

**Universidade de Lisboa
Faculdade de Farmácia**



O impacto da irradiação na qualidade e segurança dos alimentos

Catarina dos Santos Vieira Pereira

Monografia orientada pela Professora Doutora Lúcia Maria Veloso
Pinheiro, Professora Auxiliar.

Mestrado Integrado em Ciências Farmacêuticas

2024

**Universidade de Lisboa
Faculdade de Farmácia**



O impacto da irradiação na qualidade e segurança dos alimentos

Catarina dos Santos Vieira Pereira

**Trabalho Final de Mestrado Integrado em Ciências Farmacêuticas
apresentado à Universidade de Lisboa através da Faculdade de Farmácia**

Monografia orientada pela Professora Doutora Lídia Maria Veloso
Pinheiro, Professora Auxiliar

2024

Agradecimentos

À Professora Doutora Lúcia Pinheiro, pela simpatia e por toda ajuda e apoio que me ofereceu na elaboração desta monografia.

Aos meus pais, Paula e Carlos, pelo seu apoio incondicional, por serem o meu porto de abrigo e, por me fazerem acreditar nas minhas capacidades mesmo quando eu não o faço. Ao meu irmão, Rafael, por ser, o meu conselheiro e o meu melhor amigo. À restante família por todo o encorajamento ao longo deste percurso, principalmente aos tios Adelino e Nini cujo orgulho é sempre visível e inspirador.

Aos amigos da faculdade, Tour por Portugal, que tornou todo este percurso mais fácil e me apoiaram mesmo quando estive a 350km de distância.

À Brigada do Reumático que me acompanha desde sempre, Ana e Margarida por sempre terem uma palavra de motivação, aos amigos matemáticos que em pouco tempo se tornaram especiais.

Por fim, agradecer às minhas colegas de equipa tanto do S.C.Braga como do S.C.U.Torreense por toda a motivação que me transmitiram ao longo dos últimos anos do curso.

Dedico esta monografia à minha avó Adília e à memória dos meus avós, Hermínio, Bernardo e Júlia.

Declaração Código de Conduta

Declaro ter desenvolvido e elaborado o presente trabalho em consonância com o Código de Conduta e de Boas Práticas da Universidade de Lisboa. Mais concretamente, afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de fraude académica, que aqui declaro conhecer, e que atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, assumindo na íntegra as responsabilidades da autoria.

Resumo

A irradiação de alimentos é uma tecnologia física não térmica que visa melhorar a qualidade e a segurança dos produtos alimentares, prolongando a sua vida útil sem comprometer as suas propriedades nutricionais e sensoriais. Expondo alimentos a doses controladas de radiação ionizante, o processo tem a capacidade para eliminar microrganismos patogénicos, inibir a germinação de tubérculos e retardar o amadurecimento de frutas, mantendo a integridade dos alimentos.

Estudos científicos e normas de organizações idóneas como a FAO, OMS e IAEA confirmam que a irradiação é segura, preservando os nutrientes e minimizando alterações químicas nos alimentos. Em comparação com os métodos tradicionais não apresenta riscos toxicológicos, microbiológicos ou nutricionais superiores; em relação a métodos térmicos, causa menos impacto nas características sensoriais, como sabor e textura, tornando-se uma alternativa eficaz para garantir a segurança alimentar. No entanto, a sua aceitação ainda enfrenta resistência, principalmente devido a perceções negativas sobre a radiação.

A aplicação adequada da irradiação pode ajudar a prevenir doenças de origem alimentar e reduzir o desperdício, mantendo a qualidade dos alimentos por mais tempo. Campanhas educativas e padronização das regulamentações podem superar a resistência dos consumidores, enquanto inovações futuras e a combinação com outras técnicas de conservação, podem ampliar seu impacto positivo na segurança alimentar.

Palavras-chave: irradiação, alimentos, efeitos, segurança, qualidade.

Abstract

Food irradiation is a non-thermal physical technology aimed at improving the quality and safety of food products, extending their shelf life without compromising their nutritional and sensory properties. By exposing foods to controlled doses of ionizing radiation, the process can eliminate pathogenic microorganisms, inhibit tuber sprouting, and delay fruit ripening, while maintaining food integrity.

Scientific studies and guidelines from reputable organizations such as the FAO, WHO, and IAEA confirm that irradiation is safe, preserving nutrients and minimizing chemical changes in food. Compared to traditional methods, it does not present higher toxicological, microbiological, or nutritional risks; and in relation to thermal methods, it causes less impact on sensory characteristics such as flavor and texture, making it an effective alternative for ensuring food safety. However, its acceptance still faces resistance, mainly due to negative perceptions about radiation.

The proper application of irradiation can help prevent foodborne diseases and reduce waste, maintaining food quality for longer periods. Educational campaigns and standardization of regulations can overcome consumer resistance, while future innovations and the combination with other preservation techniques may further enhance its positive impact on food safety.

Keywords: irradiation, food, effects, quality, safety.

Símbolos, Siglas, Abreviaturas e Acrónimos

ADN	Ácido desoxirribonucleico
CAC	Comissão do <i>Codex Alimentarius</i>
CFR	<i>Code of Federal Regulations</i> , Código de Regulamentações Federais
DL	Decreto-Lei
EM	Estados-Membros
EUA	Estados Unidos da América
eV	Eletrão-volt
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i> , Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
FDA	<i>Food and Drug Administration</i>
Gy	Gray
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i> , Agência Internacional de Energia Atômica
IFIP	<i>International Food Irradiation Project</i> , Projeto Internacional de Irradiação dos Alimentos
ISO	<i>International Organization Standardization</i> , Organização Internacional de Normalização
OMS	Organização Mundial de Saúde
ROS	Reactive oxygen species, Espécies Reativas de Oxigénio
r-X	Raios X
r- γ	Raios gama
$t_{1/2}$	Tempo de semi-vida

Índice:

1	Introdução	9
2	Objetivo.....	10
3	Materiais e Métodos.....	11
4	Irradiação dos Alimentos	12
4.1	Enquadramento Histórico	13
4.2	Princípios, Processos e Instalações	15
4.2.1	Princípios e Processos.....	15
4.2.2	Instalações.....	16
4.3	Fontes de Irradiação	19
4.3.1	Raios gama (r- γ).....	22
4.3.2	Raios X (r-X)	23
4.3.3	Feixe de eletrões	23
4.4	Níveis de Dose e Aplicações.....	24
4.5	Efeitos da irradiação	26
4.5.1	Componentes alimentares	27
4.5.1.1	Proteínas.....	28
4.5.1.2	Lípidos	29
4.5.1.3	Hidratos de Carbono	30
4.5.1.4	Vitaminas	30
4.5.2	Microrganismos	31
4.6	Fatores que influenciam o processo	34
4.7	Qualidade e Segurança.....	36
4.8	Benefícios e Limitações	37
4.8.1	Benefícios	37
4.8.2	Limitações.....	38
4.9	Acondicionamento e rotulagem de alimentos irradiados.....	39
5	Legislação	43
5.1	Internacional	43
5.2	União Europeia	45
5.2.1	Portugal.....	45
6	Aceitação dos consumidores.....	47
7	Conclusões e Perspetivas Futuras	49
	Referências Bibliográficas	50
	Anexos	56
A1.	ANEXO IV Decreto-Lei n° 337/2001.....	56

Índice de Figuras:

Figura 1 - Diagrama esquemático de uma instalação contendo um irradiador gama do tipo IV. Adaptado de (23)	18
Figura 2 - Esquema do tratamento para feixes de elétrons e radiação gama. Adaptado de (20)	19
Figura 3 - Espectro eletromagnético. Criado em BioRender.com	20
Figura 4 - Efeito da radiação ionizante nos microrganismos. Criado em BioRender.com	31
Figura 5 - Intervalo de doses letais para diferentes alvos de tratamento biológico. Adaptado de (45).....	32
Figura 6 - Símbolo Radura (52)	42

Índice de Tabelas:

Tabela 1 – Classificação de irradiadores γ quanto ao armazenamento e design.....	17
Tabela 2 - Comparação de parâmetros das fontes de irradiação	21
Tabela 3 - Aplicações para irradiação de alimentos (24).....	26
Tabela 4 - Materiais de embalagem listados no título 21 do CFR 179.45 para uso durante a irradiação de alimentos pré-embalados (51)	40

1 Introdução

A alimentação é uma necessidade fundamental para a sobrevivência humana assumindo um papel crucial no bem-estar das populações e no desenvolvimento socioeconómico global (1,2). Com o aumento da incidência de doenças de origem alimentar (3), cresce a procura por alimentos de alta qualidade, com maior durabilidade e menor dependência de agentes químicos, o que traz novos desafios para garantir a sua preservação de forma eficiente e segura (4).

