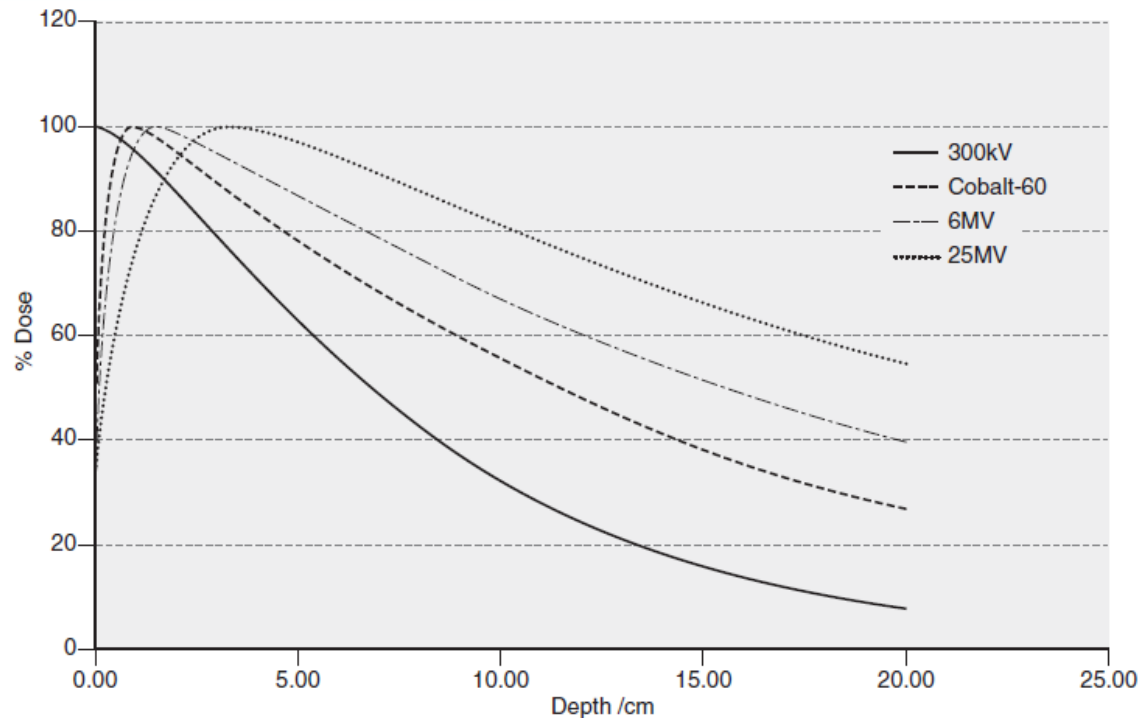


Há diferentes sistemas de “abertura” do campo

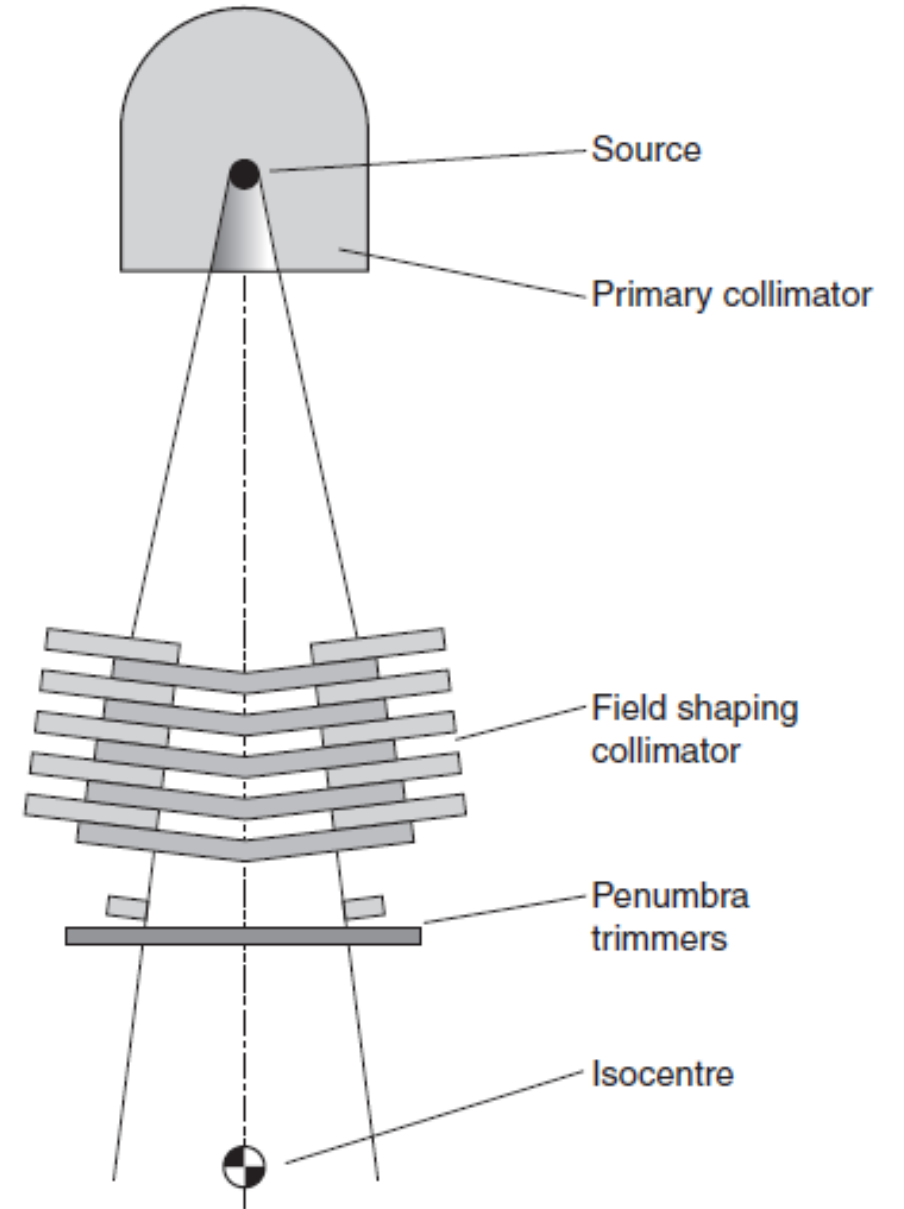
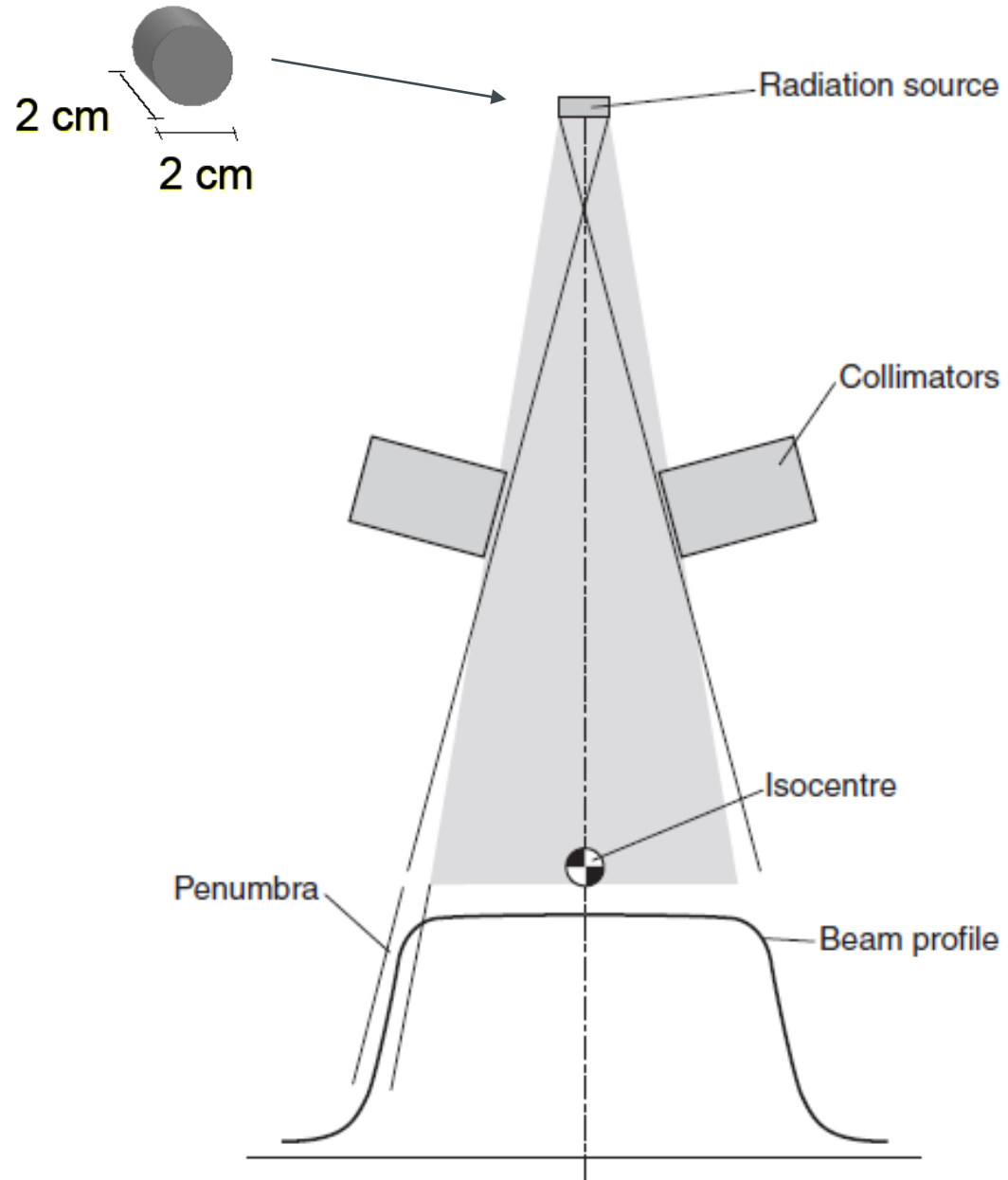


UNIDADES DE TERAPIA - COBALTOTERAPIA

- Taxa de dose ~ 100 a 200 cGy/min
- DFS = 80 cm
- $d_{\max} \sim 5$ mm (comparável a 2 MV Linac)
- Penumbra $\sim 1,5 - 2$ cm (*trimmers* na saída do cabeçote)

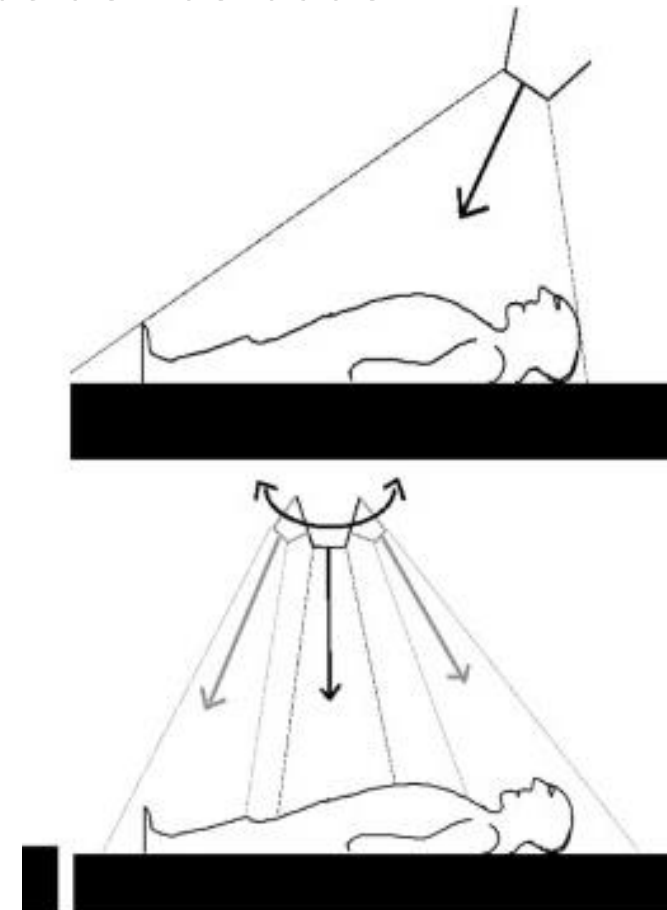
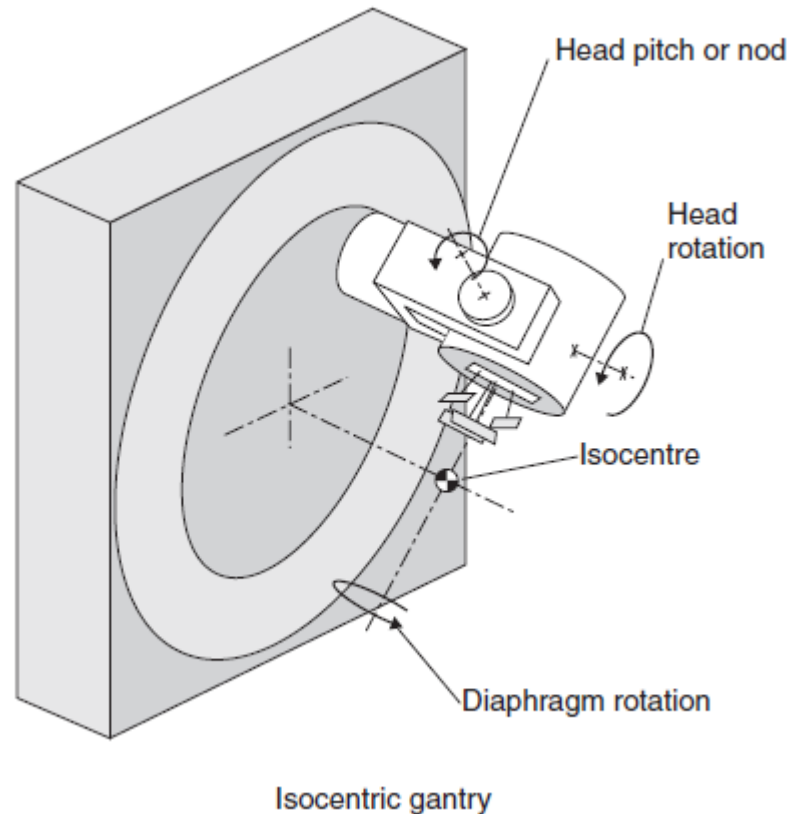


