

Bunkers de ontem, tecnologias de hoje: como explorar a carga de trabalho modulada sem reformar?

Yesterday's bunkers, today's technologies: how to expand the modulated workload without structural renovations?

Andre G. Prospero^{1,2*}, Lucas Radicchi^{2*}, Leandro Baptista^{2*}, Beatriz Tomazzi^{2,3*}, Herminiane Vasconcelos^{2,4*}, Cristina Giolo^{2,4*}, Flávio da Silva Guimarães^{1*}, Thales Hilario Hungaro^{1*}, Amanda F. Meletti^{2,5*}, Fernanda Belletti^{2,6*}, Taís Peron^{2,7*}, José Carlos da Cruz^{1*}

¹Irmandade da Santa Casa de Misericórdia de São Carlos, São Carlos, Brasil

²RTCON soluções em radioterapia, São Paulo, Brasil

³Unimed Bauru, Bauru, Brasil

⁴Instituto Brasileiro de Controle de Câncer - IBCC, São Paulo, Brasil

⁵Instituto de Assistência Médica ao Servidor Público Estadual de São Paulo - IAMSPE, São Paulo, Brasil

⁶Grupo de Apoio ao Adolescente e à Criança com Câncer – GRRACC, São Paulo, Brasil

⁷Hospital de Base do Distrito Federal - HBDF, Brasília, Brasil

*os autores contribuíram igualmente para o desenvolvimento do trabalho

Resumo

A incorporação de técnicas moduladas na radioterapia trouxe desafios para a adequação das blindagens dos *bunkers*, historicamente projetados para cargas de trabalho convencionais. Reformas estruturais são frequentemente inviáveis, e as metodologias tradicionais de reavaliação, como as do NCRP 151, apresentam limitações práticas para instalações em operação. Este trabalho propõe um modelo analítico baseado em medições reais de taxa de dose e em uma abordagem inversa, visando estimar de forma rápida e segura a carga máxima admissível em *bunkers* existentes, respeitando os limites regulamentares da CNEN. Cinco instituições brasileiras foram avaliadas, considerando perfis clínicos reais e características físicas das instalações. Os resultados demonstraram que a maioria dos serviços pode aumentar a fração de técnicas moduladas para 100% sem a necessidade de reformas. Em adição, superfícies teóricas de resposta validaram a robustez matemática e operacional do modelo. Em comparação com abordagens recentes da literatura, o método proposto se destaca pela simplicidade, rapidez de aplicação e aderência à realidade construtiva dos *bunkers*. Este trabalho oferece uma solução prática para otimizar a capacidade assistencial e expandir o uso de técnicas avançadas em radioterapia, sem comprometer a proteção radiológica, representando um avanço estratégico para a gestão de serviços oncológicos.

Palavras-chave: Radioterapia; Carga de trabalho; Blindagem; Medições radiométricas; Otimização de recursos.

Abstract

The incorporation of modulated techniques in radiotherapy has raised new challenges for shielding adequacy in radiotherapy treatment bunkers, originally designed for conventional workloads. Renovating these structures is often impractical, and traditional reassessment methods, such as those from NCRP Report No. 151, show practical limitations for operating facilities. This study presents a practical analytical model based on direct dose rate measurements and an inverse calculation approach to quickly and safely estimate the maximum permissible workload, while complying with CNEN regulatory standards. We evaluated five Brazilian institutions, using real clinical profiles and bunker characteristics. The results showed that most facilities could increase the use of modulated techniques up to 100% without requiring structural modifications. Additionally, response surface modeling confirmed the mathematical consistency and operational reliability of the method. Compared to existing approaches, our model offers greater simplicity, faster application, and better alignment with actual construction features. This work provides a practical tool for expanding the use of advanced techniques and optimizing treatment capacity in radiotherapy centers, without compromising radiation protection, representing a strategic advancement for the management of oncology services.

Keywords: Radiotherapy; Workload; Radiation shielding; Radiometry; Resource optimization.

1. Introdução

Nas últimas décadas, a radioterapia passou por avanços tecnológicos significativos, onde destacou-se a consolidação de técnicas moduladas como a Radioterapia de Intensidade Modulada (IMRT) e a Arcoterapia Volumétrica Modulada (VMAT). Essas modalidades proporcionam maior conformidade da dose ao volume-alvo e melhor preservação dos tecidos saudáveis, tornando-se o padrão terapêutico para diversos tipos de câncer (1,2).

Entretanto, muitos dos *bunkers* de radioterapia em operação no Brasil foram projetados em períodos

anteriores à disseminação dessas técnicas, baseando-se em cargas de trabalho típicas da radioterapia conformacional tridimensional (3DCRT). Os cálculos de blindagem adotados à época — conforme diretrizes como o NCRP 151 (3) e literatura nacional (4) — em sua maioria não previam o aumento no tempo de feixe (*beam-on time*) nem o incremento na radiação de fuga associados ao aumento intensivo recente de técnicas moduladas. Entretanto, vale ressaltar que essas metodologias envolviam aproximações conservadoras e recomendavam arredondamentos sistemáticos que levavam à superestimação das barreiras (5). Além

disso, durante a fase de construção dos *bunkers*, também era comum a adoção de margens adicionais de segurança, resultando em blindagens mais robustas que as estritamente necessárias.