A irradiação de alimentos surge como uma tecnologia promissora para abordar estes desafios, oferecendo uma abordagem física, não térmica e energeticamente eficiente (5). Embora muitos a considerem uma tecnologia relativamente recente, na verdade, a mesma foi desenvolvida durante a segunda metade do século XX (6).

Durante o processo de irradiação, os alimentos são expostos a doses controladas de radiação ionizante ou não ionizante (5,7) por um período específico (3), permitindo a sua preservação eficaz sem as perdas nutricionais e sensoriais comumente associadas aos métodos térmicos tradicionais (5). Esta tecnologia versátil, saudável e sustentável, quando aplicada corretamente, prolonga a vida útil dos alimentos ao inibir a germinação de tubérculos e retardar a maturação de frutos; desinfesta insetos e parasitas presentes em cereais, leguminosas, frutas, carnes e peixes, e eliminar microrganismos patogénicos, podendo até esterilizar completamente os alimentos (4,7).

A segurança dos alimentos irradiados levanta questões devido ao potencial das radiações ionizantes em causar alterações químicas, nutricionais e sensoriais nos alimentos (3). Apesar das evidências científicas que atestam a segurança da irradiação e da sua rigorosa regulamentação, a aceitação dessa tecnologia pelos consumidores ainda enfrenta barreiras, especialmente nos países em desenvolvimento (3,5,7). Nesses locais, a falta de sensibilização e a perceção pública negativa sobre a irradiação limitam sua adoção em larga escala (3).

De forma a responder a estas questões, desenvolveu-se um trabalho de revisão, dividido em sete capítulos onde se pretende dar a conhecer o impacto da irradiação na qualidade e segurança dos alimentos devido ao aumento da incidência de doenças de origem alimentar e com o objetivo de criar uma maior sensibilização pública para assegurar a sua aceitação e adoção em maior escala.

2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo rever o conhecimento atual sobre o impacto da irradiação na qualidade e segurança dos alimentos, analisando esta técnica como uma tecnologia de conservação. Para contextualizar, serão detalhados o seu enquadramento histórico, princípios, processos e instalações. Pretende-se discutir as diferentes fontes de irradiação utilizadas e as suas aplicações, investigando os efeitos nos componentes alimentares e nos microrganismos; expor os benefícios deste método comparativamente a outros, analisar a qualidade e segurança dos alimentos irradiados e, por fim, abordar as regulamentações internacionais e europeias, e os desafios que levam à relutante aceitação por parte dos consumidores.

3 Materiais e Métodos

A pesquisa de informação foi realizada através das bases de dados PubMed e Google Scholar tendo por base a revisão e leitura de artigos científicos (de cariz experimental e de revisão) publicados entre os anos de 2014 e 2024, com informação atualizada e fiável. As citações incluídas nesses mesmos artigos foram também objeto de pesquisa.

As palavras-chave que se seguem foram as mais utilizadas: irradiação, alimentos, efeitos, segurança e qualidade.

4 Irradiação dos Alimentos

A irradiação de alimentos corresponde ao processo no qual os produtos alimentares são expostos a radiação (1). Trata-se de um método físico, não térmico e energeticamente eficiente (5), no qual são aplicadas aos alimentos controladas doses de radiação ionizantes ou não ionizantes (7) durante um período específico (3). As fontes de radiação utilizadas neste processo podem ser naturais, provenientes de elementos radioativos na crosta terrestre, ou artificiais, resultantes de atividades humanas científicas, militares e industriais (7). Na indústria alimentar, as principais fontes são os raios gama (γ), raios X (r-X) e os feixes de elétrons (7).

A irradiação é considerada uma técnica segura (5) e sustentável, já que não utiliza produtos químicos e nem gera poluição (1,2). Além disso, por ser um método não térmico, não induz alterações consideráveis de temperatura nos alimentos (4), evitando que os seus componentes enfrentem condições adversas (2). Isso minimiza a produção de substâncias tóxicas e preserva a maioria dos seus macronutrientes (2), contrastando com os métodos térmicos tradicionais, que podem provocar perdas nutricionais e sensoriais nos alimentos, além de serem mais dispendiosos devido ao elevado consumo de energia (5). A irradiação pode ser aplicada em produtos já acondicionados permitindo o tratamento de uma ampla variedade de alimentos (5) e em grandes quantidades (2).

O objetivo da utilização desta tecnologia na indústria alimentar é garantir a estabilidade dos produtos alimentares armazenados, eliminando contaminantes como bactérias, vírus, fungos e micotoxinas com vista a melhorar a sua qualidade e segurança, aumentando o seu prazo de validade (4,7).

4.1 Enquadramento Histórico

Ao longo dos anos têm sido estudados, desenvolvidos e aplicados processos, métodos e tecnologias de conservação dos alimentos, com vista a preservar a qualidade e segurança dos mesmos (5).

Inicialmente, métodos como a secagem, aquecimento, fermentação, salga e fumagem eram as principais práticas de conservação de alimentos (8). Posteriormente, surgiram técnicas como a pasteurização, enlatamento, congelamento, refrigeração e uso de conservantes químicos (8). No entanto, esses métodos passaram a ser considerados tradicionais e limitados devido ao crescimento contínuo da população, às flutuações sazonais na produção e à grande distância entre as áreas de produção e consumo (3). Esses desafios, aliados aos avanços tecnológicos e científicos, têm impulsionado o desenvolvimento de estratégias inovadoras para garantir um fornecimento de alimentos mais amplo e seguro (3,6,8).

O propósito das tecnologias inovadoras é minimizar o consumo de energia conduzindo, conseqüentemente, à redução dos custos de produção, enquanto se aprimora a sustentabilidade da cadeia alimentar. Estas técnicas podem ser divididas em térmicas e não térmicas, sendo nestas últimas que se insere a irradiação (9).

Durante a segunda metade do século XX, a irradiação dos alimentos consolidou-se como um processo alimentar seguro e cientificamente estabelecido (6). Este procedimento refere-se à exposição de alimentos a várias formas de radiação ionizante, um fenómeno inicialmente identificado por Wilhelm Röntgen, com a descoberta dos r-X, e Henri Becquerel, ao descobrir a radioatividade natural, em 1895 e 1896, respetivamente (10). Neste contexto histórico, Minck foi pioneiro na sugestão do uso dessas radiações para fins terapêuticos (10), e pouco depois, em 1904, Samuel Prescott elucidou o seu potencial bactericida (10). No entanto, nesse período, não existiam fontes de radiação potentes e as instalações não tinham capacidade adequada para aplicações práticas, obrigando a que as primeiras experiências tivessem de ser realizadas à escala laboratorial e com amostras extremamente pequenas o que não representava qualquer utilização prática e confiável subsequente desta tecnologia (10).