UNIDADES DE TERAPIA - COBALTOTERAPIA



UNIDADES DE TERAPIA - COBALTOTERAPIA

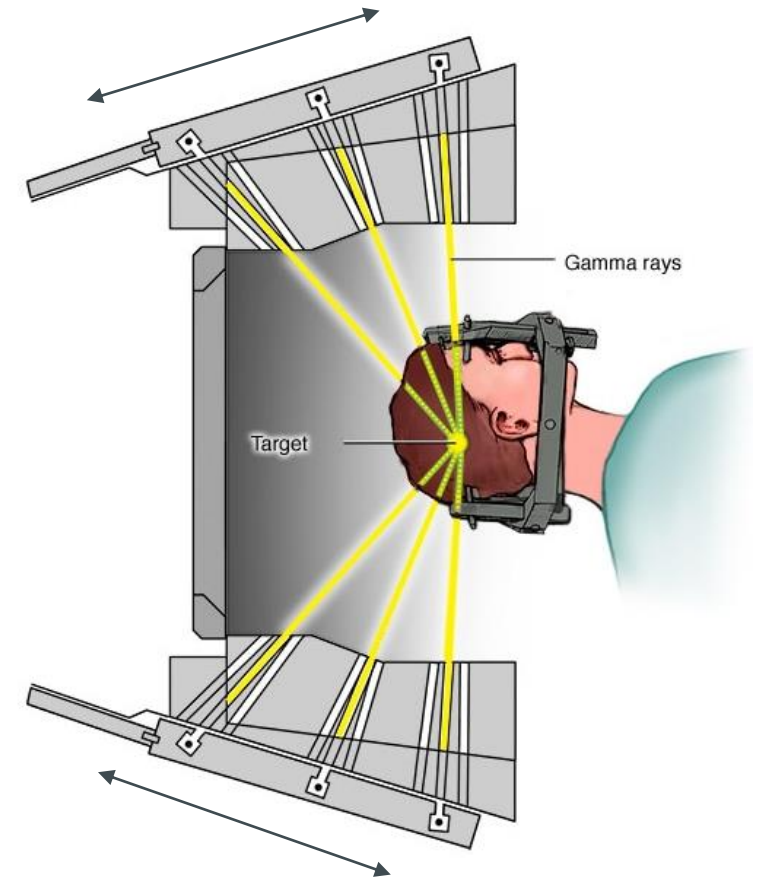
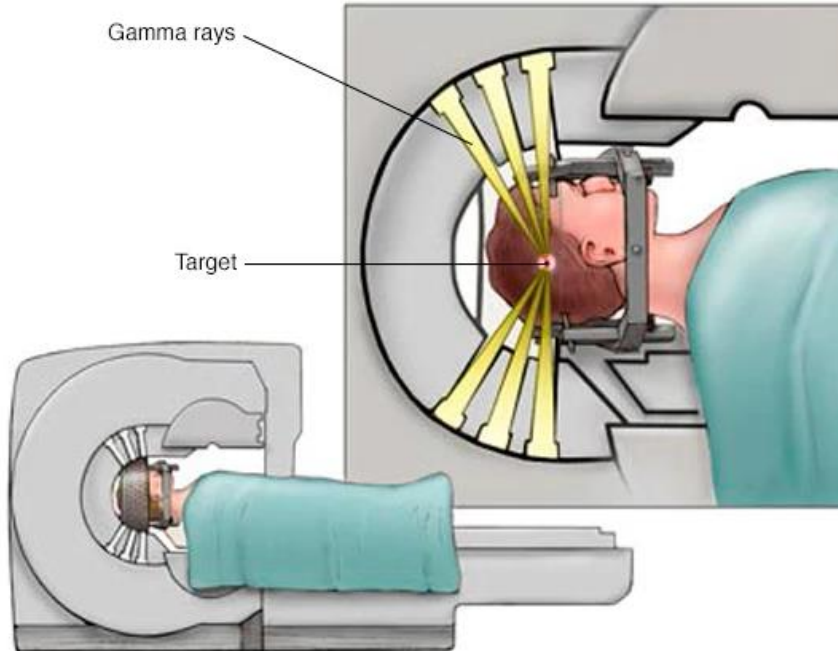
Algumas unidades de cobaltoterapia permitem mais graus de liberdade de direcionamento do feixe que os linacs convencionais



TBI (*Total Body Irradiation*): vantagem de posicionamento e taxa de dose

UNIDADES DE TERAPIA – GAMMA KNIFE

- Radiocirurgia ou radioterapia estereotáxica
- 201 (semi-esférica) ou 192 (cônica) fontes de Co-60
- Colimação secundária: 4, 8, 14 e 18 mm (semi-esférica)
4, 8 e 16 mm (cônica)
- DFE ~ 40 cm



UNIDADES DE TERAPIA – GAMMA KNIFE

- Altas doses
- Fração única ou poucas frações
- posicionamento e imobilização são fundamentais



UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

- Raios X
 - 4 a 25 MV
- Elétrons
 - 3 a 25 MeV

- DFS = 100cm

- Taxas de dose de 300 a 2400 cGy/min



UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

- Raios X
 - 4 a 25 MV
- Elétrons
 - 3 a 25 MeV

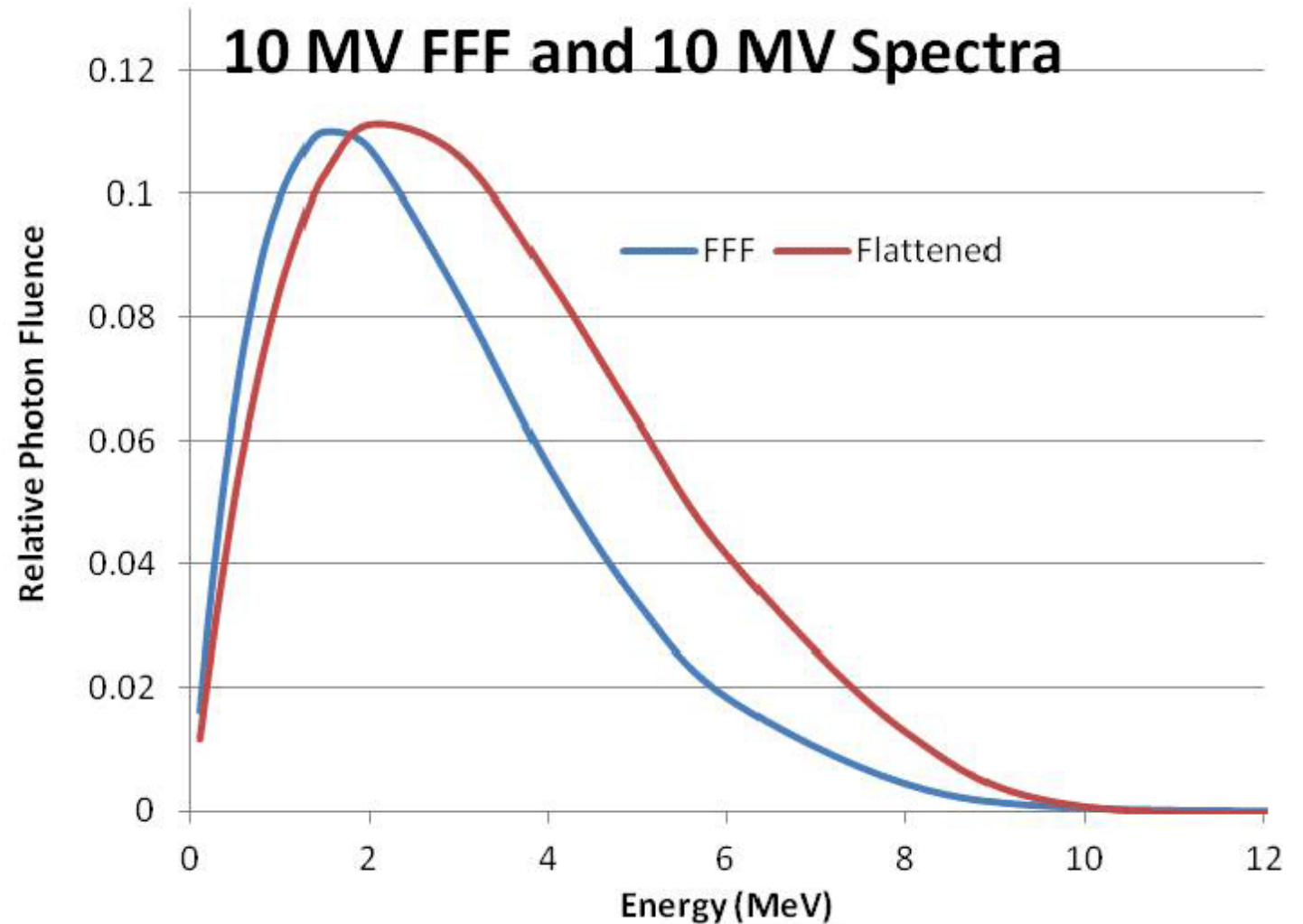
- DFS = 100cm



UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

Espectro de energia de fótons

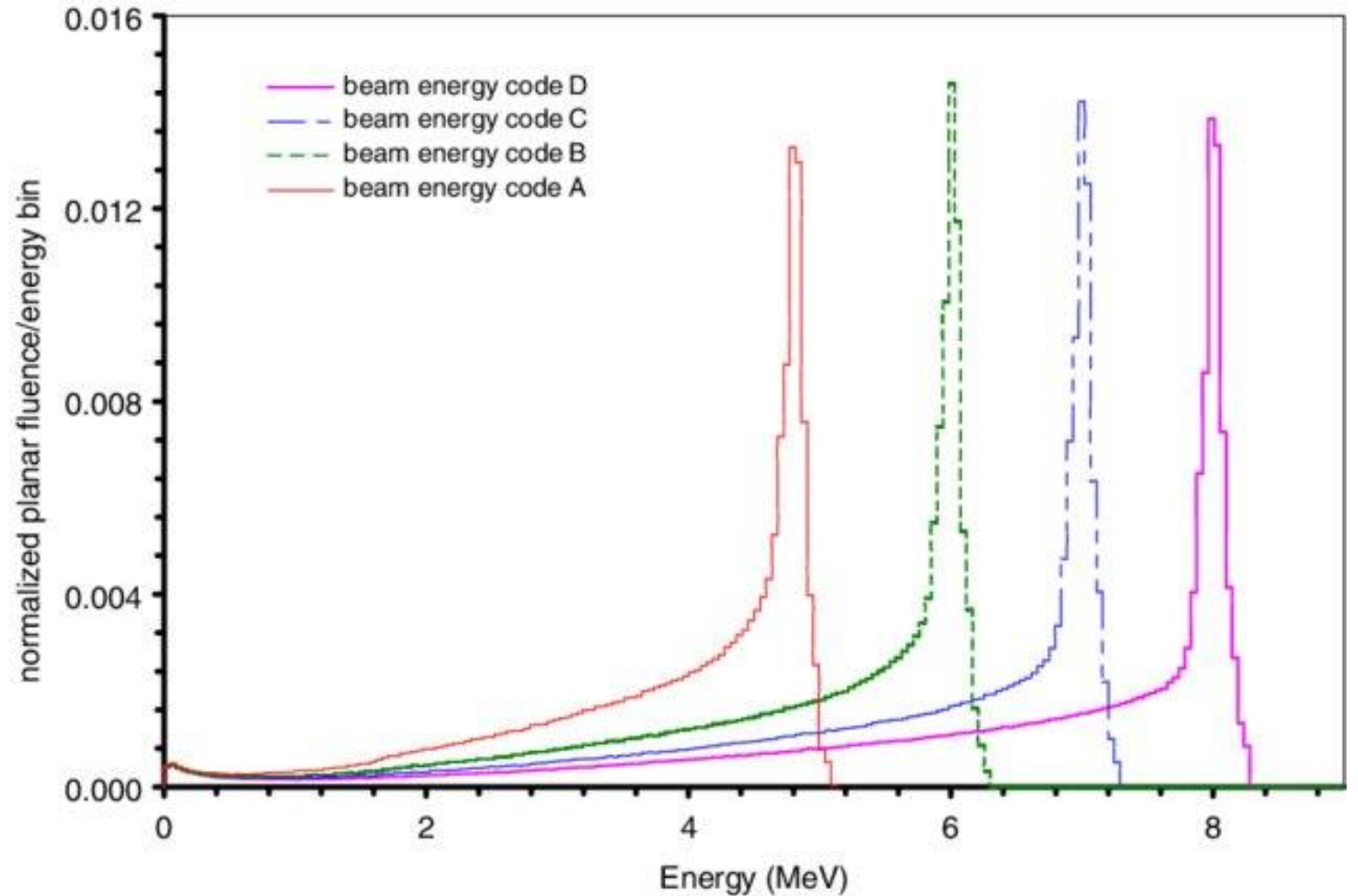
o espectro de energia do linac não é homogêneo, com a máxima energia correspondendo ao potencial acelerador.



