

RADIOTERAPIA NA LINHA DO TEMPO¹

RADIOTHERAPY ON THE TIMELINE

**Renata Hassler Lopes², Rogério Turchetti³, Leila Maria Araújo Santos⁴,
Walter Priesnitz Filho⁵ e Angela Isabel dos Santos Dullius⁶**

RESUMO

Este estudo demonstra a evolução do panorama evolutivo da radioterapia, comparando as tecnologias e avanços tecnológicos nos últimos anos, destacando principalmente software de sistemas de planejamento, colimadores multi lâminas e aceleradores lineares. A radioterapia moderna exige práticas multidisciplinares, culminando com a necessidade de profissionais capacitados para trabalharem com essa modalidade de tratamento. Para a equipe de técnicos e tecnólogos que atuam na área, os novos desafios estão no uso seguro e adequado de imagens, sistema de entrega de tratamento, e comunicação. Este trabalho apresenta uma trajetória e perspectivas em equipamentos, trazendo a realidade e os desafios dos serviços públicos brasileiros. Além do resgate histórico dos equipamentos de radioterapia, o presente documento também oferece ao leitor uma síntese de conteúdo sobre as tecnologias radioterápicas adotadas ao longo do tempo. É o tempo e o movimento, o desafio mais estimulante que se coloca frente à tecnologia.

Palavras-chave: educação em saúde; Radioterapia; Tecnologia Radiológica.

ABSTRACT

This study demonstrates the evolution of radiotherapy's evolutionary panorama, from its origins to the present day, comparing technologies and technological advances in recent years, highlighting mainly planning systems software, methylamine collimators and linear accelerators. However, modern radiotherapy requires multidisciplinary practices, culminating in the need for trained professionals to work with this treatment modality. For the team of technicians and technologists who work in the area, the new challenges are in the safe and adequate use of images and the treatment and communication delivery system. During the work, a trajectory and perspective on equipment will be presented, bringing the reality and challenges of Brazilian public services as a parameter that is gradually innovated with the innovation of a process that aims to reach the fourth dimension technology in radiotherapy treatment, it is the time and movement, the most stimulating

1 Trabalho de Revisão Bibliográfica.

2 Mestranda no Programa de Pós Graduação em Educação Profissional e Tecnológica da Universidade Federal de Santa Maria. E-mail: renata.lopes@ufsm.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5072-1223>.

3 Doutor em Informática pela Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós Graduação em Educação Profissional e Tecnológica da Universidade Federal de Santa Maria. E-mail: turchetti@redes.ufsm.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5242-5057>

4 Doutora em Informática na Educação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós Graduação em Educação Profissional e Tecnológica da Universidade Federal de Santa Maria. E-mail: leilamas@ctism.ufsm.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1513-3717>.

5 Doutor em Segurança de Informação pela Universidade de Lisboa. Programa de Pós Graduação em Educação Profissional e Tecnológica da Universidade Federal de Santa Maria. E-mail: walter@redes.ufsm.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8999-4843>.

6 Doutora em Odontologia pela Universidade Luterana do Brasil. Programa de Pós Graduação em Educação Profissional e Tecnológica da Universidade Federal de Santa Maria. E-mail: angeladullius@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6590-1112>

challenge facing@technology. In addition to the historical review of radiotherapy equipment, this document also offers the reader a summary of content on radiotherapy technologies adopted over time.

Keywords: *health education; Radiotherapy; Technology Radiologic.*

INTRODUÇÃO

A radioterapia representa uma modalidade terapêutica fundamentada no uso de radiação ionizante, que pode ser gerada por aparelhos específicos ou provenientes da emissão de radioisótopos, sejam eles de origem natural ou artificial. Suas origens podem ser traçadas aos estudos pioneiros de Schiff e Freund, que, logo após a descoberta dos raios-X por Roentgen, realizaram os primeiros procedimentos terapêuticos utilizando essa forma de radiação (SALVAJOLI; SOUHAMI; FARIA, 2023).

Entre 60% dos casos de câncer a radioterapia é empregada como tratamento em alguma fase da doença visando interromper o crescimento desregulado de células neoplásicas (SCHAUE; MCBRIDE, 2015; INCA, 2023; SALVAJOLI; SOUHAMI; FARIA, 2023). A literatura nos mostra a evolução dessa forma de tratamento face aos progressos tecnológicos que vêm ocorrendo ao longo dos anos, juntamente com as investigações oncológicas com ênfase na identificação de agentes cancerígenos, na prevenção, desenvolvimento e avaliação de novos tratamentos.

A evolução tecnológica tornou a radioterapia mais precisa, segura e adequada ao meio ambiente. No passado, o principal equipamento utilizado no Brasil contava apenas com aparelhos de Césio e Cobalto, que dirigiam ao corpo do paciente a radiação produzida continuamente, e que precisava ser descartado após sua vida útil. Atualmente, os aceleradores lineares representam a mais importante e versátil máquina de entrega de radiação em diferentes técnicas de tratamento, não emitindo radiação quando desligado, nem produzindo rejeito radioativo. Além disso, os requisitos necessários para a segurança e a proteção radiológica nos serviços de radioterapia são regulamentados por lei, conforme estabelecido na Norma da CNEN NN 6.10 (2021).

Acessórios como blocos de proteção, bloqueadores de meio campo, cunhas metálicas e bandejas de colimação precisavam ser confeccionados e inseridos manualmente, o que demandava maior tempo e esforço físico devido ao peso elevado desses componentes. Nos equipamentos atuais, os acessórios estão acoplados às máquinas, possuem colimadores *Multi-leaf* agregados para realizar a proteção, agilizando o processo e tornando mais precisa a entrega de dose. Além de possuírem modernos sistemas de segurança que realizam um *check list* antes de liberar o feixe para o tratamento.

Dada a importância de os técnicos e tecnólogos em radioterapia compreenderem o contexto histórico e evolutivo da área para aprimorar a aplicação das técnicas modernas, este estudo propõe apresentar uma análise detalhada dos equipamentos utilizados e suas perspectivas futuras. O objetivo é destacar a realidade atual e os novos desafios enfrentados pelos profissionais e serviços de radioterapia. Além de traçar um panorama histórico, a pesquisa oferece uma síntese das tecnologias radiote-

rápicas adotadas ao longo do tempo, visando informar e preparar os profissionais para as demandas emergentes no campo.