Com a incorporação de aceleradores modernos e a crescente adoção de IMRT e VMAT, muitos serviços enfrentam dúvidas sobre a adequação de suas instalações frente a cargas de trabalho moduladas mais elevadas (6). Reformas estruturais para reforço das blindagens são, em geral, inviáveis, tanto pelo alto custo financeiro quanto pela necessidade de interrupção temporária das atividades clínicas — com impactos significativos na assistência e na sustentabilidade econômica dos serviços. Além disso, a reaplicação integral da metodologia de cálculo de blindagem conforme o NCRP 151 é um processo complexo, demorado e que demanda grande quantidade de informações e recursos humanos altamente especializados, o que dificulta sua aplicação rotineira em serviços já em funcionamento. Ressalta-se ainda que a reaplicação desse modelo raramente reflete com precisão o estado atual do *bunker*, visto que barreiras construídas frequentemente apresentam espessuras superiores às declaradas nos projetos, devido a margens de segurança adotadas durante a obra. Ignorar essas diferenças pode levar a uma subestimação do potencial real de aumento da carga de trabalho.

Neste contexto, este trabalho propõe uma abordagem alternativa para avaliar a possibilidade de aumento da carga de trabalho modulada em *bunkers* existentes. A metodologia parte da dose limite permitida para a barreira mais crítica da sala, identificada com base em levantamento radiométrico, e utiliza um modelo inverso para estimar a carga de trabalho máxima admissível que respeite os limites estabelecidos pela CNEN (1 mSv/ano para áreas livres e 20 mSv/ano para áreas supervisionadas) (7).

Adicionalmente, exploramos o impacto de diferentes combinações de técnicas (3DCRT, IMRT e VMAT) e quantidade de pacientes por dia sobre a carga de trabalho admissível, modelando cenários realistas com base no perfil clínico de cada serviço e nas características físicas das instalações. O objetivo é viabilizar a adoção segura e gradual de técnicas avançadas, otimizando a capacidade assistencial sem comprometer a proteção radiológica.

2. Materiais e Métodos

Este estudo avaliou cinco *bunkers* de radioterapia localizados em diferentes instituições brasileiras, com o objetivo de estimar a viabilidade de aumento da carga de trabalho modulada (IMRT e VMAT) e aumento na quantidade de pacientes assistidos, sem a necessidade de reformas estruturais. Para cada *bunker*, foram realizados os seguintes procedimentos:

2.1. Levantamento de dados clínicos e físicos

Inicialmente, foi realizado o levantamento do perfil clínico de cada serviço, considerando os 15 sítios anatômicos mais frequentemente tratados, com a

fração percentual de pacientes para cada sítio i (f_i) e a dose diária média por isocentro de cada sítio i (D_i). Também foi considerada a distribuição percentual de pacientes por técnica (3D, IMRT e VMAT), com fatores de modulação associados conforme as recomendações da literatura e aceitação histórica: $C_{3D} = 1$, $C_{IMRT} = 5$ e $C_{VMAT} = 3$.

Foram coletados para cada *bunker* os valores da taxa de dose medida na barreira crítica (\dot{H} - mSv/h) e a taxa de dose máxima da máquina no isocentro (D_{max} - Gy/h) para o feixe de fótons de maior energia.

Os fatores de ocupação adotados (T) seguiram as recomendações do NCRP Report No. 151 (3), considerando a classificação da área adjacente. Além disso, o fator de uso $U = 1$ foi utilizado para todas as barreiras secundárias, exceto para as portas dos *bunkers*, como será explicado nas próximas seções.

2.2. Condições experimentais

As medições de taxa de dose equivalente nas barreiras secundárias foram realizadas com o fantoma posicionado no isocentro, refletindo a contribuição combinada de radiação de fuga e espalhamento pelo paciente ($IDR_{total} = \dot{H}$). De acordo com a metodologia descrita no NCRP 151, essas componentes podem ser separadas por meio de medições com e sem fantoma; no entanto, neste estudo, optou-se por utilizar diretamente a medida total como referência operacional. No processo de otimização, a fração de pacientes tratados com técnicas moduladas e fator de modulação foram aplicados sobre a carga de trabalho clínica total associada à medição, assumindo-se que ambas as componentes são proporcionalmente impactadas pelas técnicas moduladas. Essa abordagem simplifica o modelo e resulta em estimativas conservadoras da dose na barreira, visto que a literatura indica que apenas a radiação de fuga sofre aumento significativo com a modulação, enquanto a radiação espalhada pelo paciente tende a permanecer constante. Assim, os limites determinados para carga de trabalho e número de pacientes mantêm margem de segurança adicional, mesmo em cenários de uso intensivo de IMRT e VMAT.

Podemos expressar essa condição manipulando a equação (1), que descreve dose semanal estimada na barreira:

$$H_{estimado} = \left(\dot{H}_{fuga} \cdot \frac{W_{fuga}}{\dot{D}_{max}} \right) + \left(\dot{H}_{esp} \cdot \frac{W_{esp}}{\dot{D}_{max}} \right) \quad (1)$$

Onde \dot{H}_{fuga} e \dot{H}_{esp} , são as taxas de dose referentes às contribuições da fuga e espalhamento, respectivamente; e W_{fuga} e W_{esp} são as cargas de trabalho de fuga e espalhamento, respectivamente.