Com o desenvolvimento de fontes de radiação disponíveis para uso comercial, como os r-X, os isótopos Cobalto-60 (^{60}Co) e Césio-137 (^{137}Ce), bem como aceleradores de partículas de alta potência, foi possível dar início à implementação

desta tecnologia em larga escala (10). Esse avanço abriu caminho para a exploração da irradiação a nível alimentar, inicialmente vista como uma opção para preservar alimentos destinados a rações militares, provisões para viagens espaciais e dietas hospitalares dirigidas a pacientes com imunodeficiência, utilizando doses altas de radiação (10,11). Contudo, rapidamente se compreendeu que a aplicação de doses menores de radiação poderia ser expandida, visando melhorar a segurança alimentar e diminuir as perdas e o desperdício de alimentos, o que abriu caminho para uma nova fase de investigação (11).

A partir da década de 60, foram estabelecidos projetos internacionais dedicados a validar a segurança e qualidade dos alimentos irradiados, onde se destaca o *International Food Irradiation Project (IFIP)* – Projeto Internacional de Irradiação dos Alimentos, que contou com a participação de 24 países e tinha o propósito de estudar e validar os efeitos da radiação na segurança e valor nutricional dos alimentos (12). Este projeto constituiu a base do trabalho desenvolvido pelo *Joint Expert Committee on the Wholesomeness of Irradiated Food (JECFI)*, um comitê conjunto formado, em 1963, por peritos em Irradiação de Alimentos da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) e da Organização Mundial da Saúde (OMS) que, após várias avaliações, ao longo de 20 anos, concluiu em 1983, que “...qualquer alimento irradiado até uma dose de 10 kGy é seguro para consumo, sem apresentar riscos toxicológicos ou problemas nutricionais e microbiológicos específicos” (11,12). Esta conclusão marcou o encerramento do IFIP e a criação de um grupo consultivo Internacional sobre Irradiação de Alimentos (ICFGI), destacando a importância da cooperação internacional na promoção do avanço e da aceitação de alimentos irradiados como uma tecnologia segura e eficaz (13).

Estudos subsequentes prosseguiram, destacando-se a investigação sobre irradiação em doses elevadas, 25-60 kGy, iniciada em 1997, o que salienta a dedicação persistente à segurança dos alimentos. Isso possibilitou o progresso no uso da irradiação alimentar, estabelecendo que até mesmo doses mais elevadas são seguras e não implicam em perigos consideráveis para a saúde (12,13).

Além disso, também em 1963, foi criado pela FAO e pela OMS, a Comissão do *Codex Alimentarius*¹ (CAC) que, após estas conclusões desenvolveu um “Código de Práticas para o Processamento de Alimentos por Radiação” em 1979 (14) e uma “Norma Geral para Alimentos Irrradiados” (15) em 1983, posteriormente revistos em 2003 (11,12).

4.2 Princípios, Processos e Instalações

4.2.1 Princípios e Processos

A irradiação dos alimentos é um processo físico de transformação e preservação dos alimentos, que utiliza como fonte a radiação ionizante, no qual os alimentos, a granel ou já acondicionados, são expostos a doses controladas dessa radiação (16). O objetivo é manter a qualidade e aumentar a segurança dos alimentos juntamente com o cumprimento das boas práticas de fabrico, não sendo um substituto das mesmas (17).

O que determina o tipo de fonte, a quantidade de dose e o tempo de exposição são as características do alimento, bem como o efeito que se pretende. Como existe a possibilidade de produzir radioatividade usando outras partículas, os r- γ , os r-X e os feixes de elétrons são as únicas fontes aprovadas para serem aplicadas no processamento dos alimentos por este método (3,6,7).

Apesar de existirem três fontes distintas, os processos e os princípios são idênticos para todas elas. Todas estas fontes implicam a exposição controlada dos alimentos a uma dose precisa de radiação ionizante que, ao depositar a sua energia nas moléculas, provoca a perda de elétrons – interação por excitação, quebra das ligações químicas presentes – interação por ionização, induzindo a alteração dessas moléculas, sem provocar qualquer aumento da temperatura (1,3,4). Estas alterações podem ocorrer de forma direta, com a radiação a atuar nas próprias moléculas-alvo, ou de forma indireta, ao gerar radicais livres e espécies reativas de oxigénio a partir de moléculas adjacentes, como a água. Estes subprodutos, altamente oxidantes, danificam moléculas biológicas e ajudam a decompor substâncias tóxicas (5,6,18).

¹ *Codex Alimentarius*: conjunto de normas, códigos de práticas, diretrizes e recomendações sobre os alimentos, emitidas pela CAC, internacionalmente e de forma uniforme. Orienta a criação de definições e requisitos para alimentos, com vista a harmonizar normas, proteger a saúde dos consumidores e facilitar o comércio internacional de forma justa. Os textos são atualizados regularmente para garantir que são coerentes com os conhecimentos científicos atuais e relevantes, sendo alguns gerais e outros muito específicos (53).

O processo ocorre numa câmara de irradiação isolada por espessas paredes de betão de forma a garantir a segurança do espaço envolvente externo a esta câmara. Para manter os alimentos livres de radioatividade estes são transportados através de sistemas de tapetes rolantes onde passam num campo de radiação, por um determinado período, não existindo nenhum contacto direto com a fonte. No período de exposição à radiação é expectável que os alimentos absorvam uma dose de radiação, entre a mínima requerida e a máxima determinada para cada produto, de forma uniforme (3,19,20). Posteriormente, como qualquer outro processo de conservação de alimentos, os produtos devem ser verificados, rotulados e armazenados, sendo que as suas condições de armazenamento tanto pré quanto pós-irradiação devem ser adequadas para garantir a segurança e conformidade ao longo de todo o processo (17).

4.2.2 Instalações

As instalações de irradiação devem funcionar em conformidade com as normas de segurança definidas pela IAEA e seguir as diretrizes estabelecidas pelo Código de Práticas do *Codex* para o Tratamento de Alimentos por Radiação (21).

A sua estrutura típica inclui uma câmara de irradiação onde os alimentos são tratados (19). Esta é constituída por sistemas de blindagem robustos para proteger os trabalhadores e o meio envolvente, e contém o irradiador, sistema responsável por aplicar a radiação aos alimentos que, por sua vez contém a fonte de radiação (17).

Os irradiadores podem operar de forma contínua ou descontínua. Enquanto nos irradiadores de r-X e de feixes de eletrões a radiação é gerada por máquinas que utilizam eletricidade, podendo ser desligadas a qualquer momento, nos de radiação gama, há emissão contínua a partir do material radiativo. Nestes casos, de forma a interromper a irradiação dos produtos, o material radioativo é armazenado (17,19).

De acordo com o armazenamento da fonte, os irradiadores γ são organizados em diferentes categorias que constam na tabela 1:

Os irradiadores de categoria I e III são irradiadores autónomos, construídos de modo a restringir o acesso humano à câmara de irradiação uma vez que possuem a capacidade de funcionar de forma independente (19). Os da categoria I armazenam a fonte em contentores secos (construídos com materiais sólidos), enquanto os da categoria III a mantêm num ambiente húmido, normalmente uma piscina cheia de água (19,22).

Por outro lado, os irradiadores de categoria II e IV são panorâmicos, onde a radiação é emitida de forma uniforme em todas as direções (19). Nos da categoria II a fonte, quando não está a ser utilizada é movida por controlo remoto para um poço seco, já os da categoria IV, a fonte é submersa numa piscina profunda (19,22).