METODOLOGIA

Este estudo realiza uma revisão bibliográfica com o objetivo de traçar uma retrospectiva do panorama evolutivo da radioterapia no Brasil. A pesquisa baseia-se em um levantamento de dados já existentes sobre tecnologias em radioterapia, extraídos de bases de dados especializadas e fontes documentais relevantes. A identificação inicial inclui bancos de dados de sistemas de informação e fontes de organizações profissionais, que continham informações essenciais para a construção da pesquisa. Conforme defendido por Gil (2008), a coleta de dados em estudos também é considerada pesquisa bibliográfica.

Após a identificação das fontes, os estudos foram submetidos a um processo de triagem e análise, com a exclusão dos materiais que não atendiam aos objetivos da pesquisa. Em seguida, foram realizadas revisões de literatura focadas nas tecnologias em radioterapia, com a identificação de documentos provenientes de organizações como a Associação Portuguesa de Radioterapia (ART-RADIOTERAPIA), o Instituto Nacional do Câncer (INCA), a Sociedade Americana de Radioterapia (ASTRO) e a Sociedade Brasileira de Radioterapia (SBRT). Além disso, foram consultados livros e artigos com relevância científica sobre o tema.

Os documentos selecionados foram analisados comparativamente, permitindo uma análise descritiva dos fatos e dos desafios enfrentados pela radioterapia moderna. Os conteúdos considerados mais relevantes foram transcritos e destacados. Adicionalmente, o estudo inclui uma exposição do panorama de equipamentos de radioterapia, evidenciando a desigualdade na distribuição desses recursos no Sistema Único de Saúde (SUS) no Brasil, conforme apontado pelo Censo de Radioterapia do Ministério da Saúde e pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

RESULTADO E DISCUSSÕES

A evolução da radioterapia ao longo do século XX ficou marcada por três grandes descobertas da ciência: a descoberta dos raios X, da radioatividade natural e da produção de elementos radioativos artificiais, juntamente com o conhecimento aprofundado da estrutura atômica e nuclear de Niels Bohr e Ernest Rutherford. Em novembro de 1895, Wilhelm Roentgen, professor de Física de uma universidade alemã, anunciou suas experiências sobre radiações, contribuindo mais tarde para as aplicações diagnósticas. Existe, de certa forma, uma relação de coincidências entre o uso puramente físico de penetração das radiações nos corpos e a sua aplicação terapêutica (SCAFF, 1979).

Em fevereiro de 1896, o físico francês Antoine Henri Becquerel, quase simultaneamente e possivelmente inspirado pela descoberta dos raios X, observou uma imagem em uma tela exposta

a uma amostra de sal duplo de urânio e potássio. Posteriormente, em 1897, Marie Curie denominou esse fenômeno de “radioatividade natural”. A descoberta de Becquerel foi submetida a estudos exaustivos, e, no final de 1898, Marie e Pierre Curie conseguiram isolar o polônio, um elemento com radioatividade cerca de 400 vezes maior que a do urânio. Ainda em 1898, o casal anunciou a descoberta do rádio, o primeiro elemento químico radioativo utilizado com fins terapêuticos. Em 1934, Irène Curie (filha de Marie Curie) e Frédéric Joliot-Curie produziram pela primeira vez um elemento radioativo em laboratório, transformando um elemento natural em radioativo, o rádio fósforo. Tanto Becquerel quanto o casal Curie sofreram queimaduras ao manipular o rádio, semelhantes às provocadas pela exposição aos raios X. Essa tríade de exposição, dano biológico e cicatrização motivou a investigação do uso terapêutico das radiações (SALVAJOLI; SOUHAMI; FARIA, 2013; SBRT, 2018).

Nas primeiras décadas, a inexistência de um conceito de dose de radiação, o crescimento de equipamentos não padronizados e a falta de uma fundamentação da ação da radiação nos tecidos aumentavam as consequências negativas da aplicação da radiação causando queimaduras, dermatites e levantavam dúvidas sobre a utilização e recursos terapêuticos. A radioterapia arcaica sem planejamento e técnicas com campos diretos levavam a dose-eritema (NETO; REIS, 2019).

A utilização da radiação representa uma das primeiras abordagens terapêuticas no combate ao câncer, sendo o primeiro tratamento bem-sucedido realizado em 1898. Contudo, nesta época, as doses em cada sessão eram consideravelmente altas, sendo administradas de uma única vez, o que originou várias complicações (ART-RADIOTERAPIA, 2014). A partir de 1904, a combinação de raios-X e rádio começou a ser aplicada no tratamento de diversas patologias. Os estudos efetuados neste âmbito entre 1920 e 1940 visavam avaliar os efeitos da radiação nos tecidos e contribuíram para que a dose total do tratamento passasse a ser dividida em várias frações.

Por volta de 1928, teve início a teleterapia de alta energia com o uso de equipamentos de tele-radium. Até 1950, usavam-se raios X de baixa energia e rádio. Somente em 1951, os primeiros equipamentos de cobalto começaram a operar, inicialmente na Inglaterra e no Canadá. Na década de 1950, foram introduzidos os aceleradores lineares, que permitiram o tratamento de tecidos mais profundos, com menor dispersão de radiação para os tecidos saudáveis. Os aceleradores são máquinas capazes de produzir radiações particuladas e ondulatórias eletronicamente, com altas taxas de dose. Ao contrário dos isótopos radioativos, os aceleradores lineares emitem radiação apenas durante o momento da exposição, reduzindo, assim, os riscos radiológicos tanto para os profissionais quanto para os pacientes (NETO; REIS, 2019).

Ao longo dos últimos cem anos, a radioterapia vem se desenvolvendo através da utilização da tecnologia, da melhoria dos equipamentos de tratamento e dos avanços significativos da Radiobiologia. Atualmente os aceleradores representam a mais importante e versátil fonte de radiação ionizante em radioterapia, são equipamentos capazes de produzir feixes de raios X ou elétrons, produzem

energias da ordem de mega elétron-volt e são utilizados para fins terapêuticos em diversas tecnologias da radioterapia clínica moderna (FURNARI, 2012; ART-RADIOTERAPIA, 2014).

Segundo o relatório Técnico da Sociedade Brasileira de Radioterapia (SBRT, 2022), no Brasil o panorama evolutivo segue a cronologia conforme Quadro 1 (SALVAJOLI; SOUHAMI; FARIA, 2013; SBRT, 2018):

Quadro 1 - Panorama evolutivo da Radioterapia no Brasil.