Podemos reescrever a equação (1) em termos da carga de trabalho clínica (W_{clin}), fração de tratamentos modulados (f_{mod}), fator de modulação (C_{mod}) e fator de uso (U), obtendo a equação (2):

$$H_{estimado} = \left(\dot{H}_{fuga} \cdot \frac{W_{clin} \cdot f_{mod} \cdot C_{mod}}{D_{max}} \right) + \left(\dot{H}_{esp} \cdot \frac{W_{clin} \cdot U}{D_{max}} \right) \quad (2)$$

No caso deste trabalho, como comentado anteriormente, utilizamos o fator de uso $U = 1$ para todas as barreiras secundárias. Além disso, realizamos a medida de taxa de dose considerando a contribuição combinada das componentes de fuga e espalhamento ($\dot{H} = \dot{H}_{fuga} + \dot{H}_{esp}$), onde finalmente foram aplicados o fator de modulação e a fração de tratamentos modulados. Aplicando essas considerações na equação (2), obtemos a equação (3) que descreve as condições experimentais deste trabalho:

$$H_{estimado} = \left(\dot{H} \cdot \frac{W_{clin} \cdot f_{mod} \cdot C_{mod}}{D_{max}} \right) \quad (3)$$

No caso da avaliação da barreira primária, a condição experimental pode ser expressa pela equação (4), adaptada do NCRP 151:

$$H_{estimado} = \left(\dot{H} \cdot \frac{W_{clin} \cdot U_{prim}}{D_{max}} \right) \quad (4)$$

Onde U_{prim} é o fator de uso da barreira primária em análise, e $U_{prim} < 1$.

2.3. Modelo inverso e otimização

A carga de trabalho primária semanal (W_{prim} - Gy/sem) é calculada pela equação (5):

$$W_{prim} = N_{pac/dia} \cdot N_{dias/sem} \cdot \sum_{i=0}^n (f_i \cdot D_i) \quad (5)$$

Sendo $N_{pac/dia}$ o número de pacientes tratados por dia, $N_{dias/sem}$ o número de dias de tratamento por semana, f_i a fração de pacientes para cada sítio de tratamento i e D_i a dose diária média por isocentro de cada sítio i .

A carga de trabalho secundária semanal (W_{sec} - Gy/sem) é expressa pela equação (6):

$$W = [N_{pac/dia} \cdot N_{dias/sem} \cdot \sum_{i=0}^n (f_i \cdot D_i) \cdot (f_{3D} \cdot C_{3D} + f_{IMRT} \cdot C_{IMRT} + f_{VMAT} \cdot C_{VMAT})] \quad (6)$$

Onde f_{3D} , f_{IMRT} e f_{VMAT} são as frações de pacientes tratados com cada técnica, C_{3D} , C_{IMRT} e C_{VMAT} são os fatores de modulação típicos de cada técnica.

A dose semanal estimada na barreira é dada pela equação 7:

$$H_{estimado} = (W + W_{fis}) \cdot (\dot{H} / D_{max}) \cdot U \cdot k \cdot T \quad (7)$$

Onde W pode assumir o valor da carga de trabalho primária ou secundária, k é um fator empírico para espalhamento múltiplo (2,64 para portas, 1 para demais barreiras) e W_{fis} é a carga de trabalho física,

que foi considerada 100 Gy/sem para todos os bunkers.

A partir da equação 7, podemos continuar o desenvolvimento do modelo considerando a barreira restritiva sendo uma barreira primária ou secundária. Assim, podemos substituir a equação (5) ou (6) na equação (7), dependendo das características da barreira. Note que as diferenças entre as equações (5) e (6) se dão principalmente na inserção das frações de tratamentos modulados e seus fatores de modulação na equação (6). Dessa forma, seguiremos o desenvolvimento do modelo a partir da equação (6), que representa o caso mais completo.

Substituindo a equação (6) na equação (7), obtemos a equação (8) que representa a dose estimada no ponto avaliado:

$$H_{estimado} = [W_{fis} + N_{pac/dia} \cdot N_{dias/sem} \cdot \sum_{i=0}^n (f_i \cdot D_i) \cdot (f_{3D} \cdot C_{3D} + f_{IMRT} \cdot C_{IMRT} + f_{VMAT} \cdot C_{VMAT})] \cdot (\dot{H} / D_{max}) \cdot U \cdot k \cdot T \quad (8)$$

A condição de aceitabilidade da dose na barreira é dada por:

$$H_{estimado} < H_{limite}$$

Sendo o H_{limite} os valores de dose restritivos, determinados pela CNEN, como será descrito nas próximas seções.

Na prática, a otimização da carga de trabalho é realizada em duas etapas sequenciais:

Etapa 1: Otimização da carga modulada:

Inicialmente, busca-se aumentar a fração de pacientes tratados com técnicas moduladas (IMRT ou VMAT), respeitando o limite de dose. A condição de aceitabilidade é expressa pela inequação (9):

$$\frac{(f_{3D} \cdot C_{3D} + f_{mod} \cdot C_{mod})}{H_{limite} - H_{fis}} < \frac{N_{pac/dia} \cdot N_{dias/sem} \cdot \sum_{i=0}^n (f_i \cdot D_i) \cdot (\dot{H} / D_{max}) \cdot U \cdot k \cdot T}{(9)}$$

Onde f_{mod} e C_{mod} representam a fração e o fator de modulação da técnica considerada (C_{IMRT} ou C_{VMAT}), respectivamente, e H_{fis} é expresso pela equação (10):

$$H_{fis} = W_{fis} \cdot (\dot{H} / D_{max}) \cdot U \cdot k \cdot T \quad (10)$$

Etapa 2: Otimização do número de pacientes: Se a fração de IMRT ou VMAT atingir 100% e ainda houver margem de dose disponível, então a segunda etapa visa maximizar o número de pacientes por dia, respeitando a inequação (11):

$$\frac{N_{pac/dia}}{\frac{H_{limite} - H_{fis}}{C_{mod} \cdot N_{dias/sem} \cdot \sum_{i=0}^n (f_i \cdot D_i) \cdot (\dot{H} / D_{max}) \cdot U \cdot k \cdot T}} < (11)$$

Essa estratégia sequencial permite avaliar separadamente o impacto da modulação e da produtividade sobre a dose na barreira, oferecendo maior flexibilidade para a tomada de decisão clínica e operacional.