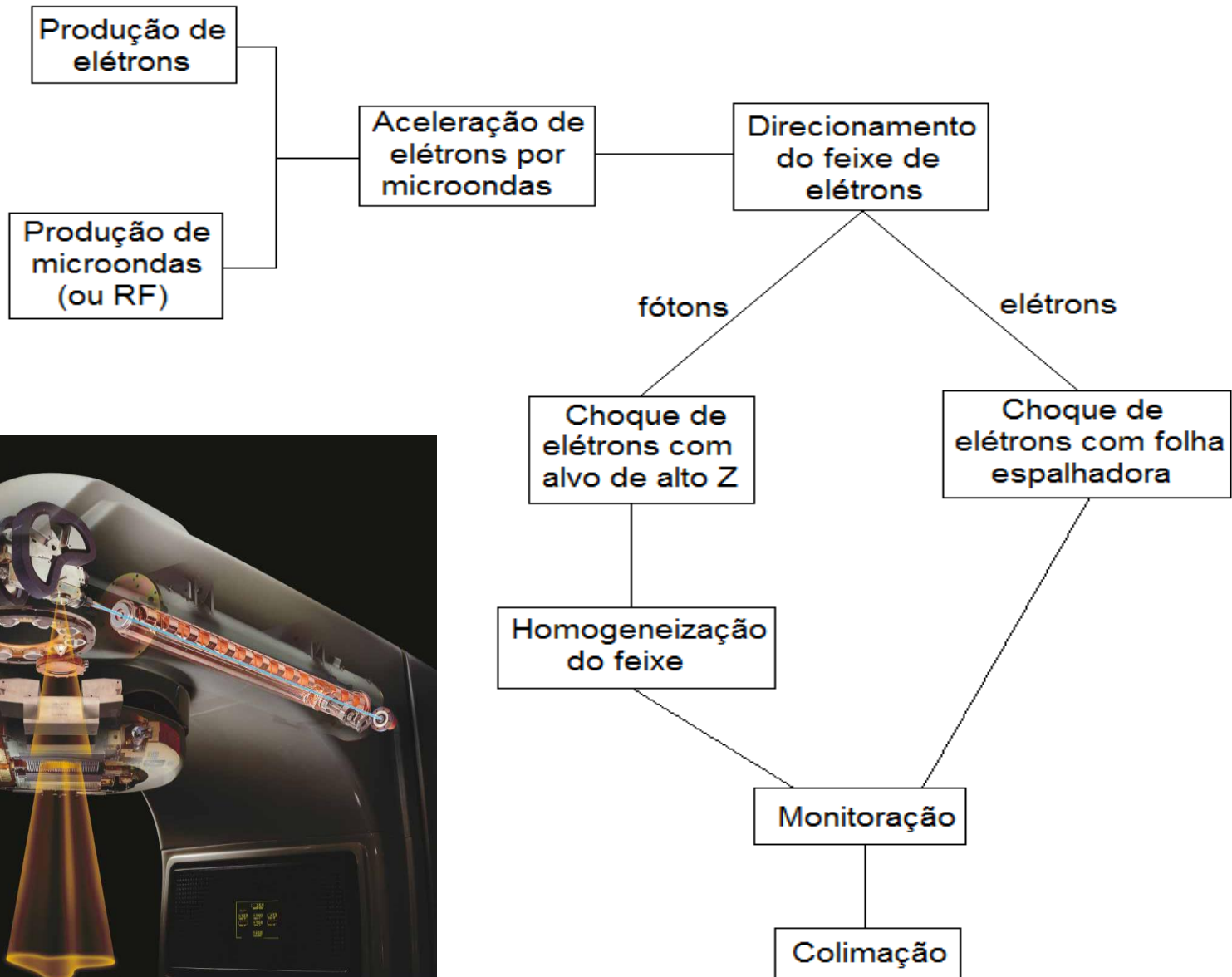
UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

Espectro de energia de elétrons

o espectro de energia é mais estreito, com o pico de energia bem próximo do potencial de aceleração



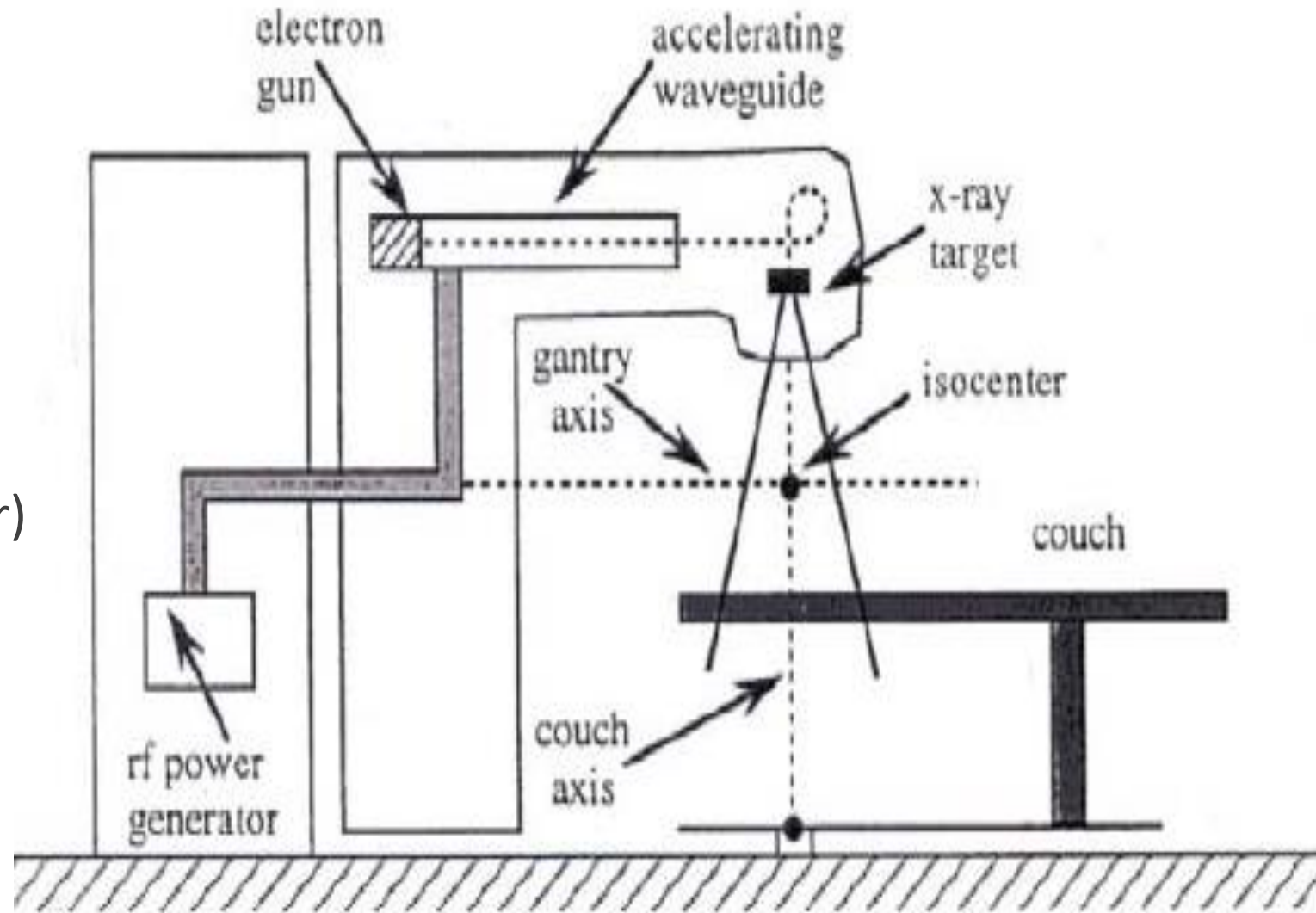
UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR



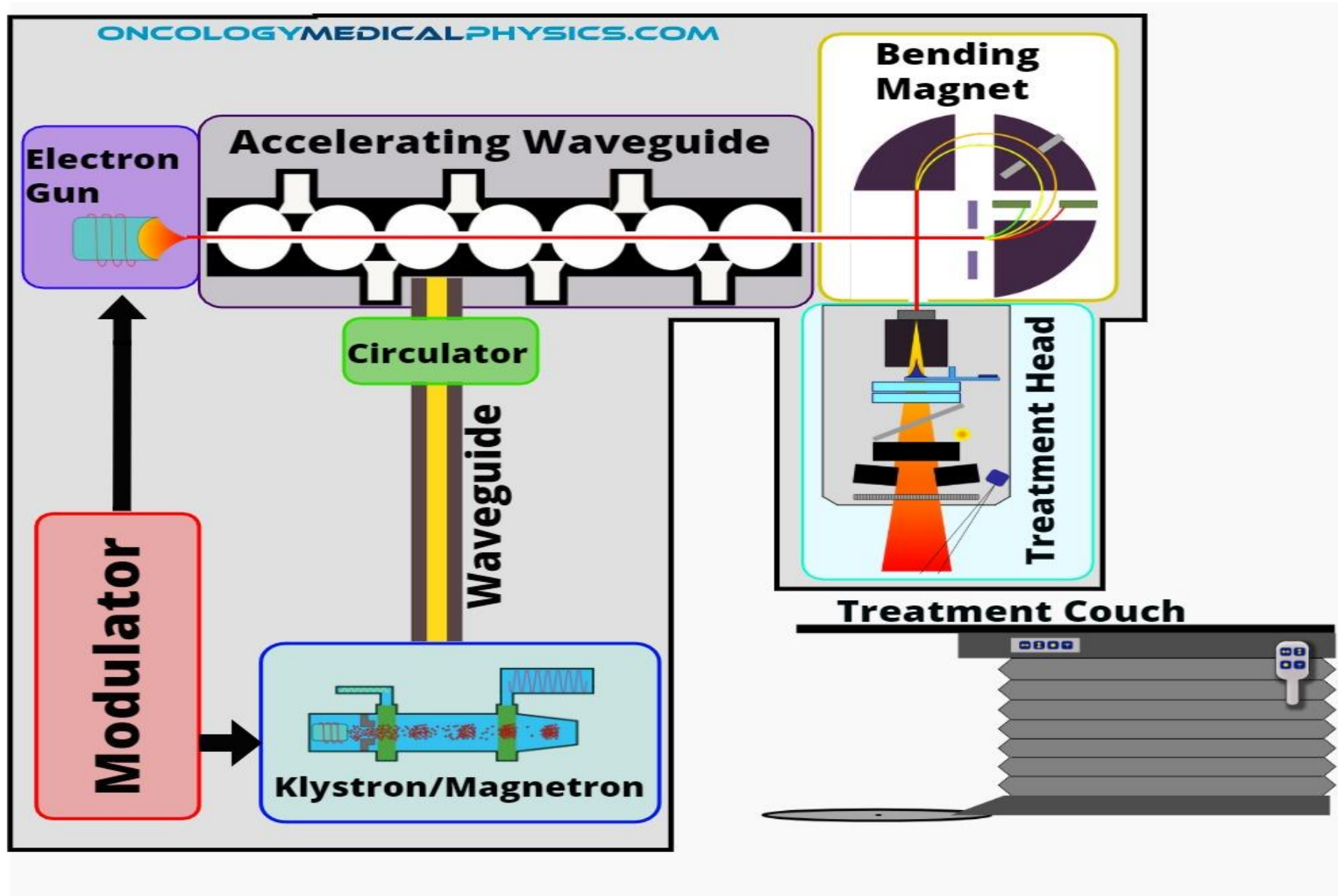
UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

Esquema simplificado dos principais componentes do linac

- Gerador de RF/microondas
- *Electron gun*
- Guia de ondas (tubo acelerador)
- Magnetos
- Alvo/homogeneizadores
- colimação



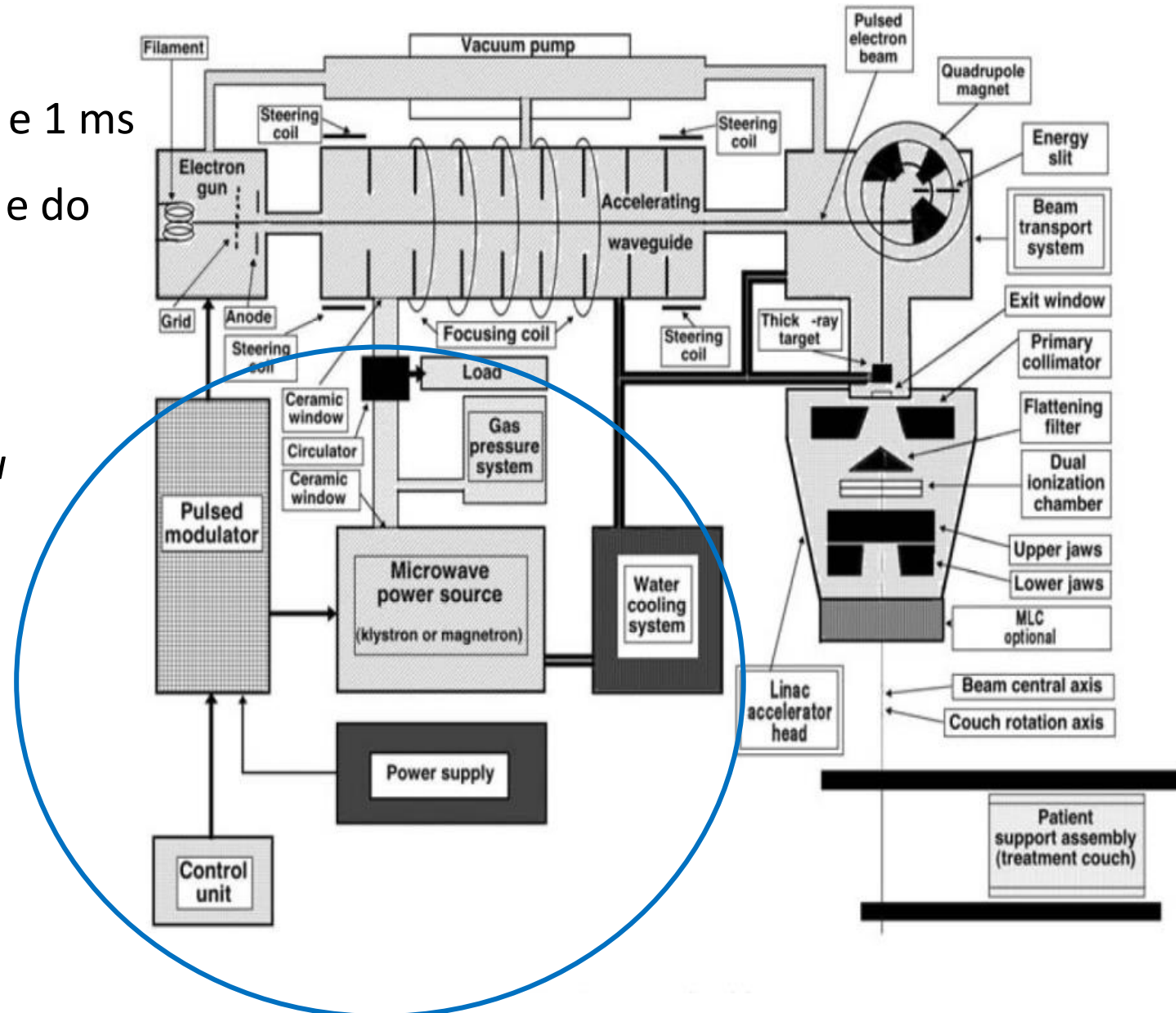
UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR



UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

Stand

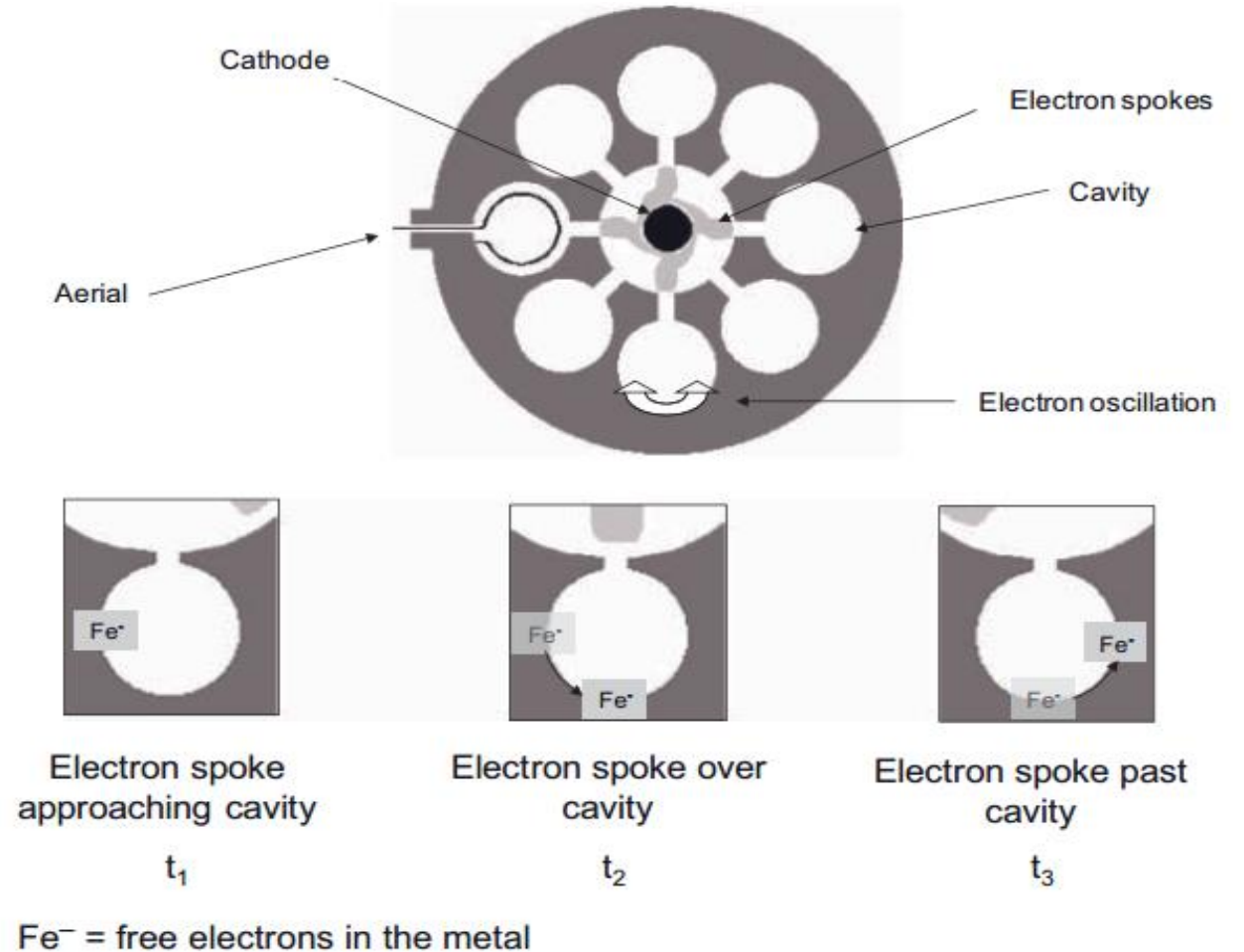
- Modulador de pulso: ~100 kV, 100 A e 1 ms para a alimentação do gerador de RF e do *electron gun*
- Fonte de microondas (*Magnetron ou Klystron* ~3000 MHz)
- Guia de ondas
- Circulador (isolador)
- Sistema de resfriamento



UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

- Magnetron: oscilador de alta potência para gerar RF

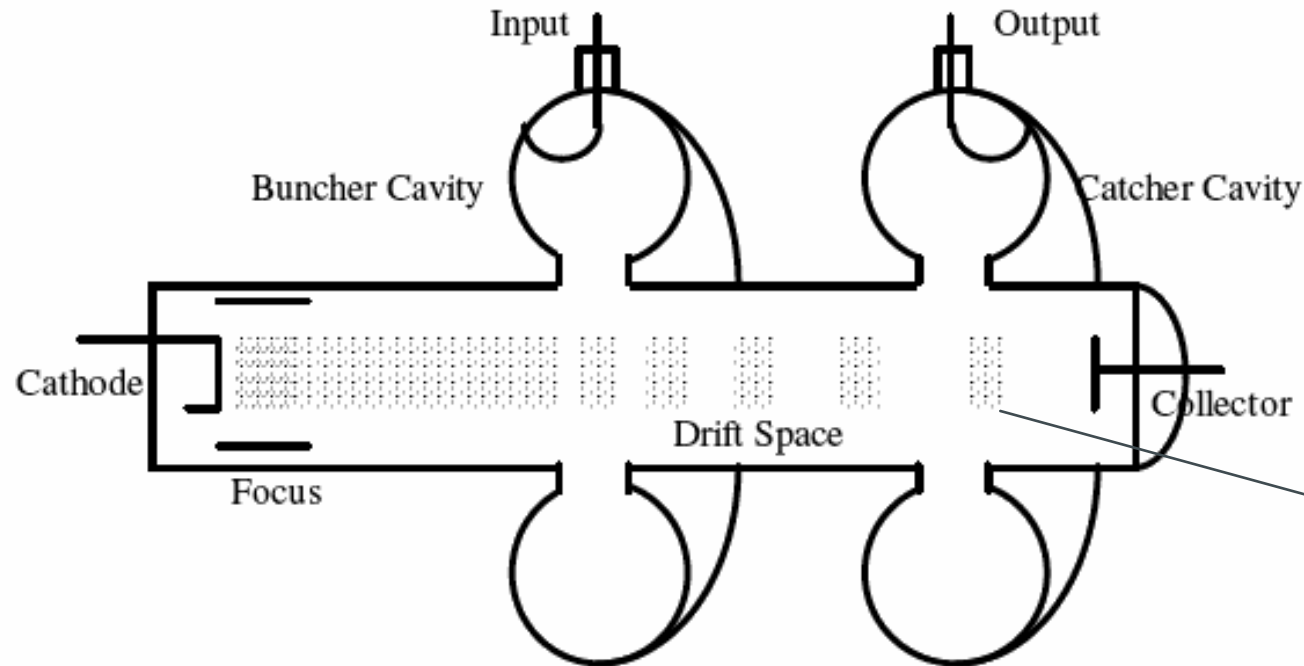
- Cátodo central emite elétrons que iniciam movimento circular na cavidade central devido a um campo magnético axial
- Movimento circular dos elétrons na cavidade central faz com que os elétrons livres do metal nas cavidades oscilem e gerem RF que é captada por uma antena



UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

Klystron: não é um oscilador, mas um amplificador RF/microondas

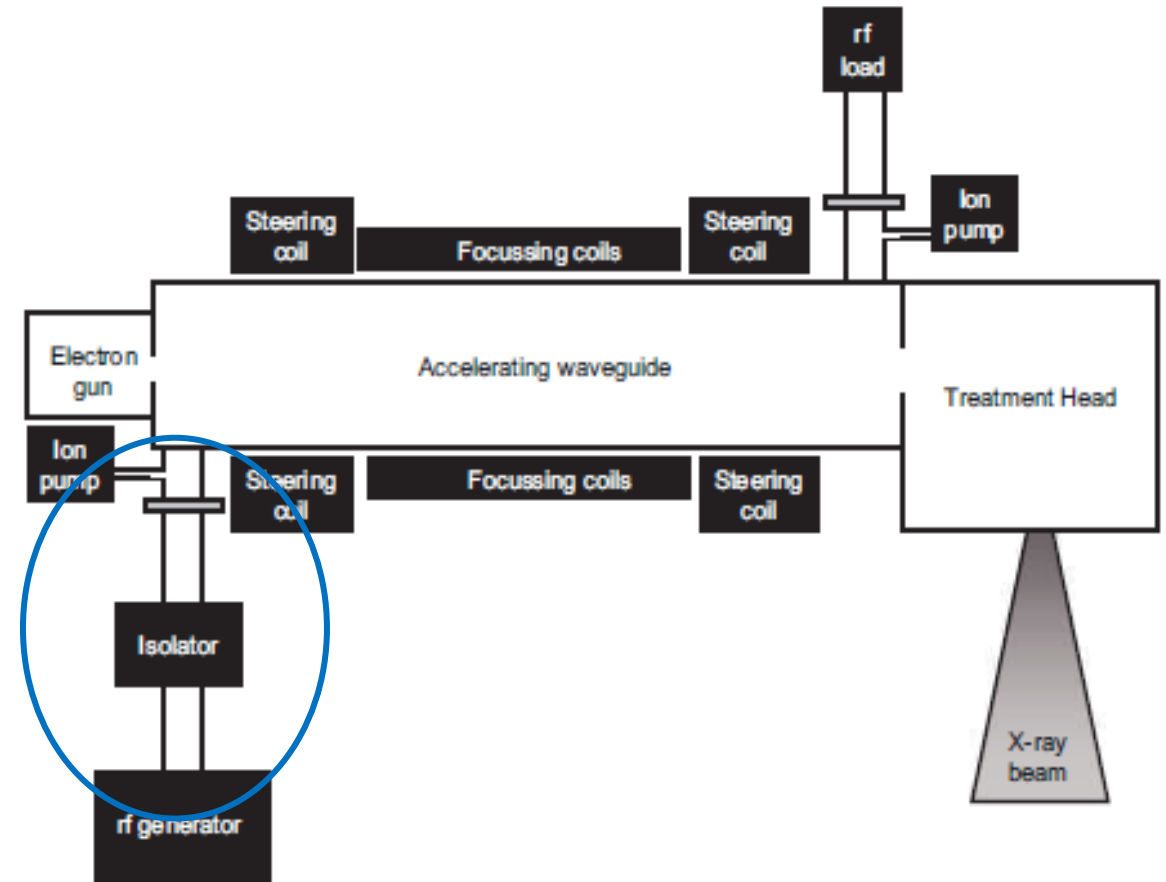
- Campo de RF/microondas é produzido por um oscilador de baixa potência
- Elétrons entram em cavidades ressonantes em fase com a onda de RF
- Trânsito dos elétrons pela cavidade produz excitação, que forma um campo de RF/microondas em fase com o campo inicial, mas aumentando sua intensidade



Nuvens de elétrons sincronizados pela *buncher cavity*, cujo sinal (amplificado em relação ao sinal de input) será coletado na *catcher cavity*

UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

- Guia de ondas
 - “Transfere/encaminha” ondas de RF para o tubo acelerador
 - 2 atm de hexafluoreto de enxofre ou gás freon (CFC) na guia previne descargas (atua como “*quenching*”)
 - Discos de ferrita são colocados ao longo da guia de ondas para absorver ondas de RF refletidas de volta para o gerador de RF (isolador ou circulador)

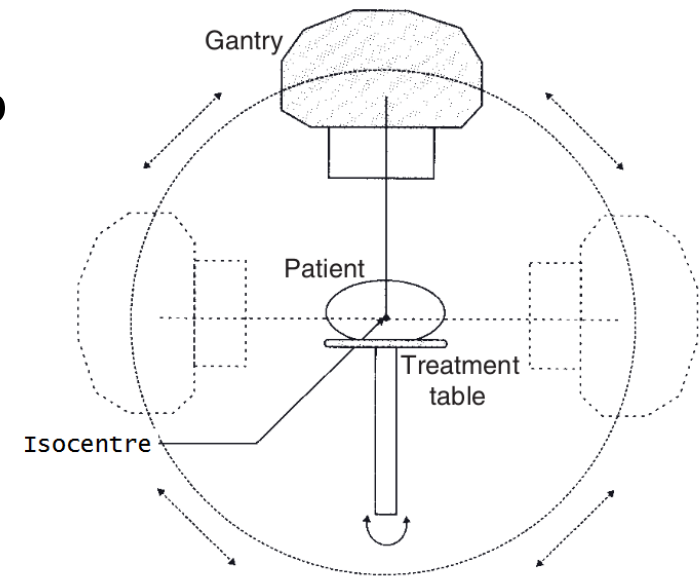
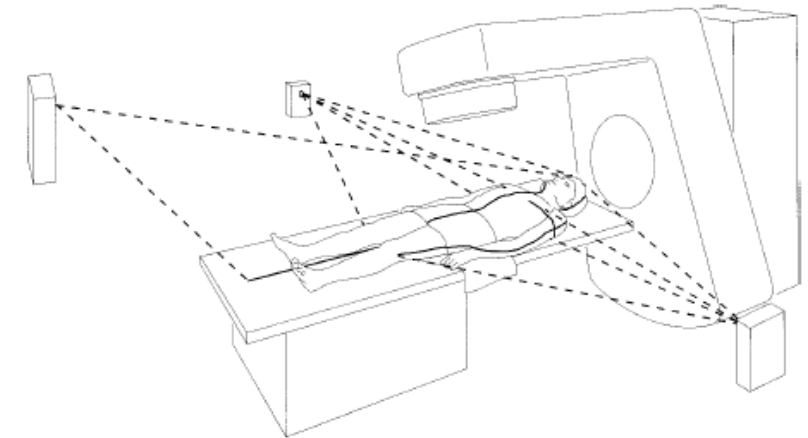


UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

Gantry

- braço e cabeçote
- blindagem contra radiação de fuga
- Rotação em torno do isocentro
- Ajuste do eixo central do campo de radiação
- DFE = 100 cm
- Montagem alinhada com sistema de posicionamento