Tabela 1 – Classificação de irradiadores γ quanto ao armazenamento e design

Tipo de irradiador	Armazenamento	Acesso humano	Uso Ideal
(I) Irradiador autónomo de armazenamento seco	Contentor seco formado por materiais sólidos	Impedido	Instalações menores, laboratórios de pesquisa
(II) Irradiador panorâmico de armazenamento seco	Seco (poço ou contentor com materiais sólidos)	Controlado	Grandes volumes, produtos de formas variadas
(III) Irradiador autónomo de armazenamento húmido	Húmido (piscina cheia de água)	Fisicamente restringido	Instalações de capacidade média, algumas aplicações médicas
(IV) Irradiador panorâmico de armazenamento húmido	Húmido (piscina funda cheia de água)	Controlado	Grandes volumes, produtos irregulares

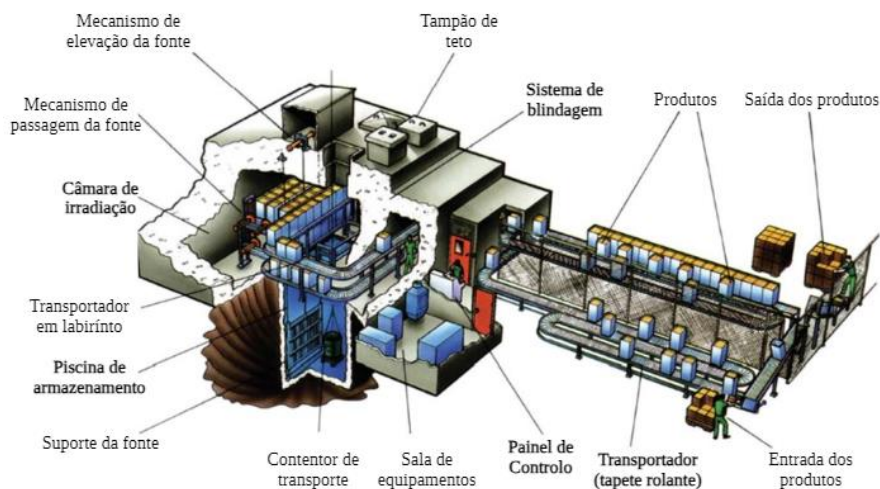


Figura 1 - Diagrama esquemático de uma instalação contendo um irradiador gama do tipo IV. Adaptado de (23)

Relativamente aos irradiadores que utilizam feixes de elétrons e r-X estes são classificados em duas categorias: os da categoria I são integralmente blindados e os da categoria II encontram-se em salas blindadas inacessíveis durante o funcionamento (22).

Além da existência de paredes espessas de betão, para evitar a passagem direta de radiação entre áreas nos irradiadores contínuos, dependendo da energia do feixe aplicado, é concebido um caminho no sistema transportador em forma de labirinto para garantir que qualquer radiação tenha de passar por, pelo menos uma reflexão ou dispersão antes de chegar à próxima área (17,20). Desta forma, o investimento necessário é menor para feixes de baixa energia comparativamente aos feixes de elétrons de alta energia e r-X, uma vez que estes não podem ser construídos em unidades auto-protegidas, pois a proteção exigida para garantir a segurança também é mais robusta e complexa (20).

Apesar de as máquinas de feixes de elétrons serem rápidas, apenas irradiam um produto de cada vez, contrariamente aos irradiadores gama em que, os vários produtos rodeiam a fonte e são irradiados em simultâneo (17,24), como se verifica na figura 2.

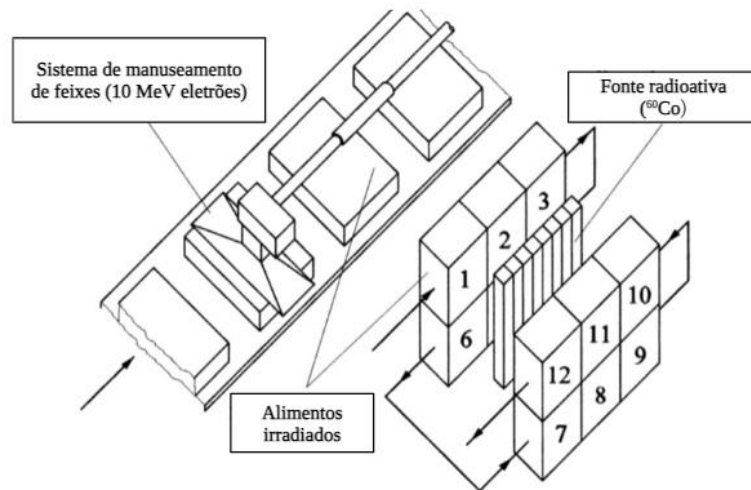
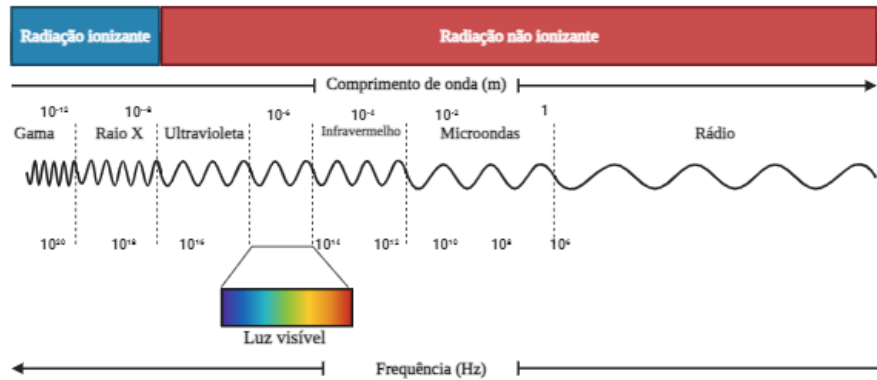


Figura 2 - Esquema do tratamento para feixes de elétrons e radiação gama.
Adaptado de (20)

4.3 Fontes de Irradiação

O espectro eletromagnético contém toda a gama de radiações eletromagnéticas, desde as ondas rádio aos r- γ , englobando as diferentes energias e comprimentos de onda. De acordo com a energia que possuem as radiações podem ser divididas em não ionizantes, onde se inclui a luz visível, radiação ultravioleta, infravermelhos, ondas rádio e micro-ondas, e em ionizantes, onde se inclui os r- γ e os r-X. É importante notar que a radiação ultravioleta, classificada como radiação não ionizante, pode provocar ionização em comprimentos de onda mais curtos (4,25).

Para garantir a segurança alimentar e diminuir a incidência de doenças transmitidas por alimentos, é então utilizada a radiação ionizante como fonte de irradiação. Trata-se de uma forma de energia de elevada intensidade e baixo comprimento de onda, o que lhe confere grande poder penetrante, tendo a capacidade para deslocar elétrons de átomos e moléculas, convertendo-as em iões e até mesmo quebrar ligações químicas, ainda que não com energia suficiente para separar átomos (1,4,5,16).



Created in BioRender.com bio

Figura 3 - Espectro eletromagnético. Criado em BioRender.com

De acordo com a Norma Geral do *Codex Alimentarius* para Alimentos Irrradiados existem 3 principais fontes de radiação ionizante aprovados para uso nos alimentos sendo elas, os r- γ , os r-X com máximo de energia de 5 MeV^2 e feixes de elétrons com máximo de energia de 10 MeV. As suas diferentes características influenciam a sua capacidade em penetrar a matéria, bem como as especificações funcionais a aplicar nos equipamentos em que são utilizados (6).

Enquanto os r-X e os feixes de elétrons (elétrons acelerados) são gerados por máquinas que utilizam eletricidade, podendo ser desligados a qualquer momento, a radiação γ , por sua vez, é produzida a partir do núcleo de átomos, sendo emitida continuamente a partir de material radioativo - radioisótopos. Isto representa uma desvantagem em relação aos outros dois tipos de radiação, pois para conseguir tirar o máximo proveito da fonte, não permite um horário de funcionamento flexível, oferecendo ainda uma menor flexibilidade no ajuste da dose aplicada aos alimentos. Apesar das diferenças em termos de produção, os r-X e os r- γ , do ponto de vista físico são iguais (26). Possuem a mesma capacidade de penetração, permitindo uma melhor uniformização da distribuição da dose nos produtos. Esta capacidade é superior à dos feixes de elétrons que, por se tratar de partículas carregadas, ao interagirem com o composto, dissipam a sua energia de forma rápida, tendo como consequência um baixo

² 1 Megaelectrão Volt = $1,60217646 \times 10^{-13} \text{ J}$

poder de penetração (18). É por isso necessário uma dose muito superior de feixes de elétrons para atingir o mesmo nível de penetração dos r-X e r- γ , o que é uma desvantagem (17,18).