No caso da barreira restritiva ser uma barreira primária, o processo de otimização se dá apenas na

etapa 2, uma vez que as frações de tratamentos modulados, bem como seus respectivos fatores de modulação, não impactam a W_{prim} . Nesta situação, a inequação (11) pode ser adaptada para o estudo de uma barreira primária apenas desconsiderando-se o fator C_{mod} .

2.3.1. Caso especial: porta como barreira limitante

Para a estimativa da dose na barreira da porta, as medições de taxa de dose foram realizadas com o gantry posicionado em ângulos específicos que maximizam a contribuição de espalhamento para essa região, representando uma condição de feixe direcionado continuamente para uma determinada parede, ou seja, $U = 1$. A fim de refletir a situação clínica real, na qual o feixe incide sobre essa direção apenas uma fração do tempo, a dose medida foi ponderada pelo fator de uso correspondente àquela parede ($U < 1$). Posteriormente, para considerar as contribuições adicionais de espalhamentos múltiplos provenientes de diferentes orientações do gantry ao longo da rotina clínica — não capturadas diretamente na medição pontual — foi aplicado o fator empírico $k = 2,64$, conforme sugerido por McGinley (3, 5), e posteriormente confirmado por Kildea, J. (2010) (8). Dessa forma, a estimativa de dose na porta foi obtida a partir do produto $H_{medido} \cdot U \cdot k \cdot T$, representando uma condição realista e conservadora de operação.

2.4. Condições de aceitabilidade

A dose semanal estimada em cada barreira crítica foi comparada aos limites regulamentares de exposição, conforme definidos pela norma CNEN NN 3.01 (4, 8). Foram considerados dois cenários distintos de classificação das áreas adjacentes:

Cenário 1 – Área livre: Considera todas as áreas adjacentes às barreiras como acessadas livremente pelo público em geral. Neste caso, adota-se o limite de dose equivalente efetiva de 1 mSv/ano, convertido para 0,02 mSv/sem.

Cenário 2 – Área supervisionada: Considera a possibilidade de reclassificação de algumas áreas como supervisionadas, conforme previsto pela CNEN NN 3.01, desde que atendidos critérios normativos, como sinalização e controle de acesso. Nesse caso, o limite considerado foi de 20 mSv/ano, equivalente a 0,4 mSv/sem.

A condição de aceitabilidade em ambos os cenários foi considerada, e H_{limite} assume os valores definidos conforme o cenário avaliado.

Essa abordagem permite estimar, para cada *bunker*, o número máximo de pacientes por dia e a melhor combinação de técnicas (3D, IMRT e VMAT) que satisfaça os limites normativos de dose para cada situação de vizinhança.

3. Resultados

3.1. Caracterização do perfil clínico

O perfil clínico das cinco instituições avaliadas foi caracterizado com base na distribuição percentual de

pacientes por sítio anatômico e nas doses médias diárias administradas. As doses médias variaram consideravelmente entre os diferentes sítios, com valores em torno de 1,5 Gy/dia para "TLI" (*Total Lymphatic Irradiation*) e "Abdômen total" e valores mais elevados para "Mama Fast" e "SRS" (Radiocirurgia – no caso fracionada), que ultrapassaram 5 Gy/dia (Figura 1).

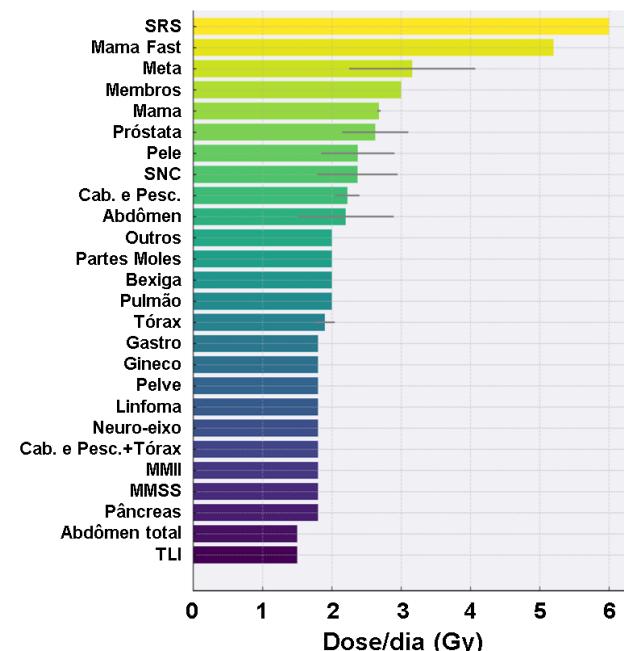


Figura 1. Dose média diária por sítio anatômico. As barras horizontais indicam o desvio padrão observado. As siglas MMII e MMSS são tumores que acometem membros inferiores e superiores, respectivamente.

A análise da distribuição percentual de pacientes mostrou variações relevantes entre as instituições, refletindo as especificidades dos perfis assistenciais e dos tipos de câncer predominantemente tratados (Figura 2). Apesar disso, é possível perceber, no geral, uma predominância de sítios como "Mama", "Próstata", "Gastro", "Cabeça e Pescoço" e "Meta" (Metástase) para as instituições 1, 2, 3 e 5, enquanto que a maioria desses sítios não aparecem para a instituição 4. Isso ocorre devido ao fato da instituição 4 ser uma unidade de tratamento pediátrico, onde predominam casos de "SNC" (Sistema Nervoso Central), "Neuro-eixo" e "Abdômen total".