Ano	Evolução	Local
1918	1º Aparelho de <i>Röntgenterapia</i> Profunda	Consultório do Dr. Arnaldo Campelo, Rio de Janeiro/RJ
1922	1º Centro de Tratamento do Câncer do Brasil	Fundação do Instituto de <i>Radium</i> , Minas Gerais/MG
1938	Inauguração do Instituto Nacional de Câncer	Rio de Janeiro/RJ
Anos 40	Criação dos Serviços de Braquiterapia e <i>Radiumterapia</i> na Santa Casa de Misericórdia	Belo Horizonte/MG
1954	1ª Unidade de Telecobaltoterapia no Brasil e na América Latina	Hospital São Sebastião, Rio de Janeiro/RJ
1971	1º Acelerador Linear instalado no Brasil (4Mv)	Hospital Alemão Oswaldo Cruz, São Paulo/SP
1973	1º Acelerador Linear com fótons e elétrons	Hospital Sírio Libanês, São Paulo/SP.
1983	1ª Radiocirurgia com Planejamento Manual	Hospital Alemão Oswaldo Cruz, São Paulo/SP
1990	1ª Braquiterapia com alta taxa de dose (HDR)	Hospital das Clínicas da USP, São Paulo/SP
1992	1º Acelerador Linear com controle computadorizado	Hospital Israelita Albert Einstein, São Paulo/SP
1993	1ª Radiocirurgia com Tomografia Computadorizada	Hospital Israelita Albert Einstein, São Paulo/SP
1993	1ª Radioterapia 3D conformada	Hospital Israelita Albert Einstein, São Paulo/SP
1995	1º Acelerador Linear com MLC instalado no Hospital Israelita Albert Einstein	Hospital Israelita Albert Einstein, São Paulo/SP
1995	1ª Radiocirurgia <i>Gamma Knife</i> com múltiplas fontes de Cobalto	Hospital Santa Paula, São Paulo/SP
1995	1º Sistema de Portal Digital	Hospital Israelita Albert Einstein, São Paulo/SP
1998	1º Tomógrafo dedicado para planejamento de Radioterapia	Instituto Nacional do Câncer, Rio de Janeiro/RJ
1998	1ª Radioterapia 3D Conformada com sistema dedicado e MLC em hospital público	Instituto Nacional do Câncer, Rio de Janeiro/RJ
1998	1º Sistema de portal digital em uma instituição pública no Brasil	Instituto Nacional do Câncer, Rio de Janeiro/RJ
1998	1º Colimador de múltiplas micro lâminas (acessório computadorizado para AL realizar Radiocirurgia sem cone)	Hospital Araújo Jorge, Goiânia/GO
2000	1º Tratamento de Radioterapia de Intensidade Modulada (IMRT)	Hospital Sírio Libanês, São Paulo/SP
2001	1º Tratamento de Radioterapia de Intensidade Modulada (IMRT) com técnica de <i>sliding window</i>	Hospital Israelita Albert Einstein, São Paulo/SP
2003	1º Planejamento de Radioterapia com fusão PET-CT	Hospital Sírio Libanês, São Paulo/SP
2003	1ª Radioterapia intraoperatória de mama com elétrons em AL	Hospital Israelita Albert Einstein, São Paulo/SP
2005	1º Tratamento de Radioterapia de intensidade modulada (IMRT) em uma instituição pública	Instituto Nacional do Câncer, Rio de Janeiro/RJ
2006	1º Tratamento de IGRT baseado em sistema de imagem de portal digital	Hospital Israelita Albert Einstein, São Paulo/SP
2006	1º SBRT com sistema integrado de radiografias digitais <i>Exact Tract</i>	Hospital Israelita Albert Einstein, São Paulo/SP
2007	1º Tratamento de IGRT baseado em <i>Cone-Beam CT</i> (CBCT) em um paciente com neoplasia de próstata	Hospital Sírio Libanês, São Paulo/SP
2008	1º Planejamento de Radioterapia baseado em Tomografia 4D	Hospital Israelita Albert Einstein, São Paulo/SP
2010	1º Tratamento de Radioterapia com arco volumétrico (VMAT)	Hospital Israelita Albert Einstein, São Paulo/SP
2010	1º Tratamento de IGRT utilizando <i>gating</i> respiratório	Hospital Israelita Albert Einstein, São Paulo/SP
2013	1º Sistema de planejamento de Radioterapia com auto segmentação de volumes	Hospital Português da Bahia, Salvador/BA

2015	1º Tratamento de Radioterapia estereotáxica extracraniana (SBRT), com tecnologia <i>Flattening Filter Free</i> (FFF)	Hospital Israelita Albert Einstein, São Paulo/SP
2015	1ª Radioterapia intraoperatória de mama baseada em sistema dedicado de ortovoltagem (<i>Intrabeam</i>)	Hospital São Rafael da Bahia, Salvador/BA
2016	1º Tratamento nacional com RT guiada por imagens (IGRT) usando <i>transponders</i>	Hospital Moinhos de Vento, Porto Alegre/RS
2017	1º Sistema de IGRT por monitoramento por superfície	Hospital Sírio Libanês, São Paulo/SP
2018	1º Equipamento dedicado a RT em arco volumétrico de alta velocidade, com IGRT incorporado (<i>Varian - Halcyon</i>)	Hospital Alemão Oswaldo Cruz, São Paulo/SP
2019	1º Equipamento de Radioterapia helicoidal com IGRT integrado (<i>TomoTherapy - Accuray</i>)	Hospital Vila Nova Star, São Paulo/SP
2019	1º Equipamento de Radioterapia com tecnologia robótica (<i>Cyberknife</i>)	Hospital Vila Nova Star, São Paulo/SP
2020	1º Tratamento de <i>Total Marrow Irradiation</i> (TMI) com terapia helicoidal	Hospital Vila Nova Star, São Paulo/SP

Fonte: construção do próprio autor

No Brasil, a radioterapia foi introduzida em 1901 no Rio Grande do Sul pelo Dr. Becker Pinto, que utilizou pela primeira vez um aparelho de raios X para o tratamento de um tumor de pele. A partir desse marco, a radioterapia evoluiu, subdividindo-se em terapias de contato, realizadas por meio da exposição a materiais radioativos, como césio e cobalto, que deram origem à braquiterapia, uma técnica amplamente utilizada nos dias atuais (CUPERSCHMID; MARTINS, 2014; SALVAJOLI; SOUHAMI; FARIA, 2013).