A sua escolha vai depender de critérios como a disponibilidade da fonte, o tamanho e densidade do produto e níveis de dose e temperatura que podem ser aplicados (20).

Tabela 2 - Comparação de parâmetros das fontes de irradiação

	Raios γ	Raios X	Feixe de elétrons
Fonte de irradiação	Fontes radioativas ^{60}Co e ^{137}Ce	Máquinas de r-X	Acelerador de elétrons
Emissão da radiação (operação)	Contínua	Descontínua (pode ser desligada)	Descontínua (pode ser desligada)
Partículas (carga)	Fotão (não carregada)	Fotão (não carregada)	Carga negativa (-1)
Penetrabilidade	Muito alta	Alta	Baixa
Homogeneidade	Alta	Alta	Baixa
Taxa de dose	Baixa	Alta	Mais alta
Custo equipamento	Muito elevado	Elevado	Baixo
Impacto ambiental	Contaminação radioativa muito elevada	Contaminação radioativa elevada	Seguro
Aplicações	Tratamento a granel de grandes caixas ou produtos	Tratamento a granel de grandes caixas ou produtos	Tratamento sequencial de produtos em embalagens

paletizados em contentores de transporte	paletizados em contentores de transporte	primárias/secundárias (<i>in-line</i> ou <i>at-line</i>)
------------------------------------------------	------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------

4.3.1 Raios gama (r- γ)

Os r- γ representam a emissão eletromagnética emitida a partir de núcleos de átomos (instáveis) num estado energético excitado, designados como radionuclídeos, como parte integral de um processo onde os núcleos sofrem rearranjos que os conduzem para um nível energético fundamental (4,5).

A radiação gama é a radiação eletromagnética com maior energia (de fóton) (4). Os r- γ , emitidos por decaimento radioativo, apresentam uma penetração mais extensa na matéria, quando comparados com as partículas α e β , e produzem ionização (disrupção dos eletrões) no seu percurso (5).

Os r- γ são emitidos pelo decaimento de radioisótopos como o ^{60}Co e o ^{137}Ce . Estes emitem fótons praticamente monoenergéticos, sendo que o ^{60}Co emite dois fótons simultaneamente com energias de 1,17 MeV e 1,33 MeV, ao passo que o ^{137}Ce apenas emite um fóton a 0,662 MeV (19). Outra característica diferenciadora entre estes dois radioisótopos é a sua solubilidade em água. O ^{60}Co , um radioisótopo artificial produzido a partir da irradiação de ^{59}Co , um metal estável não radioativo, em reatores nucleares por neutrões rápidos (4,18), é insolúvel em água acabando por ser a escolha preferencial, pois possui um risco de contaminação ambiental inferior ou nulo em contraste com o ^{137}Ce , que é solúvel em água e, além disso possui um custo mais elevado (4,5). A principal desvantagem do ^{60}Co , é o seu tempo de semi-vida ($t_{1/2}$). A sua radioatividade diminui para metade a cada 5,27 anos exigindo um reabastecimento dos irradiadores mais frequente, em contraste com o ^{137}Ce , que possui um $t_{1/2}$ significativamente superior de, aproximadamente 30,17 anos (18).

Estas fontes radioativas, quando não estão a ser utilizadas, são, na sua maioria, armazenadas debaixo de água. A barreira formada pela água previne a exposição ao reter a energia permitindo o livre acesso para manutenção do equipamento (3,18,19).

4.3.2 Raios X (r-X)

Os r-X, uma forma de radiação eletromagnética, são emitidos por elétrons da esfera eletrónica, sendo similares à luz visível, mas apresentando um comprimento de onda muito menor (aproximadamente entre 0,02 e 10 nm), e valores muito maiores de energia (aproximadamente entre 100 e 100 keV) (7). Os r-X apresentam uma elevada capacidade de penetração na matéria porque, à semelhança dos r- γ , são fótons e interagem de forma similar com a matéria (17).

Os r-X são produzidos, a partir de fontes mecânicas, em máquinas onde os elétrons são acelerados em direção ao alvo metálico, de elevado número atómico, normalmente tungsténio ou ouro, por aplicação de diferença de potencial elétrico (7,16,27). Quando estes elétrons colidem com o alvo, ao atravessarem o seu núcleo, desaceleram na matéria, sendo uma fração convertida em r-X e a restante energia dissipada sob a forma de calor (1); este processo denomina-se radiação de Bremsstrahlung ou “radiação de travagem” (16).

Apesar das máquinas produtoras de r-X possuírem um elevado custo (3) e dependerem de um fornecimento contínuo de eletricidade bem como de componentes que se podem deteriorar (13), elas permitem um melhor controlo e tratamento mais eficiente em larga escala (3). Além disso, o facto de não terem uma fonte radioativa representa uma vantagem em relação aos r- γ , uma vez que, ao não produzirem resíduos radioativos promovem uma melhor aceitação por parte dos consumidores bem como um risco de poluição ambiental menor (4).

Desta forma, sendo plenamente qualificados para atravessar materiais densos, entre 30 a 40cm, são utilizados, na maioria dos casos, no processamento de produtos acondicionados em caixas e, embora possuam menor poder penetrante que os r- γ , num nível de energia de igual ou inferior a 5 MeV, conseguem atingir um poder de penetração semelhante à do ^{60}Co para a irradiação dos alimentos (4).

4.3.3 Feixe de elétrons

O feixe de elétrons é uma corrente de elétrons de elevada energia acelerados. Estes feixes são produzidos por aceleradores de elétrons, dispositivos constituídos por uma fonte de elétrons, um tubo acelerador e um sistema de formação de feixe (3,18).

De uma forma geral, a fonte de elétrons consiste num tubo de tungsténio que é eletricamente excitado num ambiente de vácuo resultando na libertação de elétrons. Posteriormente, os elétrons são acelerados através de uma diferença de potencial elétrico que os molda a fim de se produzir um feixe dirigido para o alvo (18).

Tal como os r-X, não necessitam de uma fonte radioativa podendo ser suspensos a qualquer altura, constituindo uma alternativa de baixo custo para os mesmos. Contudo, os feixes de elétrons têm baixa capacidade para atravessar materiais densos, estando a sua eficácia limitada a produtos de densidade reduzida e homogéneos, apesar de poder ser utilizada em todo o tipo de alimentos (3,7,27). São utilizados em irradiação de alto fluxo e alta dose (3,27).

4.4 Níveis de Dose e Aplicações

A quantidade de energia de radiação ionizante que é absorvida por uma substância durante a sua exposição a uma área de radiação é designada por dose de radiação. Para assegurar a eficácia e a segurança do processo de irradiação dos alimentos é fundamental determinar com precisão esta dose, que, conforme as características dos alimentos, bem como o efeito que se pretende, pode variar (18,28).

A dosimetria, isto é, a medição da dose absorvida, é essencial para garantir que os alimentos recebem a dose correta de radiação e que a mesma se encontra dentro dos limites especificados de segurança e eficácia (24). Esses limites incluem uma dose mínima, baseada em estudos e a partir da qual se garante o efeito desejado, e uma dose máxima que não deve comprometer a segurança e qualidade do produto; geralmente, para os alimentos, não deve exceder os 10kGy, salvo exceções (15). Desta forma, conhecer a distribuição da dose no alimento irradiado é fundamental para garantir que os valores são cumpridos (29). Para isso, existe um sistema dosimétrico corretamente calibrado nos irradiadores (20).