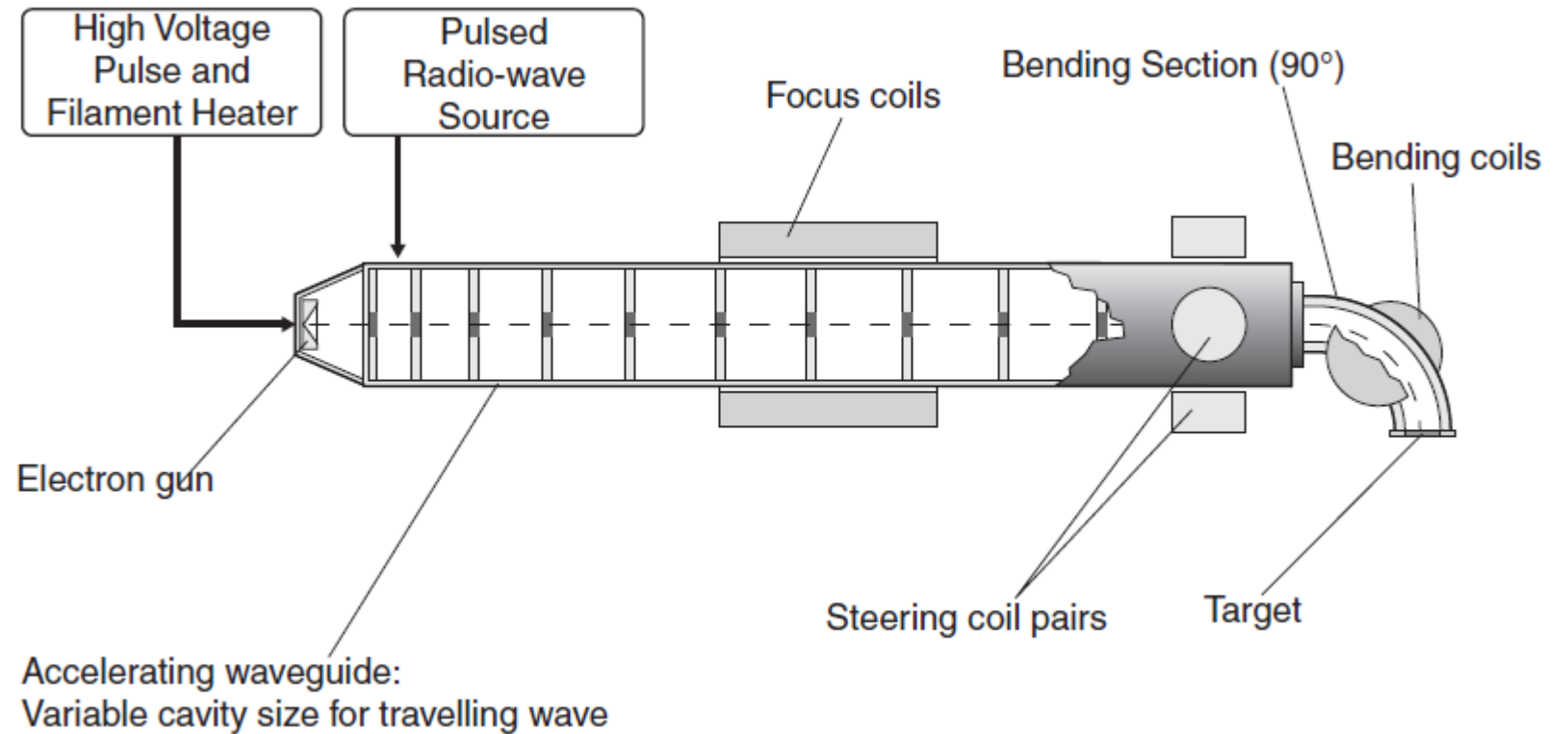
(lasers)



UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

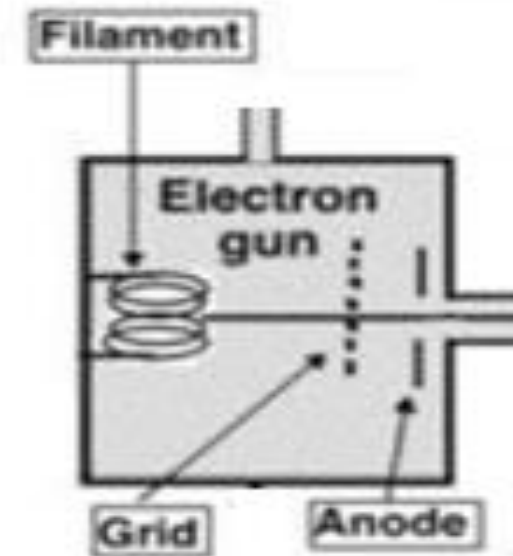
Gantry

- *Electron gun*
- Tubo de aceleração
- Cabeçote
 - Magnetos
 - Alvo
 - Filtros
 - Monitor
 - Colimadores



UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

- Electron Gun
 - Cátodo produz elétrons por emissão termoiônica ($\sim 800^{\circ}\text{C} - 1100^{\circ}\text{C}$)
 - Diodo: tensão pulsada no cátodo
 - Tríode: tensão contínua no cátodo e pulsada em uma grade na frente do ânodo
 - Grade: potencial pulsado (0 e negativo) controla a frequência dos pulsos de elétrons que entram no tubo acelerador
 - Elétrons são acelerados para o ânodo por um potencial eletrostático (produzido pelo modulador, ligado ao gerador de RF)
 - Ânodo possui um orifício central que permite a passagem dos elétrons para a guia de ondas de aceleração (atenção: elétrons não se chocam com o ânodo como no tubo de raios X)

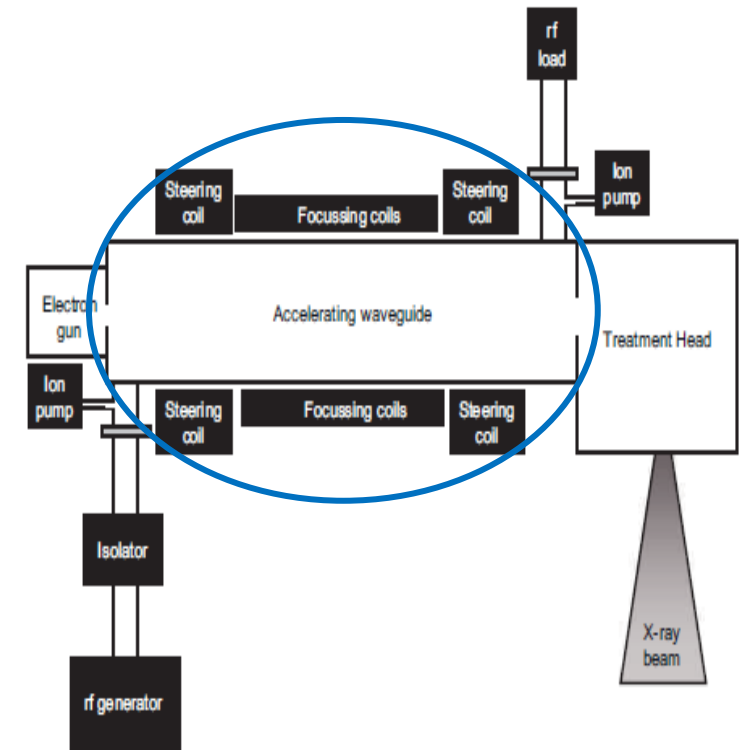
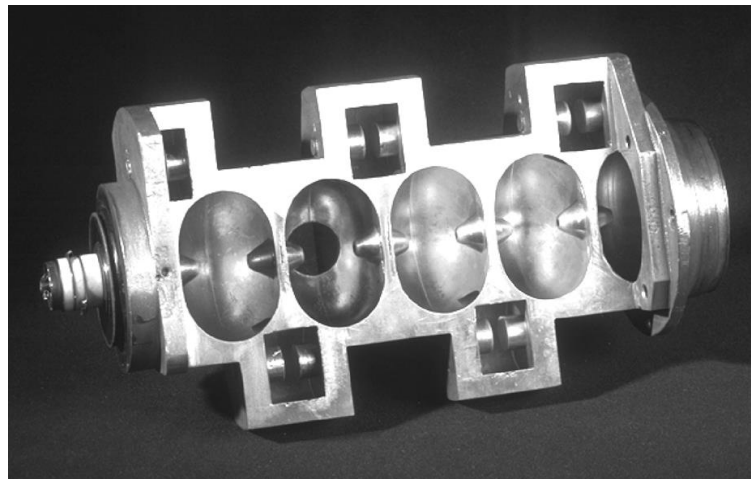


UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

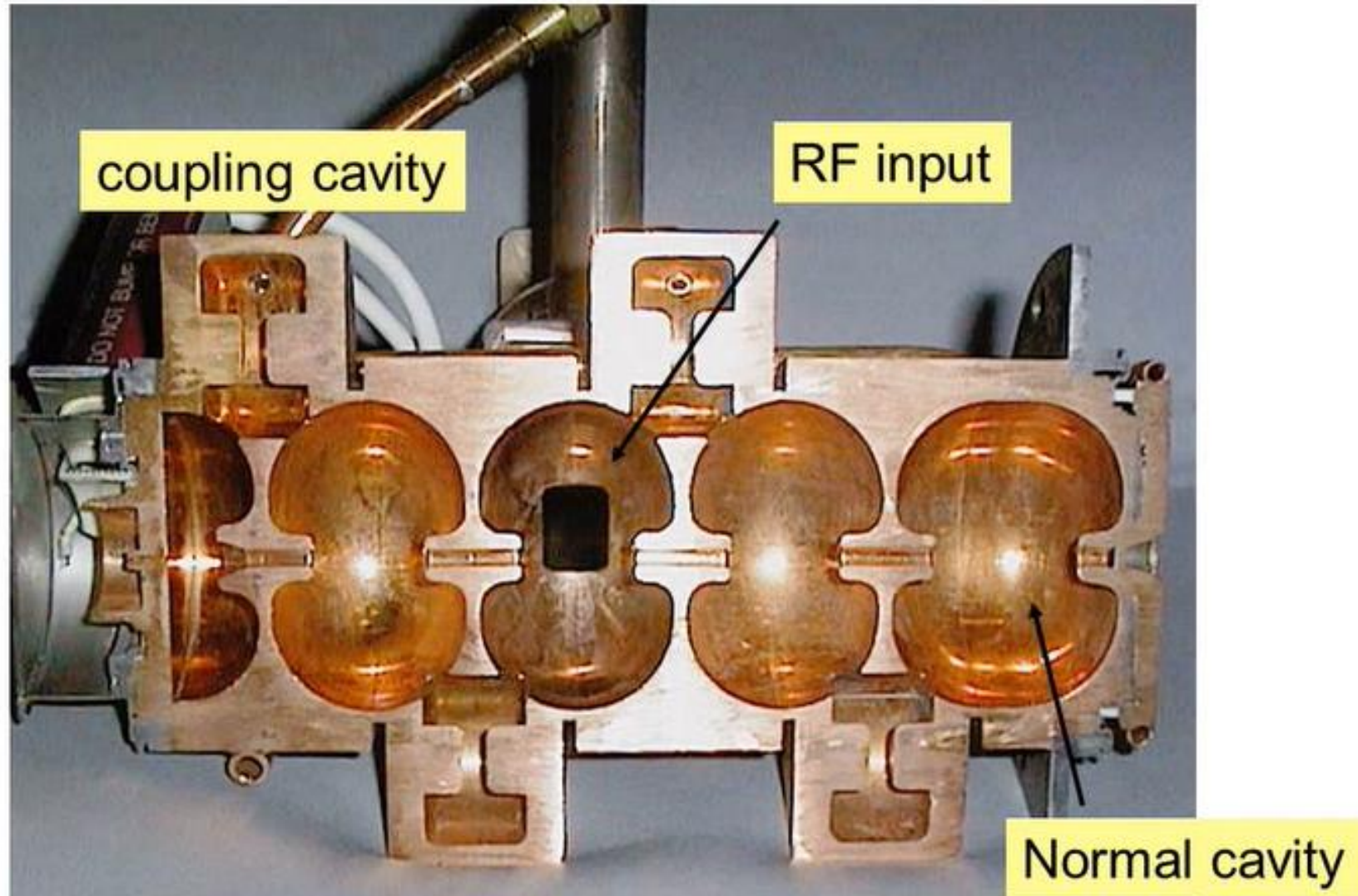
Tubo acelerador

- ~ 30 cm para 4 MeV e 1,5 m para 25 MeV
- formado por cavidades aceleradoras sucessivas
- ondas de RF e elétrons entram em fase na guia de ondas (do tubo acelerador) para produzir *bunching dos elétrons nas primeiras cavidades e ganho de energia nas outras cavidades*