Em 1919, foi criado no Brasil o Departamento Nacional de Saúde Pública (DNSP), o primeiro serviço público destinado exclusivamente ao atendimento de pacientes com diagnóstico de câncer. O DNSP teve como objetivo coordenar as ações de saúde pública, o que possibilitou a criação da Fundação Gaffrée Guinle. Em 1922, foi fundado o Instituto Borges da Costa, anteriormente conhecido como Instituto do Radium, em Belo Horizonte, sendo o primeiro hospital dedicado integralmente ao combate ao câncer. Em 1926, o instituto recebeu a ilustre visita de Marie Curie, que trouxe consigo tubos de rádio para a prática da braquiterapia (SALVAJOLI; SOUHAMI; FARIA, 2013).

O panorama histórico da radioterapia no Brasil destaca marcos importantes, como a inauguração do Instituto Nacional do Câncer (INCA) em 1938. O INCA, localizado nas dependências do Hospital Estácio de Sá, iniciou suas atividades com 40 leitos, um bloco cirúrgico, um equipamento de radiodiagnóstico e um de radioterapia. Ao longo do tempo, o INCA se tornou um centro de referência para tratamentos de alta complexidade, tanto no setor público quanto no privado, devido à contínua capacitação de técnicos, físicos e médicos, além de ser alvo de investimentos governamentais constantes (GUIZZARDI; DA SILVA GUIMARÃES, 2000). Apesar dos avanços tecnológicos e da inovação nos equipamentos de radioterapia, o número de casos de câncer que requerem tratamento ainda excede a capacidade das máquinas e serviços disponíveis para atender adequadamente a população.

Em radioterapia, uma preocupação constante é a minimização das complicações nos tecidos saudáveis. Os avanços tecnológicos, combinados com inovações no campo da radiobiologia e no entendimento

da tolerância tecidual, têm possibilitado o fracionamento da dose no volume tumoral, aumentando as chances de cura. A radioterapia moderna emprega diversos tipos de fracionamento, sendo a definição da dose influenciada pela proximidade do volume-alvo em relação ao tecido normal e pela radiosensibilidade deste. A tolerância à radiação, que varia entre diferentes estruturas normais e dependendo do volume do órgão irradiado, é um fator de relevância a ser considerado (SALVAJOLI; SOUHAMI; FARIA, 2023).

Para prevenir movimentos involuntários e assegurar que a dose seja administrada com precisão, alguns pacientes necessitam de acessórios de posicionamento que garantam a reprodutibilidade e a imobilização adequada durante o procedimento de radioterapia. Esses acessórios podem incluir apoio de cabeça, máscara termoplástica, extensor de ombros, suporte de pés e joelhos, rampa de mama, suporte para o tórax, colchão à vácuo ou de poliuretano, entre outros (INCA, 2023). Para que o feixe de radiação se ajuste geometricamente à forma da lesão, é necessário adicionar colimação extra e blocos de proteção. Antes da década de 1990, os primeiros blocos eram confeccionados em moldes individuais, ajustados ao formato específico requerido para os campos de tratamento. Estes blocos, feitos de chumbo ou Cerrobend (liga metálica), eram fixados a bandejas acrílicas e utilizados para colimar campos de formas quadradas ou retangulares. No entanto, considerando que os tumores geralmente não possuem formas regulares, a conformação do feixe de radiação necessitava de abordagens mais sofisticadas (SALVAJOLI; SOUHAMI; FARIA, 2023).

Na terapia conformada, as proteções foram substituídas por um colimador com múltiplas lâminas finas com a finalidade de moldar o campo de tratamento. Os aceleradores possuem MLC (*Multi-leaf Collimator*) disponível para feixes de fótons, constituído geralmente por 20 a 60 pares opostos e adjacentes de lâminas finas de liga de tungstênio. Em técnicas avançadas de radioterapia, como a Intensidade Modulada (IMRT) e a Arcoterapia Volumétrica Modulável (VMAT), é utilizado um tipo mais robusto de máscara, composta por uma quantidade significativa de material termoplástico, que cobre toda a cabeça, pescoço e ombros do paciente. Isso resulta em um aumento no custo do acessório e, conseqüentemente, do tratamento (SALVAJOLI; SOUHAMI; FARIA, 2013).

Os filtros físicos, assim como os bloqueadores de meio campo, cunhas metálicas e bandejas de colimação, mais comumente usados nos aparelhos de cobalto e nos primeiros aceleradores, são acessórios pesados, também eram inseridos manualmente e exigiam maior tempo em seu manejo. Atualmente os equipamentos modernos possuem os filtros em cunha já inseridos em seu sistema para melhor distribuição de dose e menos pontos quentes no tratamento (SALVAJOLI; SOUHAMI; FARIA, 2013).

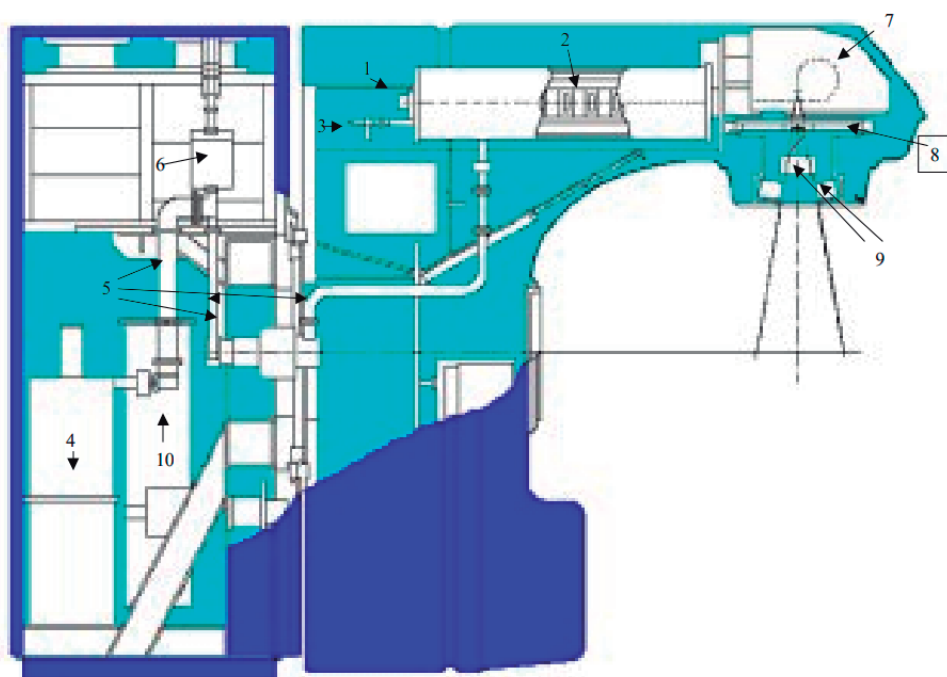
As salas e os equipamentos de teleterapia possuem sistemas de segurança que diminuem o risco de acidentes, são distribuídos botões de emergência para serem acionados se necessário em áreas estratégicas, interrompendo o feixe de radiação e o fornecimento de energia elétrica. O acelerador reconhece as chaves acionadas, os filtros em cunha selecionados, a presença ou não de bandeja, de blocos de colimação ou qualquer outro acessório que se coloque no aparelho, caso contrário não libera para o tratamento. Além dos acessórios, o feixe de radiação só é liberado depois que a porta da sala

de tratamento é fechada, caso seja aberta o feixe é interrompido imediatamente. Todas as instalações possuem dispositivos que permitem ao paciente se comunicar e ter monitorização ininterrupta por parte da equipe (INCA, 2000; SALVAJOLI; SOUHAMI; FARIA, 2013).