A dose de irradiação é medida em grays (Gy), medida do Sistema Internacional de Unidades (SI) que corresponde a 1 joule (J) de energia absorvida por quilograma de matéria. Quando se trata do processo de irradiação de alimentos, trabalha-se na ordem dos kilograys (kGy), sendo que 1 kGy corresponde a 1000 Gy (8,28).

A quantidade de dose de irradiação aplicada é categorizada em 3 níveis distintos: doses baixas (0 a 1 kGy), doses médias (1 a 10 kGy) e doses elevadas (>10 kGy). Para além de organizados de acordo com a quantidade de radiação aplicada são

classificados de acordo com objetivo que se pretende alcançar; radurização, radicação e radapertização são os termos que combinam a quantidade de dose de irradiação com os objetivos de prolongar a vida útil, eliminar patógenos, ou esterilizar alimentos, respetivamente (3,4). A radicação e a radurização são usados para referir aplicações menores que 10 kGy, enquanto a radapertização é para aplicações de doses elevadas (>10 kGy) (18):

- **Radurização (Radurization):** implica o aumento da vida útil dos alimentos (3); utiliza geralmente doses baixas, que sejam suficientes para inibir a germinação em tubérculos (batatas, cebolas; alhos; gengibre), retardar o amadurecimento de frutos - especialmente para aqueles que continuam a amadurecer após a colheita, e desinfestação de insetos, larvas em cereais, leguminosas e frutos frescos e secos bem como parasitas nocivos presentes na carne e peixe (4).
- **Radicação (Radication):** sugere a redução e/ou eliminação de microrganismos patogénicos presentes nos alimentos; utiliza doses moderadas (médias) que prolonguem o prazo de validade através da diminuição significativa, para um nível não detetável, de microrganismos formadores de esporos, leveduras e bolores (3). É aplicado a carnes, aves, frutos do mar e algumas frutas e legumes (24).
- **Radapertização (Radappertization):** implica a esterilização completa dos alimentos aplicando doses elevadas em analogia ao processo de Appert³, ocorrendo uma diminuição drástica na quantidade e/ou na atividade de todos os microrganismos viáveis (exceto vírus), sendo muito poucos os que são detetáveis por qualquer método de reconhecimento (18). Contudo que a embalagem permanece intacta, independentemente do tempo ou das condições de armazenamento, nenhuma degradação ou toxicidade microbiana deve ser encontrada num alimento tratado sob estas condições (30). É aplicada particularmente em alimentos que necessitam de uma longa vida útil como provisões para viagens espaciais e dietas hospitalares para pacientes com imunodeficiência pois garante que os produtos sejam estéreis e possam ser

³ Nicolas Appert: cientista francês que inventou o método de conservação de alimentos em recipientes hermeticamente fechados – esterilização térmica de produtos alimentares (18)

armazenados por longos períodos (31). É também um substituto do óxido de etileno para a esterilização de especiarias e ervas secas (4).

Escolher a dose adequada de irradiação é crucial para equilibrar a segurança microbiológica e a qualidade dos alimentos, maximizando os benefícios e minimizando os impactos negativos, de forma a garantir que os alimentos irradiados mantenham as suas propriedades nutricionais e sensoriais, e melhor aceitação por parte dos consumidores (6).

Tabela 3 - Aplicações para irradiação de alimentos (24)

Dose	Objetivo	Alimentos (exemplos)
Baixa (até 1 kGy)	Inibição da germinação	Alho, Batata, Cebola, Gengibre
	Retardo no amadurecimento	Frutas (banana, manga)
	Desinfestação	Cereais, Leguminosas, Frutos secos
	Inativação de parasitas	Carne (porco), Peixe
Média (1-10 kGy)	Prolongamento do prazo de validade	Carnes, frutos do mar, frutas, hortaliças
	Inativação de microrganismos patogénicos	
Alta (>10 kGy)	Esterilização	Dietas hospitalares
		Carne, aves, frutos do mar, ervas, especiarias

4.5 Efeitos da irradiação

Quando expostos a este tipo de radiação, os componentes alimentares juntamente com os microrganismos que possam estar presentes, podem ser diretamente ou indiretamente afetados (26). Diretamente, o feixe de radiação que atravessa os alimentos, ao depositar a sua energia nas moléculas alvo, provoca a perda de eletrões -

excitação e, conseqüentemente quebra as ligações químicas presentes - ionização, induzindo a alteração da molécula (1,18). Indiretamente, o efeito ocorre quando a radiação gera radicais livres e espécies reativas de oxigénio (ROS), a partir de moléculas adjacentes, que, na maioria dos alimentos frescos são principalmente moléculas de água. Dos subprodutos da radiólise da água - $\cdot\text{H}$ (radical de hidrogénio), $\cdot\text{OH}$ (radical hidroxilo), $\cdot\text{HO}_2$ (radical superóxido), H_2O_2 (peróxido de hidrogénio), H_3O^+ (protão hidratado), e^-_{aq} (eletrão hidratado) - os mais reativos são $\cdot\text{OH}$ e H_2O_2 , ambos com alto poder oxidante, provocando danos nas moléculas biológicas próximas do seu local de formação. Como resultado são eficazes na decomposição de substâncias tóxicas e prejudiciais dos alimentos, ajudando a estender a sua validade, bem como a sua qualidade e segurança (5,6,18).

4.5.1 Componentes alimentares

As alterações provocadas pela irradiação, quando comparadas com métodos de conservação alternativos, como aquecimento, congelação ou fermentação, são relativamente menores pois, sendo um processo não térmico permite que as propriedades nutricionais bem como as sensoriais sejam preservadas ao máximo. Outra vantagem é que deixa de depender de métodos químicos, como a utilização de pesticidas para a eliminação de bactérias (2,4,13). Também foi verificado que os radicais livres presentes nos alimentos tratados por este processo são os mesmos que encontrados em métodos como a cozedura e o enlatamento (19).

A irradiação dos alimentos ao utilizar doses baixas e médias (até 10 kGy) mantém a maioria dos macronutrientes - proteínas, lípidos e hidratos de carbono -, micronutrientes - vitaminas e minerais - e, outros componentes vestigiais - aminoácidos, oligoelementos e ácidos gordos essenciais - sem alterações significativas, mantendo as propriedades funcionais, nutricionais e sensoriais dos produtos, e sendo eficaz contra organismos vivos (19,32). No entanto, doses elevadas (>10 kGy) podem provocar alterações físico-químicas, como desnaturação de proteínas, oxidação de lípidos, e degradação de vitaminas, danificando o sabor, cheiro, textura e valor nutricional dos alimentos (6). A escolha da dose deve equilibrar a segurança microbiológica com a preservação da qualidade dos alimentos (6). O impacto da irradiação também varia conforme a composição do alimento e o modo de preparação (6).

Apesar das potenciais alterações nos componentes dos alimentos, a segurança dos alimentos irradiados para consumo humano tem sido amplamente estudada. Diversas pesquisas científicas e avaliações rigorosas demonstraram que a irradiação não apresenta riscos significativos para a saúde. Organizações idóneas, como a OMS, IAEA e a FAO, afirmam que a irradiação é uma técnica segura e eficaz para o tratamento de alimentos, sustentando que os alimentos irradiados são seguros para consumo, desde que o processo seja realizado de acordo com as diretrizes estabelecidas (19,33).

A irradiação é geralmente vista como a que causa menor impacto nas propriedades dos alimentos entre os diversos processos não térmicos (4).

4.5.1.1 Proteínas

As proteínas, componentes fundamentais dos alimentos a nível nutricional e funcional, são compostas por aminoácidos ligados entre si através de ligações peptídicas, apresentando diferentes níveis estruturais: estrutura primária (sequência linear de aminoácidos), secundária (hélices α e folhas β), terciária (configuração tridimensional) e quaternária (associação de múltiplas cadeias polipeptídicas) (34). A integridade dessas estruturas é essencial para a sua função biológica (34).