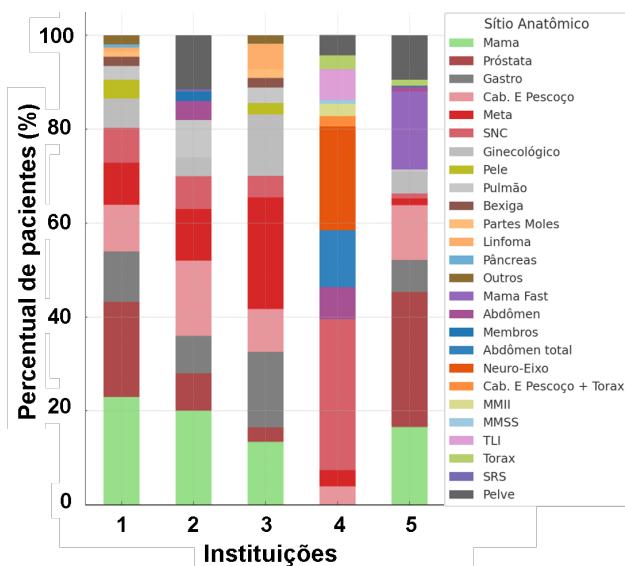


Figura 2. Distribuição percentual de pacientes por sítio anatômico nas instituições avaliadas.

3.2. Quantificação da carga de trabalho modulada e capacidade de atendimento

A partir do modelo inverso desenvolvido, foram estimadas as capacidades máximas de modulação da carga de trabalho e o potencial de aumento do número de pacientes tratados por dia para cada instituição. Dois cenários distintos foram considerados: no cenário 1, em que as áreas adjacentes foram classificadas como área livre (1 mSv/ano), observou-se que a adoção máxima de técnicas IMRT ou VMAT permitiu que quase todas as instituições atingissem cargas de trabalho moduladas superiores a 100%, conforme apresentado na Figura 3A. Apenas a instituição 1 que atingiu um máximo de 53% para IMRT mantendo o número de pacientes preconizado no RPAS original (80 pacientes/dia). Em adição, a Figura 3B mostra que o aumento no número de pacientes/dia foi expressivo, principalmente com a adoção predominante do VMAT, com instituições como a 4 e a 5 alcançando incrementos superiores a 700 pacientes/dia. No caso específico da instituição 3 não existiram diferenças no aumento do número de pacientes entre as técnicas de IMRT e VMAT, uma vez que a barreira limitante foi uma barreira primária.

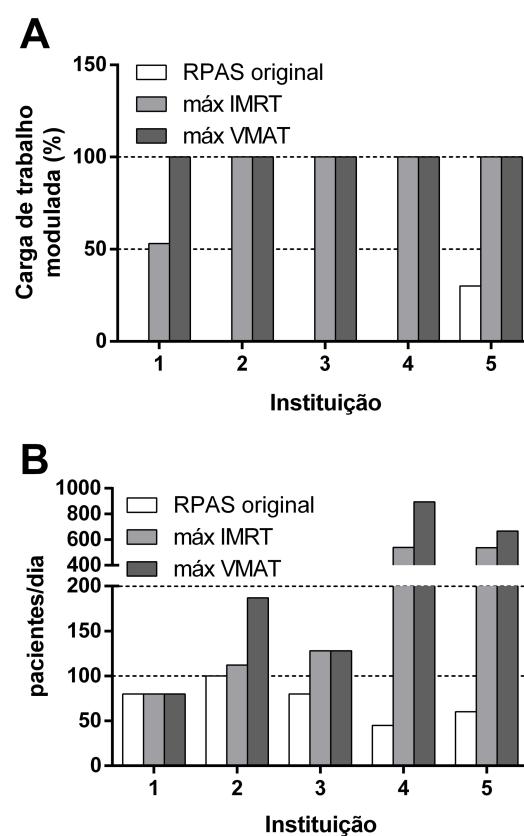


Figura 3. Estimativas de carga de trabalho em dois cenários de classificação radiológica. (A) Carga de trabalho modulada máxima (% do total) no cenário 1 (área livre); (B) Número máximo de pacientes por dia no cenário 1. RPAS original (Relatório Preliminar de Análise de Segurança) representa os valores estabelecidos inicialmente no projeto de blindagens da instituição.

No cenário 2, considerando a reclassificação das áreas adjacentes como áreas supervisionadas (20 mSv/ano), os resultados indicaram um potencial ainda maior de expansão. Conforme ilustrado na Figura 4A, todas as instituições puderam operar com cargas de trabalho moduladas de 100% tanto para IMRT quanto para VMAT. O número de pacientes por dia aumentou substancialmente, com destaque para a Instituição 5, que ultrapassou a marca de 5000 pacientes/dia no cenário de máxima utilização de VMAT, evidenciando o impacto positivo da reclassificação para a otimização da capacidade assistencial, como mostra a Figura 4B. Vale ressaltar que as áreas reclassificadas foram apenas aquelas que atendiam critérios normativos que justificassem sua reclassificação. Assim, podemos observar que a instituição 4 não apresentou aumento do número de pacientes no cenário 2, uma vez que a barreira limitante é a recepção da instituição (área livre sem possibilidade de reclassificação).