Todos os aceleradores lineares funcionam de forma similar, um filamento aquecido dentro de um canhão libera elétrons que são acelerados por micro-ondas até atingirem a energia desejada e incidirem no alvo, formado por uma placa metálica, para que sejam gerados os fótons de raios-X. Os aceleradores de baixa energia possuem o tubo acelerador alinhado ao alvo e os de alta energia necessitam de um “*bending*” magnético, sistema capaz de direcionar o feixe de elétrons para o alvo. Se o alvo for retirado, o paciente recebe a radiação com o feixe de elétrons diretamente sobre ele (INCA, 2001).

A **Figura 1** ilustra o esquema de funcionamento de um Acelerador Linear (INCA, 2001), onde (1) Canhão de elétrons: responsável pela geração dos elétrons que são acelerados. (2) Tubo acelerador: acelera os elétrons até a velocidade (energia) desejada. (3) Bomba iônica de vácuo: mantém o vácuo em toda a estrutura aceleradora. (4) Circuito de rádio frequência: neste exemplo é demonstrada uma klystron, porém dependendo da energia desejada poderíamos usar uma magnetron. (5) Guia de onda: transporta a radiofrequência até o tubo acelerador. (6) Circulador e carga de água: responsáveis pela absorção da onda de radiofrequência que não é absorvida pelo tubo acelerador. (7) Desviação: direciona o feixe de elétrons através de 270° de curvatura para a área do colimador. (8) Carrossel: responsável pela colocação do correto filtro equalizador para fótons ou espalhador para elétrons. (9) Colimadores: definem o campo a ser tratado. (10) Circuito de água: responsável pela refrigeração das diversas áreas do equipamento.

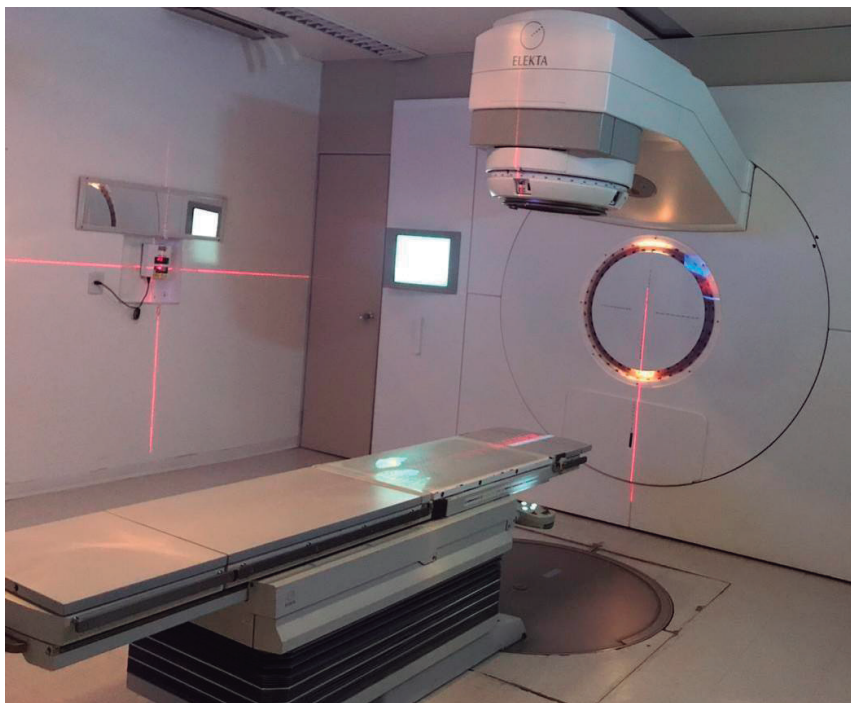
Figura 1 - Esquema de funcionamento de um Acelerador Linear.



Fonte: Adaptado Ministério da Saúde/INCA (2001).

A Figura 2 demonstra a escala de laser de um acelerador linear convergindo para o isocentro de tratamento da sala:

Figura 2 - Escala de laser convergindo para o isocentro de tratamento da sala.



Fonte: do próprio autor (2024).

- Distância foco eixo (SAD - *Source Axis Distance*): é a distância entre a fonte de raios-X e o isocentro do equipamento, a intersecção do eixo central com o eixo horizontal do feixe em um mesmo centro (SCAFF, 1979; SALVAJOLI; SOUHAMI; FARIA, 2013).
- Distância foco pele (SSD - *Source-Skin Distance*): é a distância entre a fonte e a pele do paciente, verificada com o auxílio do telêmetro, escala luminosa presente no equipamento. Os aparelhos de cobalto e alguns aceleradores trabalham com SSD de 80 cm, mas na maioria dos equipamentos atuais o SSD é de 100 cm (INCA, 2023).

A terapia com elétrons disponível em vários aceleradores oferece a distribuição de dose razoavelmente uniforme da superfície e em algumas situações o feixe de irradiação de elétrons pode ser usado em conjunto com fótons permitindo maior homogeneidade de dose e sua redução na superfície (SCAFF, 1997). A notável revolução da radioterapia teve início em 1972, com a invenção da tomografia computadorizada por Godfrey Hounsfield, que viabilizou o planejamento em três dimensões. Hoje, com a utilização da tomografia, com ou sem fusão de imagens de ressonância magnética e, também, pelo indispensável auxílio da informática, através dos modernos sistemas de planejamento, há possibilidade de identificar de forma mais precisa o volume a ser tratado e as estruturas adjacentes a serem protegidas. Antes desse avanço, os planejamentos eram realizados com base em imagens de raios X e os cálculos eram manuais (MICHELON; COLENCI; DE PAULA, 2012).