- Ondas viajantes
- Ondas estacionárias



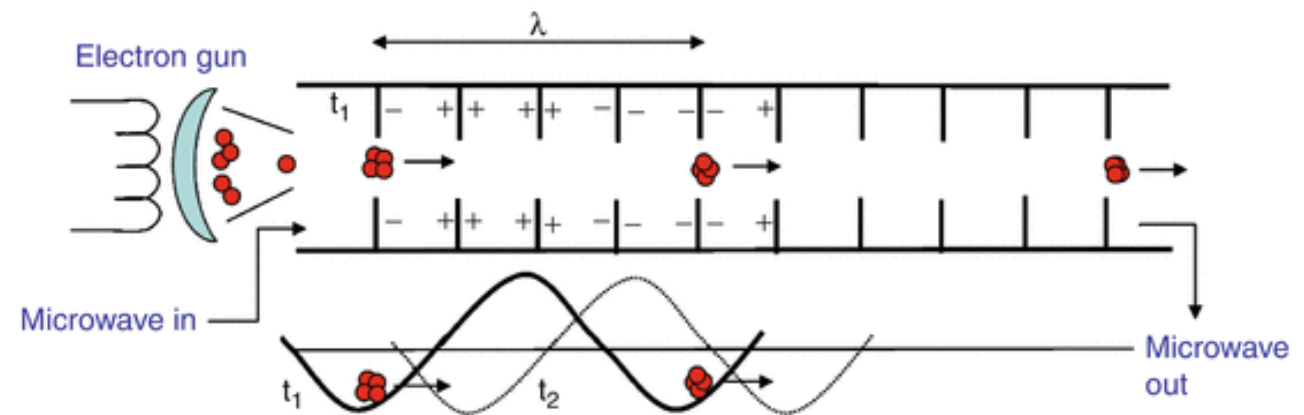
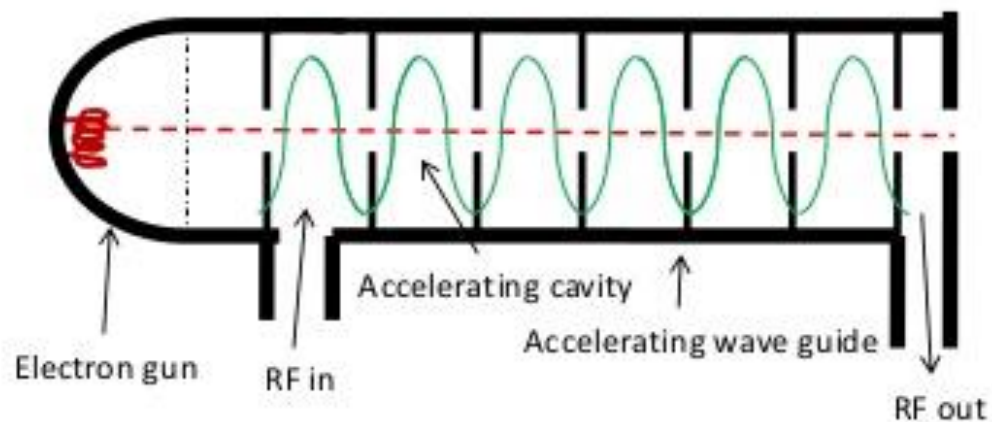
UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR



UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

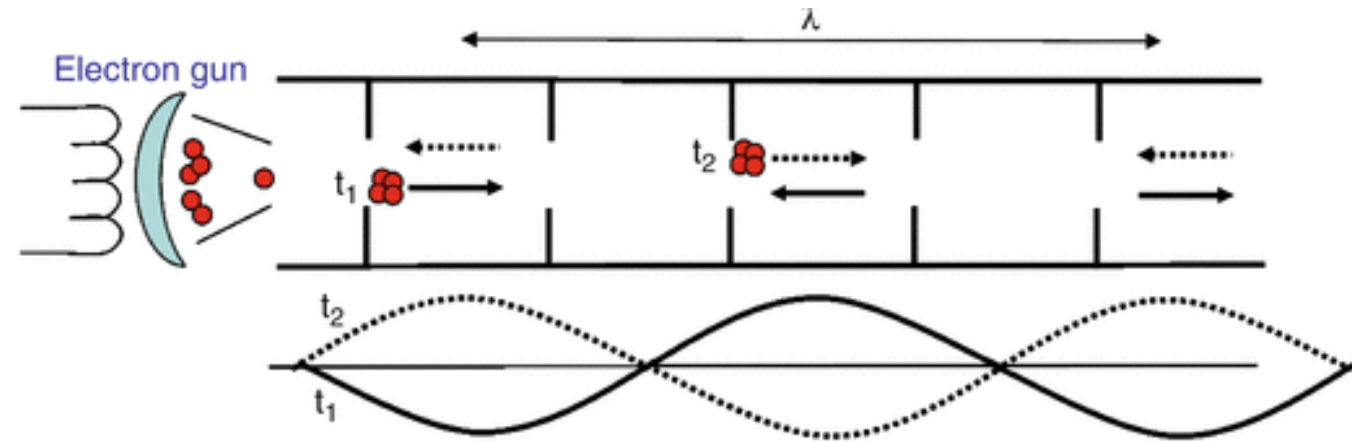
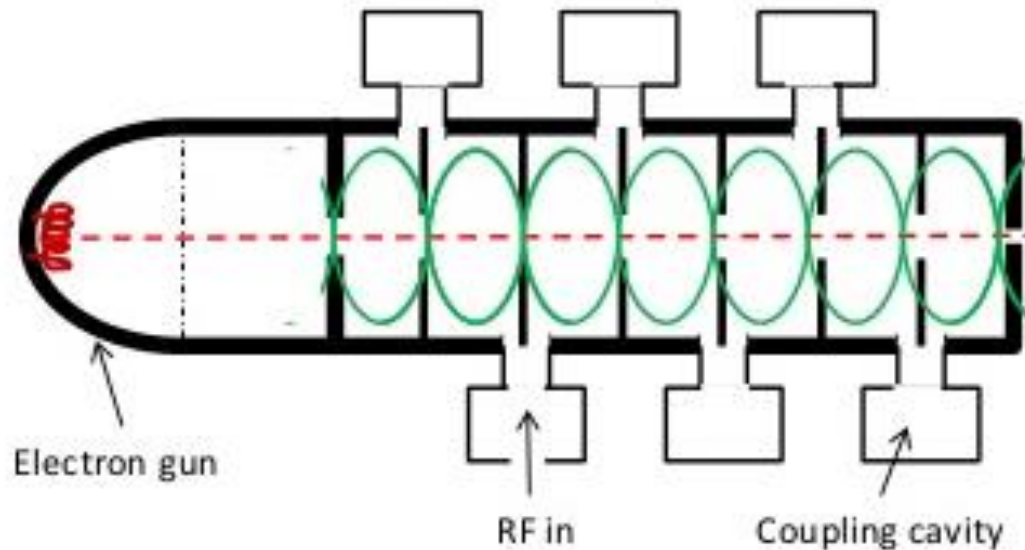
Tubo acelerador

- Ondas viajantes
 - onda de RF/microonda viaja ao longo do tubo e é absorvida no final do tubo ou alimentada de volta para o início do tubo, não havendo reflexão de volta pela guia de ondas
 - 1 a cada 4 cavidades é aceleradora em dado instante



UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

- Tubo acelerador
 - Ondas estacionárias
 - cada extremidade da guia de ondas do tubo acelerador possui um disco refletor das ondas de RF, produzindo uma onda estacionária ao longo da guia
 - 1 a cada 2 cavidades não possui potencial acelerador



UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

Sistema de resfriamento

- Refrigeração do gerador de RF, do tubo acelerador e do alvo
- Bomba de água para circulação e trocador de calor

Bomba de vácuo (*ion pumps*)

- Produz vácuo de $\sim 10^{-6}$ - 10^{-7} Torr no tubo acelerador
- Previne que os elétrons sendo acelerados colidam com gás no tubo acelerador

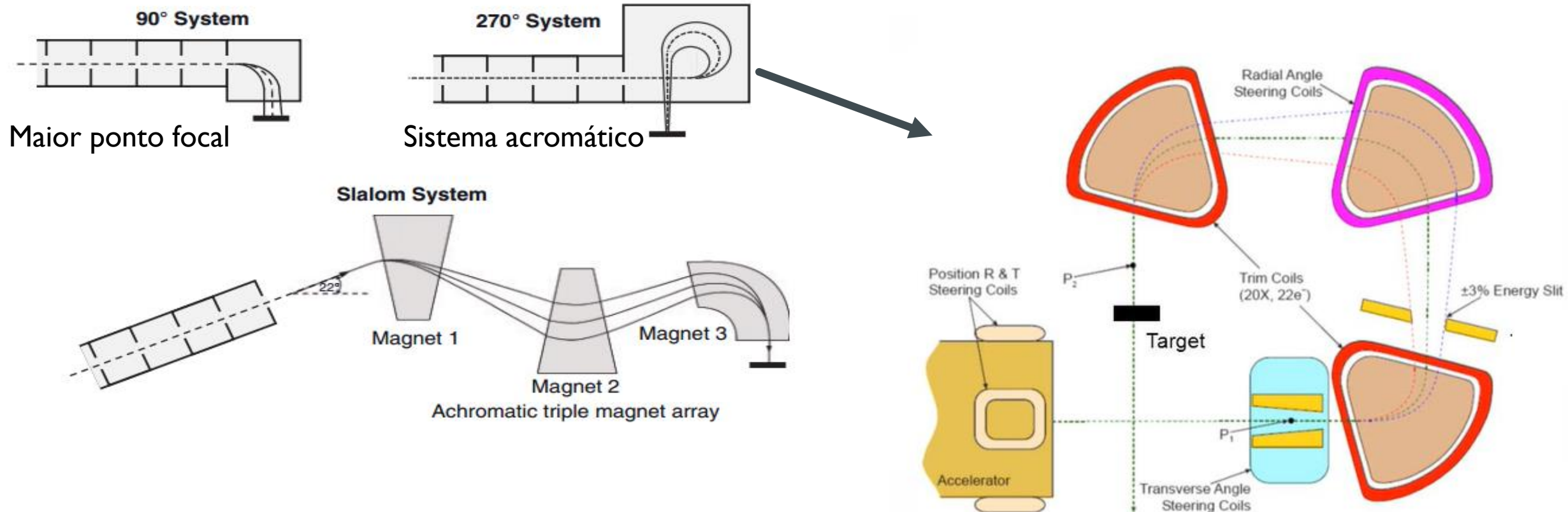
UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

- Bobinas focalizadoras
 - Produzem campo magnético ao longo do tubo acelerador
 - Mantem os elétrons juntos, prevenindo seu espalhamento e mantendo a nuvem eletrônica coesa

- Bobinas centralizadoras
 - Pares de magnetos no início e final do tubo acelerador
 - Corrige campos externos e mantém nuvem eletrônica viajando no centro do tubo acelerador

UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

- bending magnets
 - Direcionam o feixe de elétrons para a direção do alvo
 - Mantém a nuvem de elétrons coesa e homogênea

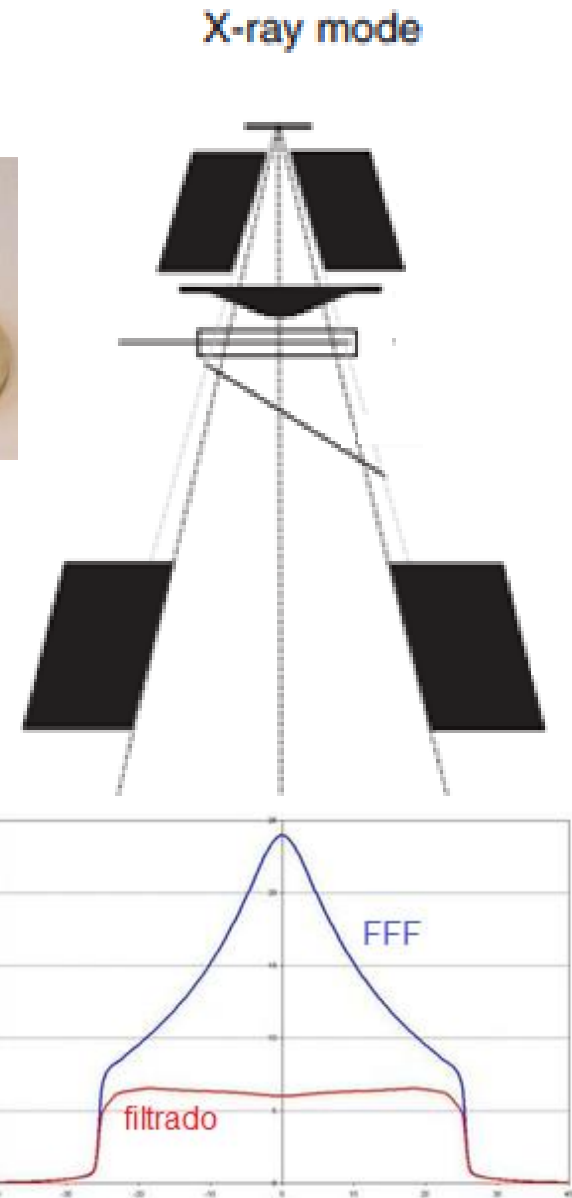
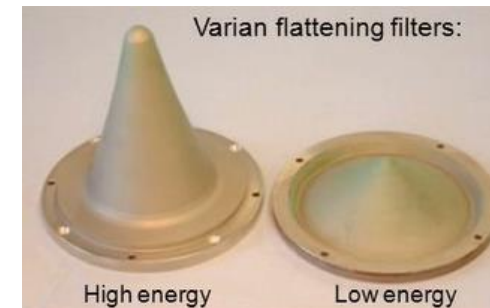


UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

- Alvo
 - Raios-X de alta energia são produzidos, preferencialmente, para frente
 - Alvos de “transmissão” proporcionam maior rendimento útil que os alvos de “reflexão”
 - Alto número atômico para maior eficiência X (Ex: ouro p/ energia até 15 MV)
 - Espessura: o suficiente para frear os elétrons e não atenuar o feixe de Raios-X produzido
 - Água circula pela borda da estrutura do alvo para resfriamento

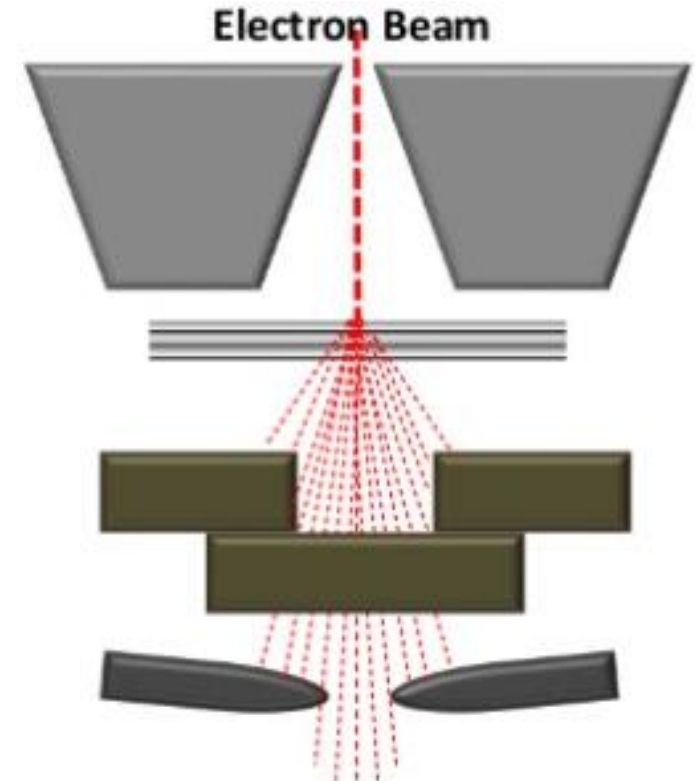
UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