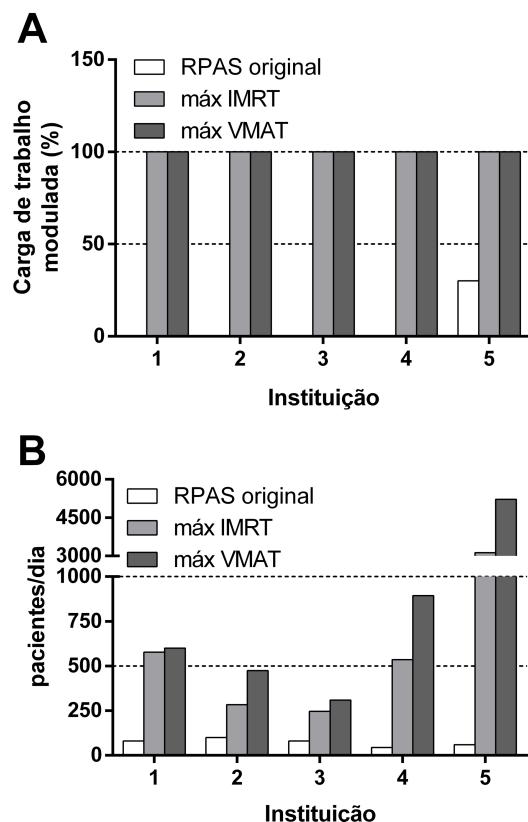


Figura 4. Estimativas de capacidade assistencial em dois cenários de classificação radiológica. (A) Carga de trabalho modulada máxima no cenário 2 (área supervisionada); (B) Número máximo de pacientes por dia no cenário 2.

3.2. Quantificação da carga de trabalho modulada e capacidade de atendimento

Para ilustrar o comportamento teórico das soluções possíveis, foi gerada uma superfície de resposta tridimensional do modelo desenvolvido (Figuras 5A e 5B), representando a capacidade relativa de pacientes em função das frações de IMRT e VMAT adotadas. A superfície obtida apresenta uma forma convexa, delimitando claramente as combinações viáveis. A região de soluções inviáveis, onde a fração de tratamentos 3D (dada por $1 - (\text{fração IMRT} + \text{fração VMAT})$) seria negativa, é representada pelas zonas em tons roxos escuros, próximas a capacidade zero. Este resultado valida a consistência matemática e física do modelo proposto, além de reforçar a flexibilidade clínica possível sem comprometer os limites de radioproteção.

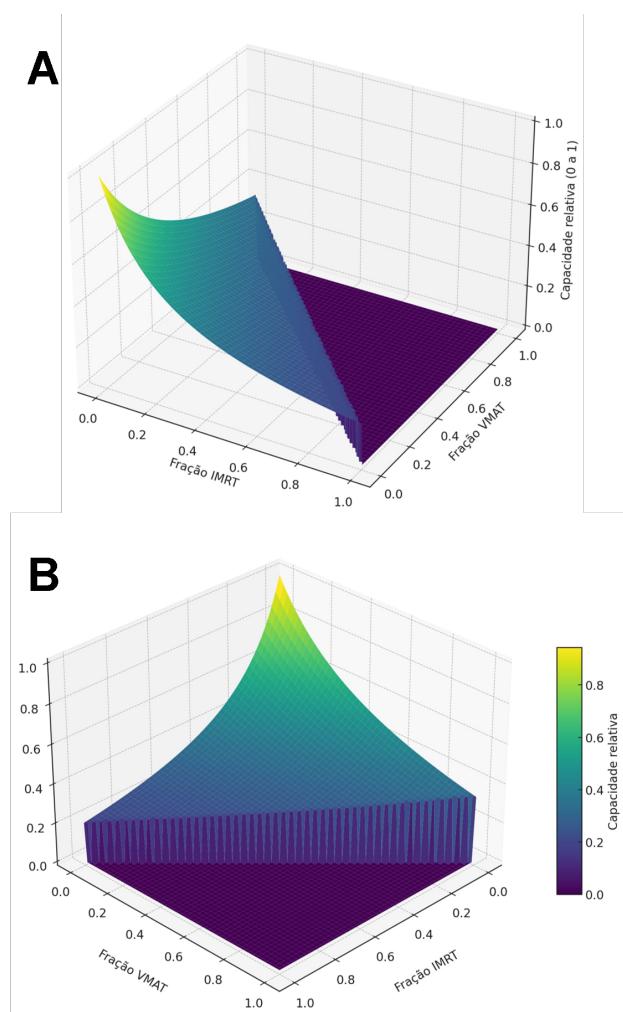


Figura 5. Superfície teórica de resposta para capacidade relativa de atendimento. (A) e (B) são representações tridimensionais, em duas diferentes perspectivas, da capacidade relativa de atendimento em função da fração de pacientes tratados com IMRT e VMAT.

4. Discussão

Os resultados obtidos aqui demonstram que é possível expandir de maneira segura a carga de trabalho modulada em bunkers de radioterapia existentes, mesmo considerando os limites mais restritivos para áreas adjacentes, como o limite de 1 mSv/ano estabelecido para áreas livres. Todas as instituições avaliadas apresentaram capacidade de aumentar significativamente a utilização de técnicas IMRT e VMAT, onde a maioria atingiu cargas de trabalho modulada de 100% sem a necessidade de reformas estruturais. No cenário de reclassificação para áreas supervisionadas, o potencial de expansão foi ainda mais expressivo, resultando em aumentos substanciais na capacidade assistencial dos serviços.