Os sistemas de planejamento hoje permitem que o médico desenhe as áreas a serem irradiadas e a serem protegidas usando as imagens de tomografia através de um *software* específico. Após delinear o alvo a ser tratado e calcular a dose a ser administrada ao tumor, o médico junto com o físico, estuda a melhor forma de irradiar, modulando o percentual da intensidade de cada um dos feixes, de modo que o tumor receba a dose prescrita e que os tecidos vizinhos saudáveis recebam o mínimo possível de radiação dentro da sua tolerância (SALVAJOLI; SOUHAMI; FARIA, 2023). Com os avanços tecnológicos incorporados à radioterapia moderna, especialmente nos sistemas de planejamento, surgem novos desafios para os profissionais técnicos no contexto da prática clínica cotidiana (ASTRO, 2019).

Na preparação do plano de tratamento, a dose terapêutica é definida com base nas características específicas do paciente e na validação da dosimetria. Nesta fase efetua-se o controle do posicionamento do paciente através da simulação de uma sessão de tratamento. Após a validação da simulação pelo radioterapeuta, o computador de controle do equipamento autoriza o início do tratamento conforme o plano estabelecido. O técnico em radioterapia, então, administra o tratamento utilizando um computador adicional que ajusta a intensidade de cada feixe de radiação. Cada sessão de radioterapia tem uma duração aproximada de 15 minutos: cerca de 10 minutos são dedicados à introdução do paciente na sala de irradiação e ao posicionamento na mesa de tratamento, e os 5 minutos restantes são destinados ao tratamento em si. As doses são administradas em sessões diárias, em pequenas frações da dose total prescrita, com um intervalo mínimo de cerca de 12 horas entre as aplicações para permitir a recuperação dos tecidos saudáveis (NASCIMENTO; FALZON; MOLLO, 2009).

A realização de cada uma das etapas que envolvem o tratamento tem sua importância, pois, não se pode prosseguir sem que ocorra a validação e avaliação de cada uma delas. Deste modo, o tratamento radioterápico é uma atividade sequencial, com fases de elaboração, avaliação, propostas de tratamento e validação sustentado em etapas resultantes da participação de diferentes profissionais envolvidos neste processo (NASCIMENTO; FALZON; MOLLO, 2009; ART RADIOTERAPIA, 2014).

Segundo, Salvajoli, Souhami e Faria (2013) atualmente existem técnicas diferenciadas de radioterapia à disposição. A Radioterapia Guiada por Imagem (IGRT) é conceituada como o aprimoramento da precisão por meio da frequente utilização de imagens do alvo tumoral e dos tecidos saudáveis circundantes, adquiridas antes do tratamento. Esse enfoque visa alcançar maior precisão na administração da dose no volume alvo, permitindo, que se utilizem doses maiores com o consequente aumento dos índices de cura. A técnica pode ser empregada em conjunto com a Radioterapia Conformacional Tridimensional (3D-CRT) ou com a Radioterapia de Intensidade Modulada (IMRT). Essa abordagem implica na obtenção de imagens em tempo real na própria máquina de tratamento antes da aplicação de radioterapia. Tal procedimento assegura, com o máximo grau de acurácia possível, que o tumor permaneça dentro do campo de radiação diariamente, uma vez que sua posição pode variar devido a movimentos respiratórios, alterações na plenitude de certos órgãos ou mesmo pequenas variações posicionais de um dia para outro (SALVAJOLI; SOUHAMI; FARIA, 2023).

Outra forma de realizar um tratamento com IMRT, com ou sem IGRT, é a Arcoterapia Volumétrica Modulada (VMAT). Neste método a dose de radiação é administrada em campos no formato de arco, com maior eficácia na conformação da dose em torno do volume alvo, poupando significativamente os órgãos normais adjacentes em um tratamento extremamente rápido. Reduzir o tempo de tratamento significa proporcionar mais conforto ao paciente, além de diminuir a possibilidade de movimentação durante o tratamento (MORIKAWA, FERREIRA, 2018).

A Radiocirurgia Estereotáxica (SRS) é uma técnica inicialmente criada para lesões intracranianas, que envolve a administração de uma dose elevada de radiação ionizante, frequentemente em uma única sessão. Em certos cenários, é possível reduzir os efeitos colaterais do tratamento ao distribuir a dose em mais sessões, cada uma com uma quantidade menor de radiação, caracterizando a Radioterapia Estereotáxica Corporal Fracionada (SBRT). A SBRT foi desenvolvida a partir da radiocirurgia e viabiliza a aplicação de feixes de radiação extremamente precisos direcionados às células de alguns tipos de tumores extracranianos, utilizando doses mais altas e menor número de frações do que o usual.

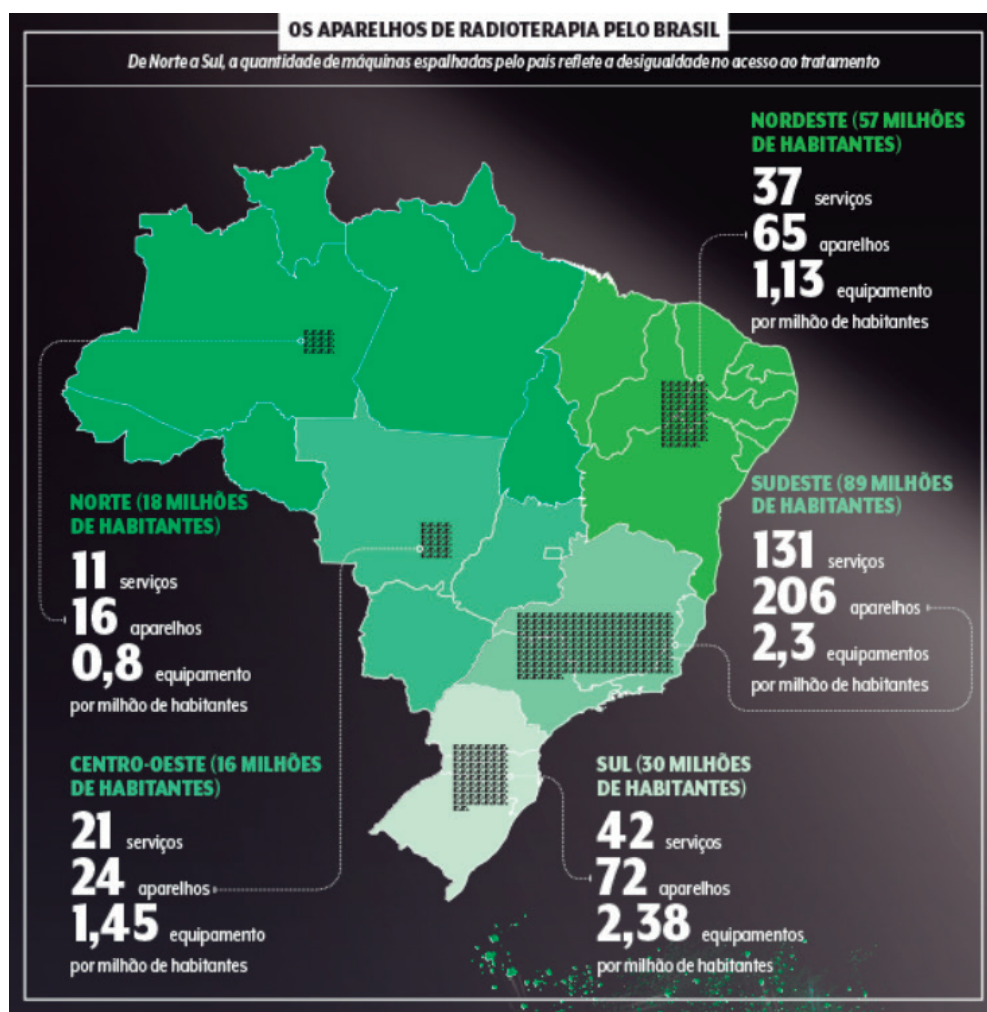
Com frequência, as técnicas de tratamento são identificadas pelos nomes atribuídos pelos fabricantes dos aceleradores lineares, tais como *CyberKnife*, *Gamma Knife*, *Novalis*, *Synergy*, *TomoTherapy*, *Trilogy*, *Truebeam*, *Halcyon*, *Versa HD* ou *View Ray*. É importante salientar que esses nomes comerciais não devem ser confundidos com os tipos de radiação estereotáxica utilizada.