Quando submetidas à irradiação, essas estruturas, nomeadamente a estrutura primária, secundária ou terciária, podem sofrer modificações que podem alterar suas propriedades funcionais e nutritivas (34). Estas alterações podem ter consequências positivas ou negativas (33).

Os efeitos positivos estão relacionados com o facto da maioria das proteínas possuírem uma melhor digestibilidade e absorção pelo corpo humano após a irradiação (2). O processo pode conduzir à desnaturação das proteínas, expondo locais de ligação anteriormente inacessíveis, e/ou quebrar as cadeias polipeptídicas em fragmentos menores. Em ambas as situações, quando controladas, a ação das enzimas digestivas - proteases - é facilitada, resultando numa digestão mais eficiente (33). A irradiação tem ainda a capacidade para inativar anti nutrientes presentes nos alimentos, como é o caso do ácido fítico presente em feijões (35) e para desativar inibidores de enzimas digestivas, como os inibidores de tripsina encontrados em leguminosas (36).

Por outro lado, quando se utilizam doses elevadas podem surgir efeitos negativos. A exposição à irradiação induz a formação de radicais livres, que, provocam

de reações nas proteínas, podendo alterar a sua estrutura espacial e agregação (2). Pode ocorrer uma desnaturação excessiva, onde as proteínas perdem a sua estrutura tridimensional, culminando na perda da sua atividade biológica (33). Contudo, quando comparado com um processo térmico essa desnaturação não é tão intensa (32). Além disso, as modificações estruturais nas proteínas podem alterar as suas propriedades funcionais, como a solubilidade, a sua capacidade de gelificação, emulsificação e formação de espuma, bem como a sua reatividade imunológica, ao modificar os seus epitopos, representando um risco para pessoas com alergias alimentares (37).

Assim, ao afetar as proteínas, a irradiação pode ter um impacto negativo na qualidade e na aplicação tecnológica dos alimentos. No entanto, é importante realçar que as mesmas só ocorrem utilizando doses elevadas de irradiação (34).

4.5.1.2 Lípidos

Os lípidos desempenham um papel importante no desenvolvimento do aroma e sabor dos alimentos além de influenciam a textura e a sensação na boca, o que impacta diretamente a aceitação/experiência por parte dos consumidores (38).

A irradiação, em doses elevadas, tem um impacto negativo nos lípidos, influenciando a sua estabilidade e integridade (2). A radiólise lipídica e a formação de radicais livres após a irradiação que, ao causarem stress oxidativo, levam à oxidação dos lípidos, são os mecanismos responsáveis por este impacto (2,33). Os ácidos gordos insaturados são os mais inteligíveis a oxidar devido à existência de ligações duplas na sua estrutura. Ao oxidarem há um aumento da presença de ácidos gordos saturados nos alimentos (2,6).

A oxidação dos lípidos resulta num decréscimo da qualidade nutricional devido à perda de ácidos gordos essenciais bem como de vitaminas lipossolúveis (33) e, no desenvolvimento de sabores e odores desagradáveis - rancidez (6). Isto deve-se ao facto de ocorrer a formação de radicais peroxilo que, posteriormente, dão origem a compostos secundários voláteis que induzem essas características aos alimentos (33). Estas consequências podem ser diminuídas através da realização da irradiação a baixa temperaturas ou pela ausência de oxigénio antes da irradiação (6).

A irradiação, em alimentos ricos em lípidos, leva à formação de compostos químicos 2-alquilciclobutanonas (2-ABC). Estes compostos são marcadores exclusivos e fiáveis da irradiação deste tipo de alimentos uma vez que não são encontrados noutra

tipo de alimentos. Desta forma, são úteis para a detecção deste tipo de alimentos em casos em que não foram devidamente rotulados (6,39). Embora estes compostos possam ser formados durante o processo de irradiação, é em quantidades muito pequenas o que faz com que não representem um perigo significativo à saúde (40). Contudo, são necessários mais estudos para compreender totalmente o seu impacto na saúde humana, pois podem ter algum tipo de atividade biológica, embora as evidências atuais não sejam conclusivas quanto aos riscos potenciais (41).

4.5.1.3 Hidratos de Carbono

As propriedades estruturais dos hidratos de carbono, utilizando doses elevadas de irradiação podem ser afetadas (6), resultando na quebra de polissacarídeos, como é o caso do amido e da celulose, em moléculas menores, afetando as propriedades físico-químicas e funcionais dos alimentos que os contêm (2).

A irradiação pode induzir a formação de compostos, como ácidos, aldeídos, e cetonas que podem ser prejudiciais à saúde humana (2).

Sendo o amido o hidrato de carbono mais importante nos alimentos, vários estudos têm sido realizados para verificar o que ocorre após a irradiação. Foi detetado um aumento na solubilidade do amido, na capacidade de retenção de água e uma diminuição na sua viscosidade (13,42).

4.5.1.4 Vitaminas

As vitaminas são micronutrientes essenciais para o normal funcionamento do corpo humano, desempenhando diversas funções biológicas. Como não são produzidas em quantidades suficientes ou não de todo sintetizadas pelo organismo, devem ser obtidas através da alimentação (43).

São classificadas em dois grandes grupos principais: hidrossolúveis (vitaminas do complexo B e vitamina C) e lipossolúveis (vitaminas A, D, E e K) (43).

É de realçar que as vitaminas podem ser suscetíveis a qualquer método de processamento alimentar (44), degradando-se rapidamente quando expostas a fatores como temperatura, luz, oxigénio e pH elevado da água (33).

Em comparação com outros componentes dos alimentos, como as proteínas, lípidos ou hidratos de carbono são relativamente mais sensíveis à irradiação (11). Os efeitos da irradiação nestas variam de acordo com o tipo de vitamina, a dose aplicada,

as condições em que o processo é realizado bem como a presença de outros constituintes dos alimentos (33).

Entre as vitaminas lipossolúveis, as vitaminas D e K são as mais estáveis à irradiação. Já as hidrossolúveis são mais sensíveis, principalmente a vitamina C e a vitamina B1 - tiamina (44). As ROS produzidos pela irradiação são as principais responsáveis pelos danos nestas vitaminas (33). Desta forma, ausência de oxigênio pode ser uma estratégia eficaz para minimizar esses danos (44).

As doses de irradiação aplicadas às principais fontes destas vitaminas mostraram ter um impacto muito reduzido no estado nutricional da população (44).

4.5.2 Microrganismos

A radiação provoca quebras na estrutura do ácido desoxirribonucleico (ADN) dos microrganismos, comprometendo a capacidade de replicação e reparação celular, como também leva à desnaturação de proteínas e enzimas da membrana celular, afetando funções como transporte de nutrientes e a sinalização celular (6). Além disso, ioniza as moléculas de água dentro das células originando radicais livres altamente reativos, que danificam outras moléculas e promovem a oxidação intracelular. Esses efeitos combinados resultam em disfunção metabólica severa, lesão e morte celular.