Nossos achados reforçam a robustez das blindagens construídas sob metodologias conservadoras, frequentemente com margens de segurança adicionais. Além desses, outros fatores podem contribuir para o aumento de carga expressivo que encontramos, como por exemplo valores reais de fuga de cabeçote abaixo dos valores recomendados

e valores de TVL (*tenth value layer*) de fuga superestimados. Silva, D. C. S. A. (2023), avaliou a radiação de fuga de quatro diferentes aceleradores lineares (9). Seus dados mostram que essa componente da radiação secundária, que é a mais impactada por técnicas moduladas, é superestimada em até duas vezes nos protocolos padrão, como o NCRP 151, e manuais dos equipamentos. Ademais, como mostrado por Nelson, W. R. & LaRiviere, P. D. (10), o espectro da radiação de fuga é dependente do ângulo de fuga do fóton. Entretanto o NCRP recomenda a utilização de valores de TVL de fuga em um ângulo de 90 graus. De acordo com o NCRP 151, esse valor de ângulo é uma adaptação conservadora e segura dos valores apresentados por Nelson, W. R. & LaRiviere, P. D. (3, 10).

Vale ressaltar ainda que alguns *bunkers* antigos, como o caso da instituição 5, foram calculados considerando fatores de ocupação $T = 1$ e área livre em todas as suas vizinhanças. Além disso, nesse caso específico, o *bunker* foi projetado inicialmente para receber uma máquina com energia máxima de fótons de 10 MV, mas no final do projeto recebeu uma máquina com energia máxima de 6 MV.

A construção de superfícies teóricas de resposta confirmou a consistência física do modelo, demonstrando que a capacidade de atendimento é maximizada em combinações viáveis entre IMRT, VMAT e 3D, respeitando a restrição fundamental de que a fração de tratamentos 3D não se torne negativa. Este comportamento é coerente com a lógica operacional da prática clínica e reforça a aplicabilidade prática do modelo desenvolvido. Ressaltamos ainda que em trabalhos futuros pretendemos considerar outros parâmetros no modelo apresentado. Apesar de atualmente o modelo ser focado apenas em restrições radiológicas, fatores como condições de recursos humanos, período de operação do serviço, faturamento, *up-time* de máquina e manutenção de acordo com o tipo de técnica aplicada, são parâmetros que podem ser incluídos a fim de refinar ainda mais o modelo e torná-lo uma ferramenta para tomadas de decisão nos ambientes clínico e operacional.

Diversas abordagens têm sido propostas para avaliar a carga de trabalho em radioterapia, especialmente com o advento de técnicas moduladas como IMRT e VMAT. O NCRP Report No. 151 (3) permanece como o principal documento de referência para projetos de blindagem, baseado em cenários conservadores e parâmetros padrão. No entanto, seu uso para reavaliações de *bunkers* existentes é limitado pela complexidade e pela dependência de dados projetivos.

Entre as propostas recentes, destaca-se o programa SEATTLE (11), que automatiza a avaliação de blindagens usando dados extraídos de planos de tratamento clínicos (DICOM RT Plans), calculando fatores de modulação, uso e carga de trabalho real. A partir desses cálculos e da carga de trabalho original, determina o número máximo de pacientes suportado pelo *bunker*. Contudo, não utiliza medições radiométricas e assume que as barreiras construídas

coincidem exatamente com as projetadas, desconsiderando margens de segurança ou espessuras excedentes. Em adição, Price et al. (6) propuseram um modelo de avaliação baseado na multiplicação de um fator de escala (MSF – *modulation scaling factor*) pela taxa de dose semanal em pontos críticos do *bunker*. Porém, seu fator de escala também é baseado na carga de trabalho original do *bunker*, além do trabalho ser focado principalmente no impacto da geração de nêutrons em tratamentos com fótons de alta energia.

Outros estudos também abordaram a necessidade de reavaliação das blindagens e práticas clínicas em função da introdução de técnicas moduladas. Reis Junior et al. (12) propuseram métodos para estimar a carga de trabalho total em salas que utilizam VMAT, considerando parâmetros clínicos e operacionais. Em seu estudo, reportam valores de fator de modulação $C < 2$, ou seja, menores do que os recomendados pelas agências reguladoras e utilizados neste trabalho. Nesse mesmo tema, o trabalho já citado de Silva, D. C. S. A. (2023), também apresenta valores de fator de modulação abaixo dos recomendados, onde foram encontrados fatores de modulação $C \leq 3$ para IMRT e $C \leq 2,58$ para VMAT (9). Esse trabalho ainda foi além, e mostrou resultados custo-efetivos, sugerindo que caso os *bunkers* contemplados no Plano de Expansão de Radioterapia do SUS (PERSUS) considerassem o valor médio de fator C apresentado no trabalho, existiria uma economia de aproximadamente 5 milhões de dólares devido ao menor volume de concreto necessário (9).

Santini et al. (13) propuseram um novo modelo de cálculo para levantamentos radiométricos baseado em medições clínicas e nas equações do NCRP 151 (também apresentadas no item 2.2 deste trabalho). Em seu estudo, mostram que apenas a componente de fuga é impactada pelas técnicas moduladas, enquanto a radiação espalhada permanece inalterada. O modelo apresentado trata as duas contribuições separadamente, mostrando ainda a possibilidade de utilizar fator de uso $U < 1$ para a componente da radiação espalhada, o que pode impactar a carga de trabalho secundária. Além disso, demonstraram que o modelo tradicional (utilizado neste presente trabalho) pode superestimar em até 195% a dose nas barreiras secundárias. Dessa forma, caso utilizássemos o modelo de Santini et al. (13), e fatores de modulação mais próximos da realidade clínica (9, 12), provavelmente ainda teríamos margem para aumentar a carga de trabalho modulada ou o número de pacientes nos *bunker* estudados.