DISTRIBUIÇÃO DE EQUIPAMENTOS NO BRASIL

A elaboração do Censo de Radioterapia mais recente publicado pelo Ministério da Saúde foi em 2019, traz informações coletadas em diferentes bases, como o Cadastro Nacional de Estabelecimento de Saúde (CNES) e Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), incluindo membros Instituto Nacional do Câncer (INCA). Essa iniciativa consistiu na realização de análises que abrangem a realidade da radioterapia no território nacional, além de informações sobre a vida útil dos equipamentos em funcionamento, identificando modelos obsoletos a serem substituídos. Foram identificados 249 serviços de radioterapia e 412 equipamentos de teleterapia, apenas 50% dos equipamentos necessários para tratamento estão disponíveis, a maioria com mais de 10 anos de funcionamento e distribuídos desigualmente pelo país.

A Figura 3 ilustra a distribuição dos aparelhos de radioterapia em todo o Brasil, evidenciando a desigualdade no acesso ao tratamento.

Figura 3 - Mapa da distribuição de equipamentos de radioterapia no Brasil.



Fonte: Adaptado de Revista Veja - Saúde (2021).

(Ilustração: Erika Onodera/SAÚDE é Vital)

Conforme pode-se observar na Figura 3, a disponibilidade de equipamentos pelo Sistema Único de Saúde (SUS) e a desigualdade de acesso aos tratamentos varia muito nas regiões do país. Segundo o último Censo de Radioterapia do Ministério da Saúde (2019) e as recentes estimativas populacionais do IBGE no Brasil, o índice é menor do que dois equipamentos por milhão de brasileiros.

Considerando a definição da norma de um estabelecimento de saúde por cada 500 mil habitantes, conforme preceituado na Portaria MS/SAS nº 140, de 27 de fevereiro de 2014, seriam necessários 446 equipamentos de radioterapia em funcionamento para suprir a demanda da população brasileira estimada para 2030. Enquanto nas regiões Sul e Sudeste, o índice fica em torno de 2,3 aparelhos para cada milhão de habitantes, no Norte, esse número não chega a 1. As orientações no âmbito da saúde devem promover a acessibilidade equitativa aos serviços de saúde, assegurando que todos os cidadãos, independentemente de suas condições ou localização geográfica, tenham acesso igualitário. Além disso, é indispensável que ocorra uma distribuição justa de recursos e uma utilização equitativa dos serviços de saúde.

Atualmente, estão em andamento iniciativas para a ampliação e criação de serviços de radioterapia, com o objetivo de melhorar a situação no futuro próximo. Entre esses esforços estão o Projeto de Expansão da Assistência Oncológica (Projeto Expande), iniciado na década de 2000, e o Plano de Expansão da Radioterapia do Ministério da Saúde, lançado em 2012. Embora ambos os programas tenham sido implementados pelo governo federal e visam apoiar a instalação de novos equipamentos, os resultados obtidos até o momento foram insatisfatórios. O Plano de Expansão, que envolveu um investimento significativo, levou mais de seis anos para colocar em operação apenas 10% das máquinas planejadas, e um número considerável de equipamentos instalados tornou-se obsoleto durante esse período (DE ARAÚJO; DE SÁ; ATTY, 2016; SBRT, 2023).

Em 2019, havia 409 equipamentos de radioterapia no Brasil, até o início de 2030, mais de 50% deles ficarão obsoletos e deverão ser substituídos. Segundo a SBRT e de acordo com o projeto RT 2030 que almeja tornar o tratamento radioterápico mais acessível a todos, será necessário aumentar em 29,6% o número de equipamentos, cerca de 530 máquinas, para dar conta da demanda até o início da próxima década. Dessa forma, é possível antever um incremento substancial nos serviços de radioterapia em comparação com o panorama atual. Essa ampliação contribuiria para a diminuição do *deficit* de instituições de saúde e equipamentos, projetando um horizonte mais promissor em relação ao cenário no Brasil (SBRT, 2023).

RESULTADO E DISCUSSÕES

No contexto brasileiro, observa-se um empenho governamental na ampliação dos serviços de radioterapia, com projetos em andamento, porém sem prazos definidos para conclusão. A implementação de novos equipamentos enfrenta desafios significativos, incluindo processos burocráticos prolongados e custos elevados, o que contribui para a lentidão na entrega dos serviços. Esta situação resulta em um descompasso entre a demanda crescente de pacientes e a capacidade de atendimento disponível. A necessidade de novos setores e equipamentos é evidente, mas a execução desses planos ainda não avançou de forma satisfatória. É imperativo acelerar esses processos para atender à crescente demanda por tratamentos radioterápicos, conforme evidenciado pelas recentes pesquisas sobre o aumento anual dos casos de câncer.