- Filtro achatador - apenas para raios-X
 - Maior fluência de raios-X é produzida no eixo central
 - Filtro achatador homogeniza a fluência ao longo do campo, mas reduz a taxa de dose
 - Formato cônico
 - Latão ou outro material – alto número atômico permite filtros mais compactos, mas modifica a qualidade do feixe
 - Dois filtros diferentes para Linacs duais

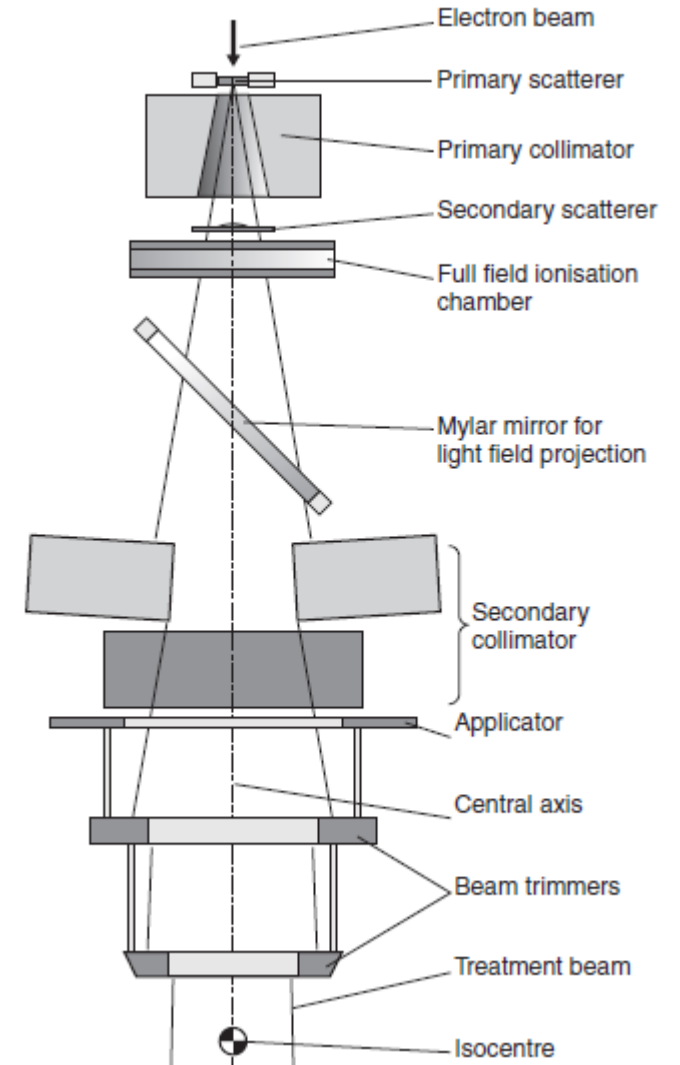
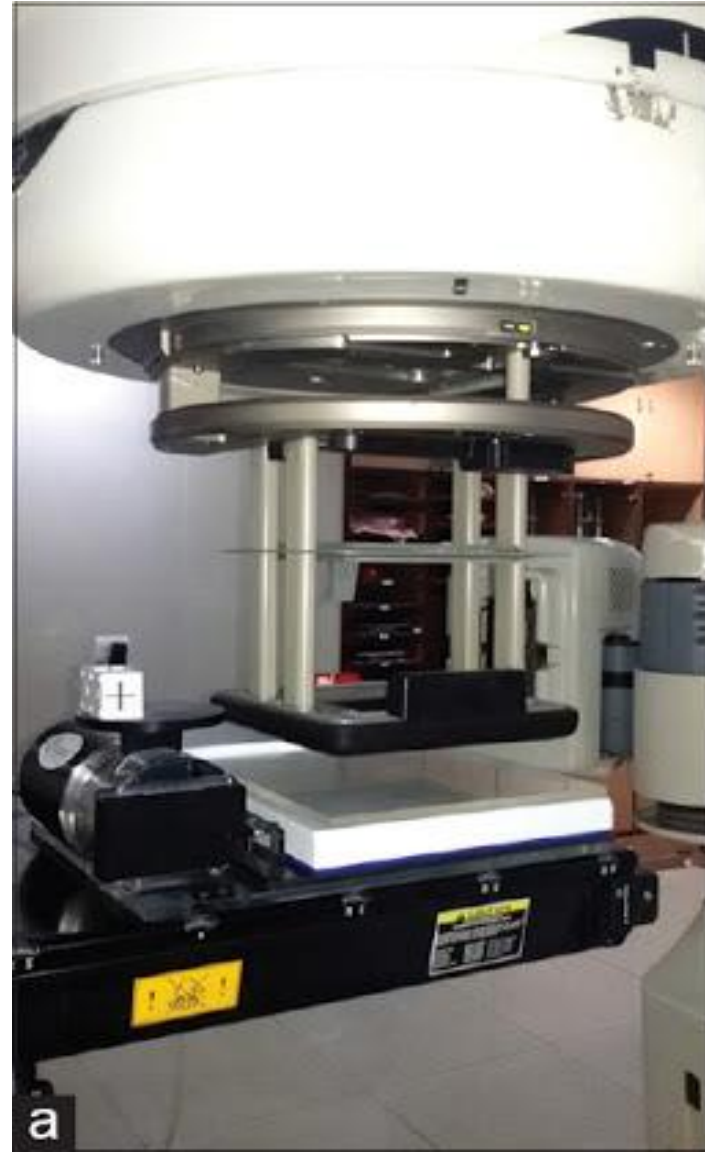
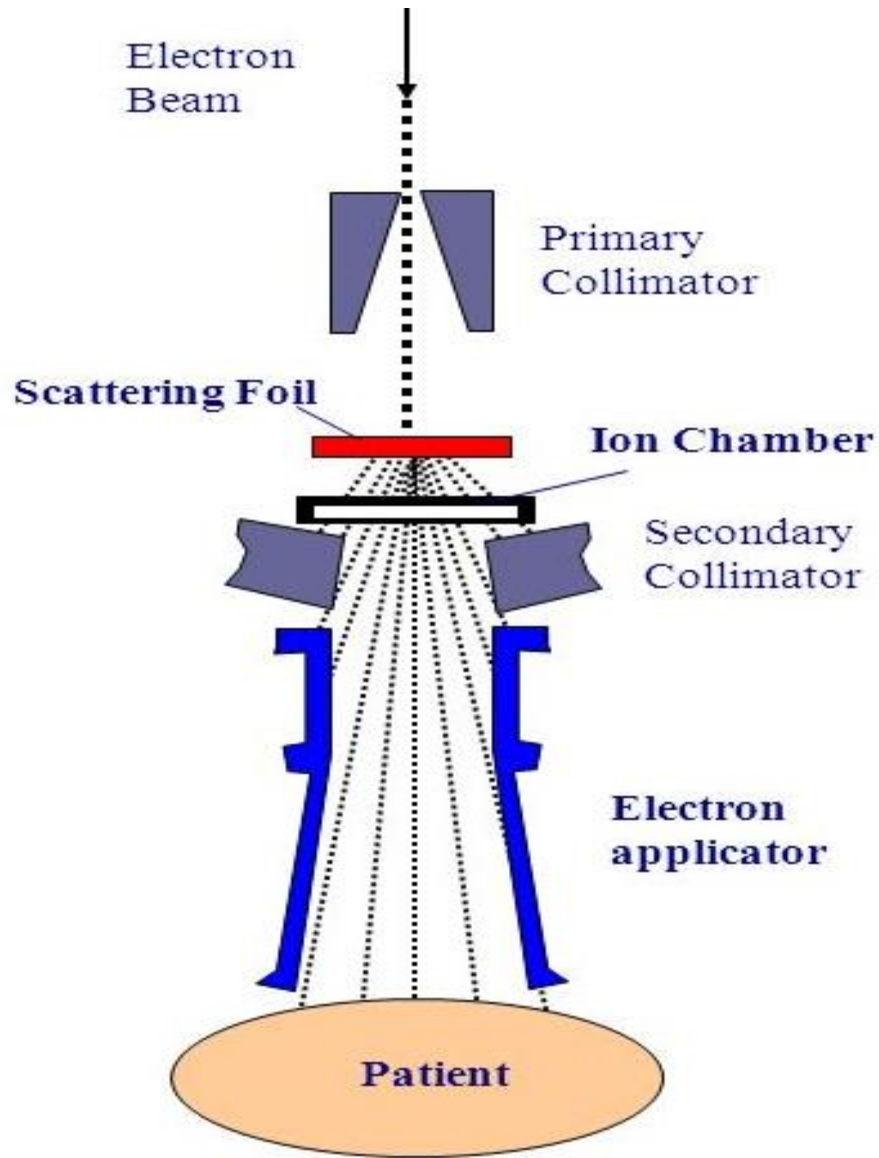


UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

- Folhas espalhadoras - apenas para elétrons
 - Diferentes folhas montadas em um carrossel (junto com o filtro achatador)
 - Folhas finas de alto Z (cobre, tântalo, chumbo 0.05-0.4mm) seguida de folha de baixo Z (alumínio 1-3mm), que permitem o espalhamento dos elétrons e redução de *bremsstrahlung*
 - Ar e paredes do aplicador proporcionam espalhamento que contribui para homogeneidade do feixe

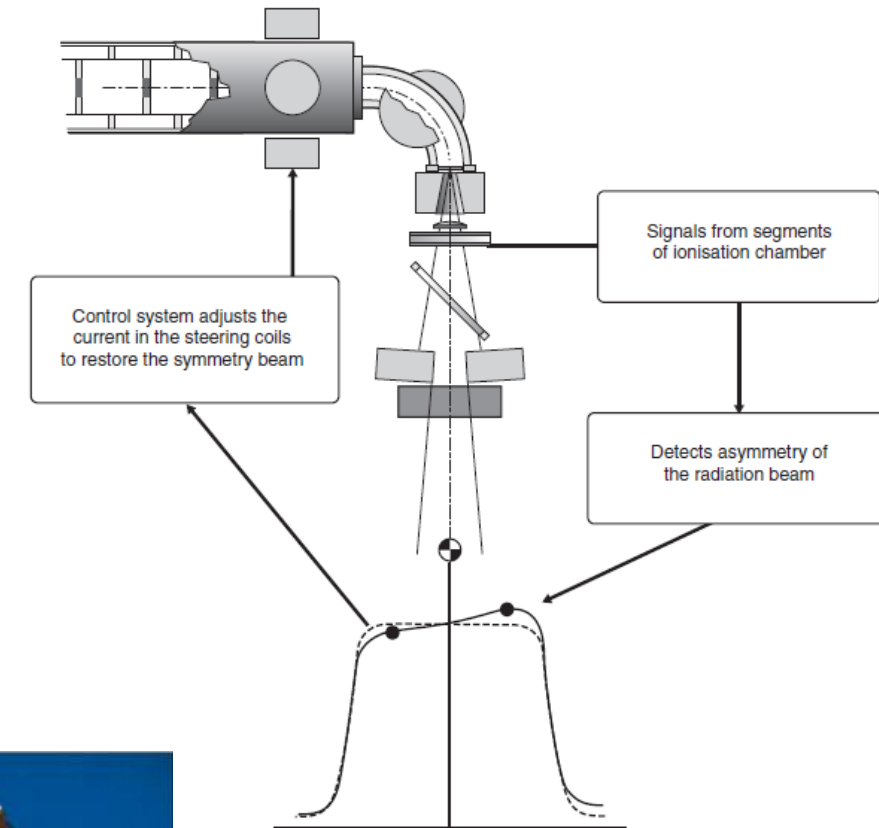


UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR



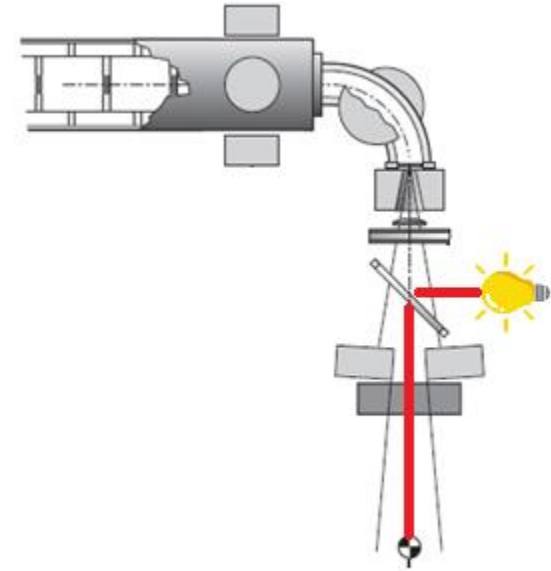
UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

- Monitor – câmara de ionização
 - *Tandem* de placas paralelas e selada para dupla verificação
 - Dividida em setores, que provêm feedback para as bobinas de centralização e magnetos
 - Feixe pode ser interrompido quando o número de unidades monitor excede um limite pré-estabelecido



UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

- Sistema ótico - espelho
 - Lâmpada é posicionada de um lado do cabeçote e um espelho reflete a luz a 45° para a direção do feixe
 - Espelho de *Milar* - filme fino de *poliester* com uma superfície coberta com material refletor (alumínio) de alguns micrômetros
 - escala luminosa auxilia posicionamento no isocentro