Embora contribuam muito para a compreensão do impacto das técnicas moduladas nas blindagens de *bunkers* de radioterapia, esses trabalhos não fornecem métodos práticos e rápidos para expansão da carga modulada sem necessidade de reformas estruturais.

Dentro desse contexto, o presente trabalho propõe uma abordagem original, baseada na utilização de medições reais de taxa de dose e em um formalismo analítico simples e prático. Ao contrário das

abordagens tradicionais que dependem fortemente de parâmetros projetivos, o modelo desenvolvido aqui parte da realidade construída e da resposta real da barreira crítica, permitindo a estimativa da carga máxima admissível de forma rápida e eficiente. Além disso, a possibilidade de simular diferentes combinações clínicas de IMRT, VMAT e 3D-CRT confere ao modelo uma flexibilidade operacional que o torna especialmente útil para o planejamento estratégico de serviços de radioterapia, favorecendo a adoção segura de técnicas avançadas e a otimização da capacidade assistencial, com fundamentação radiológica robusta.

5. Conclusões

Os resultados deste estudo demonstram que a expansão da carga de trabalho modulada e do número de pacientes nos *bunkers* estudados é viável e segura, mesmo no cenário de limitação regulatória mais restritivo. A metodologia proposta, baseada em medições reais de taxa de dose e em um modelo analítico inverso, mostrou-se simples, prática e alinhada às condições físicas reais das instalações, superando limitações de abordagens tradicionais dependentes de dados projetivos. Além de garantir o cumprimento dos limites regulatórios, o modelo permite simular diferentes combinações clínicas, oferecendo flexibilidade operacional e suporte para o planejamento estratégico dos serviços. Esses resultados reforçam a importância de avaliações radiométricas objetivas como ferramenta para otimizar a capacidade assistencial sem comprometer a proteção radiológica. Além disso, esse modelo pode ser expandido e, em trabalhos futuros, pretendemos incorporar outros parâmetros e restrições, como a diferenciação de faturamento em relação à técnica utilizada, a capacidade de recursos humanos, os custos de operação e tempo de up-time da máquina por tipo de técnica, entre outros parâmetros de interesse.

Agradecimentos

Agradecemos às instituições e Supervisores de Proteção Radiológica que disponibilizaram seus dados operacionais: Santa Casa de Ourinhos, IAMSPE, GRAACC, Hospital de Base de Brasília, Santa Casa de São Carlos.

Referências

1. Teoh M, Clark CH, Wood K, Whitaker S, Nisbet A. Volumetric modulated arc therapy: a review of current literature and clinical use in practice. *Br J Radiol.* 2011;84:967-96.
2. Muirhead R, Drinkwater K, O'Cathail SM, Adams R, Glynne-Jones R, Harrison M, et al. Initial results from the Royal College of Radiologists' UK National Audit of Anal Cancer Radiotherapy 2015. *Clin Oncol (R Coll Radiol).* 2017;29(3):188-95.
3. National Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP Report No. 151: Structural shielding design and evaluation for megavoltage X- and gamma-ray radiotherapy facilities. Bethesda: NCRP; 2005.
4. Tauhata L, Salati IPA, Di Prinzi R, Di Prinzi MARR. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos - 9º revisão. Rio de Janeiro: IRD/CNEN.; 2013.
5. McGinley PH. Shielding techniques for radiation oncology facilities. 3rd ed. Madison: Medical Physics Publishing; 1998.
6. Price RA, Chibani O, Ma CM. Shielding evaluation for IMRT implementation in an existing accelerator vault. *J Appl Clin Med Phys.* 2003;4(3):243-52.
7. Comissão Nacional de Energia Nuclear (BR). Norma CNEN NN 3.01: Requisitos básicos de radioproteção e segurança radiológica de fontes de radiação. Resolução CNEN nº 323/24. Diário Oficial da União, 18 abr. 2024.
8. Kildea J. An evaluation of NCRP Report 151 radiation shielding design for radiotherapy facilities, and a feasibility study for 6 MV open-door treatments in an existing high-energy radiation therapy *bunker* [thesis]. Montréal (CA): McGill University; 2010.
9. Silva DCSA. Métodos de cálculo de blindagem considerando IMRT e VMAT para radioterapia moderna [dissertação]. Ribeirão Preto (SP): Universidade de São Paulo, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto; 2023.
10. Nelson WR, LaRiviere PD. Primary and leakage radiation calculations at 6, 10 and 25 MeV. *Health Phys.* 1984;47(6):811-8.
11. Choi DH, Kim DW, Ahn SH, Park SY, Kang JW. Shielding evaluator actual treatment leaf: a program for automatic shielding assessment using patient data. *Radiat Phys Chem.* 2022;201:110410.
12. Reis Junior JP, Alves VGL, Fairbanks LR. Total workload for radiotherapy facilities with volumetric modulated arc treatment. *Braz J Radiat Sci.* 2019;7(3):1-13.
13. Santini ES, de Oliveira RV, Couto N, Salata C, Leal PAP, Teixeira FCS, et al. On methods for radiometric surveying in radiotherapy *bunkers*. *Biomed Phys Eng Express.* 2024;10:035001.

Contato:

Andre Gonçalves Prospero
Irmandade da Santa Casa de Misericórdia de São Carlos e RTCON soluções em radioterapia
R. Paulino Botelho de Abreu Sampaio, 573, Vila Pureza, São Carlos – SP (13561-060). Setor de Radioterapia
andregprospero@gmail.com
andre.prospero@gruportcon.com