De forma geral, o desafio para todos envolvidos no processo de radioterapia está na identificação e na discussão de riscos, na educação continuada, na maior dependência dos registros eletrônicos, na instrução adequada com software e avanços tecnológicos. Para a equipe de técnicos/tecnólogos em radioterapia, os novos desafios estão no uso seguro e adequado de imagens e sistema de entrega de tratamento, na comunicação e humanização com o paciente. Certamente que com as inovações empregadas na radioterapia moderna, principalmente, com os sistemas de planejamento para o tratamento em radioterapia, são atribuídos novos desafios aos profissionais técnicos/tecnólogos durante

a rotina do serviço. Desafios relacionados não só ao uso seguro e adequado do equipamento, mas na atenção constante e na entrega diária em fornecer segurança e impactar o trato humanizado ao paciente oncológico a cada aplicação.

REFERÊNCIAS

ART-RADIOTERAPIA. **Associação Portuguesa de Radioterapeutas**. 2014. Disponível em: <https://www.artradioterapia.pt/>. Acesso em: 19 set. 2023.

ASTRO. Assistência ao paciente e pesquisa. **American Society for Radiation Oncology**, 2019.

BRASIL. **Comissão Nacional de Energia Nuclear**. Norma CNEN NN-6.10, de 30 de junho de 2017. Resolução CNEN 277/21 (Alteração) Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Serviços de Radioterapia. Diário Oficial da União da República Federativa do Brasil, Brasília, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/>. Acesso em: 17 mai. 2024.

BRASIL. **Ministério da Saúde**. ABC do câncer: abordagens básicas para o controle do câncer. Instituto Nacional do Câncer José Alencar Gomes da Silva. 2. ed. Rio de Janeiro: INCA, 2023.

BRASIL. **Ministério da Saúde**. Censo de Radioterapia. 2019. Disponível em: Censo de Radioterapia. pdf - Ministério da Saúde (www.gov.br). Acesso em: 20 set. 2023.

BRASIL. **Ministério da Saúde**. Instituto Nacional de Câncer. TEC DOC - 1151: aspectos físicos da garantia da qualidade em radioterapia. Rio de Janeiro: INCA, 2000. Disponível em: https://www.inca.gov.br/sites/ufu.sti.inca.local/files//media/document//tecdoc-1151_-_aspectos_fisicos_da_garantia_da_qualidade_em_radiotera. Acesso em: 31 out. 2023.

BRASIL. **Ministério da Saúde**. Manual para Técnicos em Radioterapia. Instituto Nacional do Câncer José Alencar Gomes da Silva. Rio de Janeiro: INCA, 2001.

BRASIL. **Ministério da Saúde**. Sistema Único de Saúde. **Portaria nº 931**, de maio de 2012. Ampliação e fortalecimento de rede de atenção à saúde para o controle do câncer: plano de expansão da radioterapia no SUS. Disponível: Plano de Expansão da Radioterapia no SUS - Abril - Ministério da Saúde (www.gov.br). Acesso: 28 mai. 2023.

BRUM, M.; COIN, J. Radioterapia: entre o passado e o futuro. São Paulo: **Veja Saúde**, 2021. Disponível em: Radioterapia: entre o passado e o futuro | Veja Saúde (abril.com.br)

CUPERSCHMID, E. M.; MARTINS, M. D. C. S. Instituto de Radium de Minas Gerais: vanguarda da radioterapia no Brasil, 1923-1935. **História, Ciências, Saúde-Manguinhos**, v. 21, p.1235-1260, 2014.

DE ARAÚJO, L. P.; DE SÁ, N. M.; ATTY, A. T. Necessidades Atuais de Radioterapia no SUS e Estimativas para o Ano de 2030. **Revista Brasileira de Cancerologia**, v. 62, n.1, p. 35-42, 2016.

FURNARI, L. Controle de qualidade em radioterapia. **Revista Brasileira de Física Médica**, v. 3, n. 1, p. 77-90, 2012.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. Brasil: Atlas, 2008.

GUIZZARDI, M. F.; DA SILVA GUIMARÃES, D. A história da radioterapia no INCA. **Revista Brasileira de Cancerologia**, v. 46, n. 3, p. 305-307, 2000.

MICHELON, E.; COLENCI, B.; DE PAULA, V. Diferenças entre os exames de tomografia computadorizada realizados para fins diagnósticos e para planejamento radioterápico. **Disciplinarum Scientia | Naturais e Tecnológicas**, v. 13, n. 1, p. 81-91, 2012.

MORIKAWA, L.; FERREIRA, C. G. M. **Radioterapia contemporânea**. 1 ed. São Paulo: Atheneu, 2018.

NASCIMENTO, A., FALZON, P., MOLLO, V. **Do virtual ao real: Quais estratégias para garantir a segurança dos pacientes em radioterapia?** 2009.

NETO, F. M.; REIS, É. L. M. **Teleterapia de Alta Energia - Riscos para pacientes e operadores**. Belo Horizonte, MG: RM Radioterapia Mineira, 2019. Disponível em: <http://www.radioterapiamineira.org/teleterapia-de-alta-energia-riscos>. Acesso em: 20 set. 2023.

SALVAJOLI, J. V.; SOUHAMI, L.; FARIA, S. L. **Radioterapia em Oncologia**. 2 ed. São Paulo: Atheneu, 2013.

SALVAJOLI, J. V.; SOUHAMI, L.; FARIA, S. L. **Radioterapia em Oncologia**. 3 ed. São Paulo: Atheneu, 2023.

SBRT. Sociedade Brasileira de Radioterapia. Disponível: RT2030 - Home - Sociedade Brasileira de Radioterapia (sbradioterapia.com.br) Acesso: 24 abr. 2023.

SBRT. Sociedade Brasileira de Radioterapia. **Revista comemorativa da Sociedade Brasileira de Radioterapia: 20 anos de história**. 2018. Disponível em: Revista_Sociedade-Brasileira-de-Radioterapia_2018.pdf (sbradioterapia.com.br). Acesso em: 02 ago. 2023.

SCAFF, L. A. M. **Bases Físicas da Radiologia Diagnóstico e Terapia.** São Paulo: Sarvier, 1979.

SCAFF, L. A. M. **Distribuição da dose. Física da Radioterapia.** São Paulo: Sarvier, p. 109-136, 1997.

SCHAUE, D.; MCBRIDE, W. H. Opportunities and challenges of radiotherapy for treating cancer. **Nature reviews Clinical oncology**, v. 12, n. 9, p. 527-540, 2015.