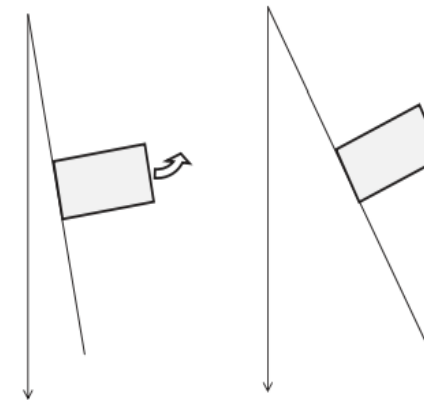
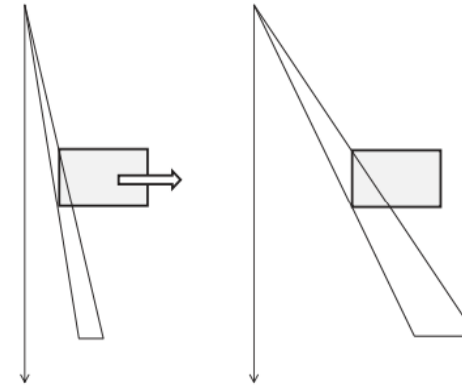
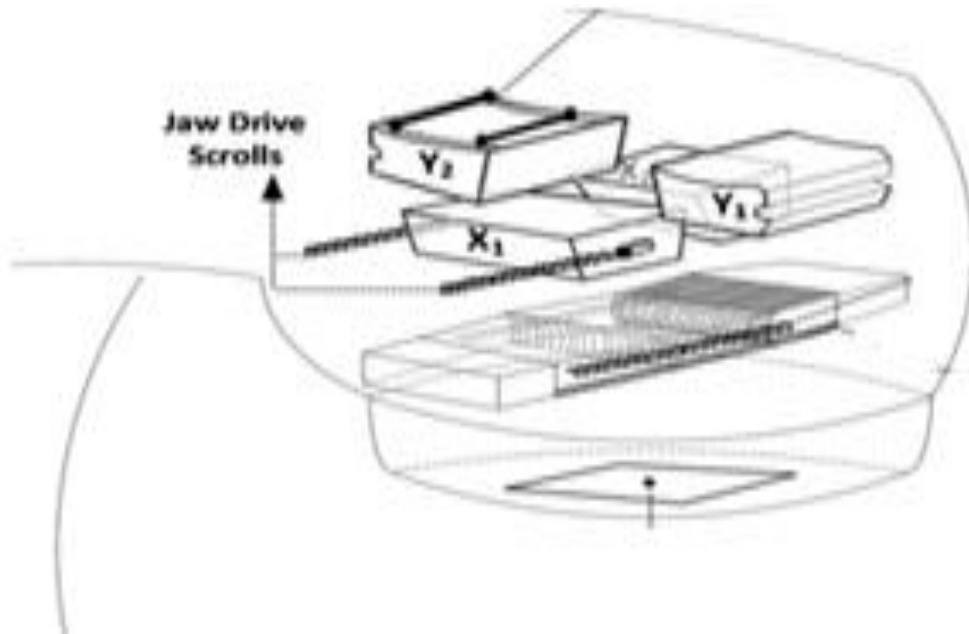


UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

- Colimadores
 - Primário
 - Próximo ao alvo, para definição do tamanho máximo de campo
 - Geometria circular, define máxima abertura do campo
 - Secundário ou *jaws* (aberto para o modo elétron)
 - Simétricos ou assimétricos
 - Dois pares de blocos de chumbo com posições ajustáveis, determinando campos retangulares (até ~ 40 x 40 cm² na DFS de 100 cm)
 - Calibração do tamanho do campo para DFE = 100 cm

UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

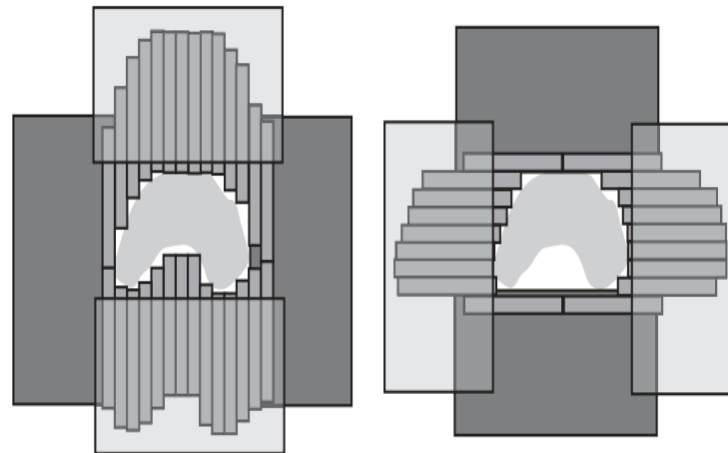
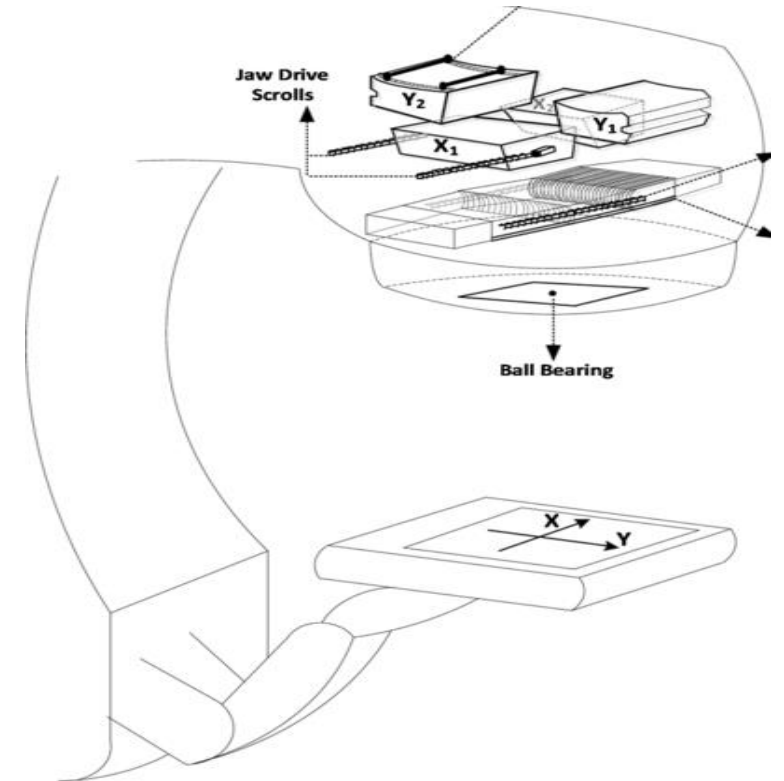
- Colimadores secundários
 - Movimento em arco para acompanhar divergência do feixe, diminuindo penumbra



UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

Colimadores

- Multi-lâminas (MLC)
- 60 pares de lâminas controladas por computador
- aproximadamente 1 cm em DFE = 100 cm
- mMLC ou mMLC: ~3-5 mm em DFE = 100 cm
- Posicionado abaixo dos colimadores secundários
- Lâminas de tungstênio com movimentação independente
- Movimentação em apenas um eixo



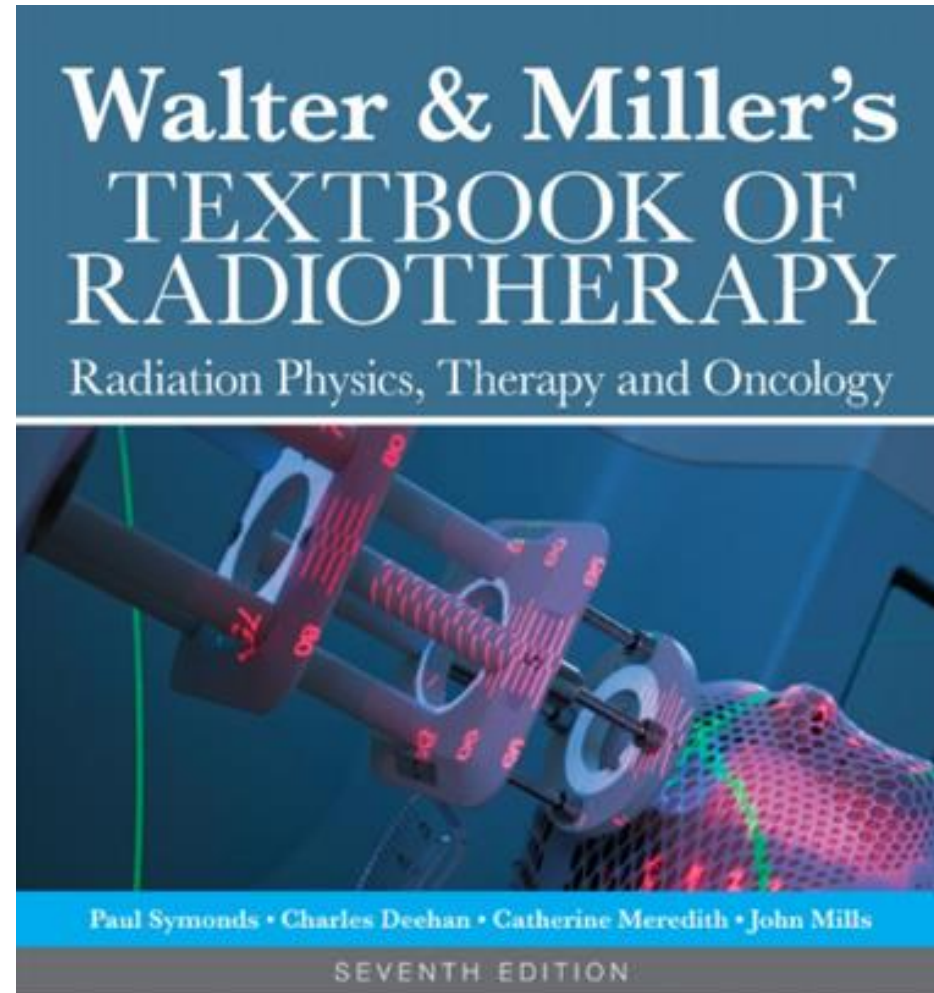
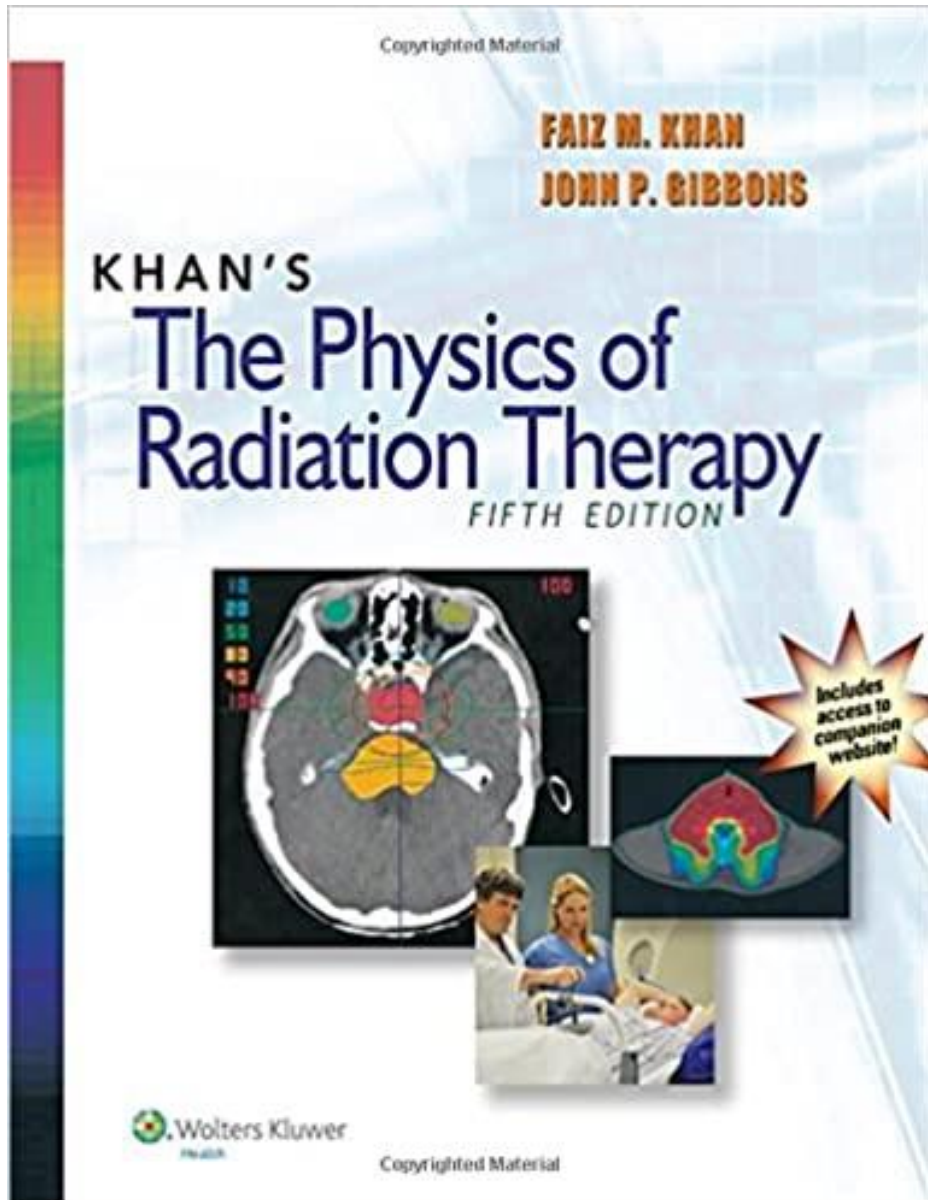
UNIDADES DE TERAPIA – ACELERADOR LINEAR

Características dosimétricas do feixe

- Obtidas durante o comissionamento da unidade de terapia
- Dosimetria clínica de referência – taxa de dose em condições de referência
- Permite o cálculo das doses depositadas em determinada configuração de irradiação



	Depth (cm)	Field size (cm ²)	5 x 5	10 x 10	20 x 20
			Penumbra (mm)		
6 MeV	1.0	Dynamic	9	9.4	9.3
	1.1	water	9.7	10.2	10
	1.4	Dynamic	11.5	11.9	11.65
	1.6	water	12.5	13.1	12.85
12 MeV	1.0	Dynamic	5.45	5.7	5.5
	1.1	water	5.6	5.95	5.65
	2.9	Dynamic	13.15	13.5	13.3
	3.3	water	15.4	16.35	15.7
20 MeV	1.0	Dynamic	4.8	4.75	4.7
	1.1	water	4.85	4.9	4.8
	2.9	Dynamic	8.35	8.45	8.35
	3.3	water	9.8	9.8	9.75



Also comes with:
• Image gallery