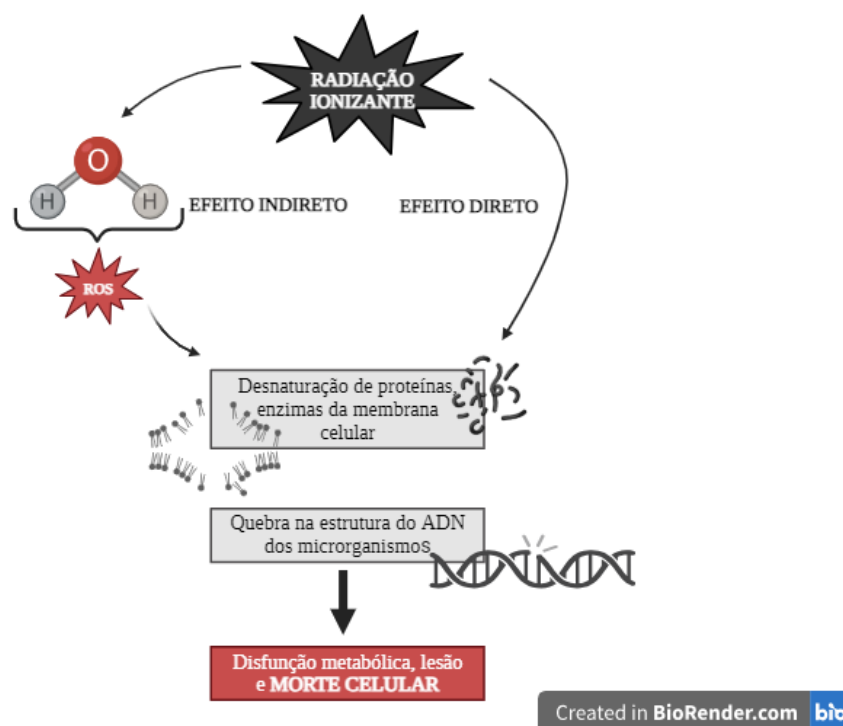


Figura 4 - Efeito da radiação ionizante nos microrganismos.
Criado em BioRender.com

Diferentes tipos, espécies e até estirpes de microrganismos possuem capacidades distintas de resistência ao processo de irradiação. Essa variação é determinada pelas suas propriedades estruturais, como a espessura da parede celular e a presença de poros, pelo seu tamanho, composição do material genético, fase de crescimento, nível de stress e ainda da sua capacidade de reparar os danos provocados pela radiação. Assim, o conhecimento do tipo de microrganismos presentes bem como a carga microbiana inicial são fatores essenciais para a eficácia da descontaminação (19,45).

A resposta dos microrganismos à radiação é expressa, em Grays (Gy), pela Dose de Redução Decimal (DRD ou valor D_{10}) que corresponde à dose necessária para reduzir em 90% a sua população total nas condições estabelecidas (19). A presença de microrganismos concorrentes afeta os valores de DRD sendo que o stress competitivo pode aumentar a sensibilidade à radiação, mas a adaptação a condições adversas pode resultar numa maior radioresistência (18). Geralmente, quanto mais complexo e organizado for o composto, menor será a sua sensibilidade à radiação, o que se traduz num valor de DRD mais alto (18).

Devido ao tamanho mais pequeno do genoma e ao RNA de cadeia simples que possuem, esta técnica não é tão eficaz contra vírus, sendo estes os microrganismos que mais resistência oferecem à radiação (16). Estes são seguidos por esporos bacterianos e fúngicos, enquanto os mais sensíveis incluem parasitas e meristemas vegetais (18).



Figura 5 - Intervalo de doses letais para diferentes alvos de tratamento biológico. Adaptado de (45)

Os vírus, em geral, são bastante resistentes à irradiação, apresentando uma relação inversa entre o tamanho do seu genoma e a sensibilidade à radiação, embora possam existir exceções. A remoção eficaz de vírus por meio deste método só é possível com doses superiores aos níveis de segurança estabelecidos para alimentos. Por isso, é

necessário combiná-la com outras técnicas, como congelamento ou tratamento térmico (18).

Dentro das bactérias, as gram-negativas são as que revelam maior sensibilidade à irradiação, uma vez que na estrutura da sua parede celular possuem uma camada de peptidoglicano muito fina quando comparadas com as gram-positivas (45). A forma da bactéria também influencia o processo sendo que, utilizando a mesma dose de radiação, os bastonetes são menos tolerantes que os cocos (45).

Em geral as bactérias formadoras de esporos são mais resistentes à radiação que as vegetativas devido ao seu citoplasma pouco hidratado (18). No entanto, existem bactérias não formadoras de esporos como as bactérias pertencentes à família *Deinococcaceae*, por exemplo *Deinococcus radiodurans*, que são capazes de sobreviver ao efeito nocivo da radiação ionizante de 10 kGy (7). Isto ocorre porque estas bactérias, além de terem proteínas de reparação do ADN, contam com mecanismos que protegem as suas proteínas contra danos oxidativos, devido às concentrações mais elevadas de íons manganês (Mn^{2+}) que apresentam em comparação com bactérias sensíveis à radiação, como a *E. coli* (7). Estes íons vão funcionar como antioxidantes, reforçando a defesa contra o stress oxidativo ao protegerem as proteínas da carbonilação induzida pela radiação, o que mantém a atividade celular, mesmo quando o ADN é fragmentado (7).

A sua sensibilidade também depende da fase de crescimento em que se encontram. Normalmente, as células bacterianas em fase de crescimento exponencial são as mais vulneráveis à radiação ionizante comparativamente com aquelas que se encontram em fase estacionária. Isto ocorre porque, durante a fase estacionária muitos genes - genes do fator sigma - essenciais para a sobrevivência em condições adversas, como a falta de nutrientes, são ativados. Esses genes ajudam a proteger a célula contra diferentes tipos de stress como é o caso da radiação (6). Contudo, estudos sobre a resistência à radiação de *D. radiodurans* em diferentes fases de crescimento indicaram que células em fase estacionária tardia são mais sensíveis à irradiação do que as células em fase exponencial ou fase estacionária inicial (7). Nestas bactérias, o gene RpoS que codifica o fator sigma da fase estacionária não forma detetados (6).

É importante destacar que as toxinas bacterianas apresentam elevada resistência à radiação. Portanto, quando essas toxinas já estão presentes no alimento, os métodos de irradiação comuns não as conseguem eliminar (18).

Relativamente aos fungos, estes, em geral, possuem uma sensibilidade à radiação semelhante à das bactérias não formadoras de esporos (18). Dentro destes, os fungos negros, destacam-se por serem mais resistentes à radiação ionizante devido ao seu elevado teor de melanina (7). A melanina atua como uma barreira protetora contra a radiação e possui a capacidade de neutralizar as espécies reativas de oxigênio geradas pela exposição à radiação (7).

A irradiação também pode ser usada para decompor toxinas produzidas por fungos. Contudo, nalguns casos, doses subletais de radiação podem ter o efeito oposto: estimular o crescimento de certos fungos e aumentar a produção de micotoxinas. Desta forma, é aconselhável combinar diferentes métodos, como a lavagem de alimentos em água quente (50°C) para inativar eficazmente essas toxinas (18).

4.6 Fatores que influenciam o processo

Os efeitos da irradiação nos alimentos são influenciados por diversos fatores, incluindo a composição química dos alimentos (quantidade de água), o seu estado físico (fresco ou congelado), o tipo, o tempo e a dose de radiação ionizante utilizada e absorvida, fatores ambientais (temperatura, oxigênio, humidade, pH), composição do meio envolvente, características dos microrganismos (espécie, quantidade), e o tipo de material de acondicionamento (4,18,19,45).

Os alimentos possuem diferentes teores de água. Naqueles em que existe uma maior atividade da água são apenas necessárias doses de radiação ionizante mais baixas pois, uma maior humidade potencializa os efeitos adversos da irradiação contra os microrganismos e provoca mais danos indiretos no ADN devido a uma maior produção de radicais livres (4,18).

Em relação ao estado físico, os microrganismos são mais resistentes em alimentos congelados do que em alimentos no estado fresco. Isto ocorre porque, no estado congelado os radicais livres produzidos pela irradiação não se conseguem difundir adequadamente, o que impede que causem danos nas moléculas de ADN dos microrganismos (8,18). Recomenda-se o tratamento de produtos congelados utilizando doses elevadas de radiação porque os efeitos negativos, como o aparecimento de

sabores desagradáveis, mudanças de textura e cor, são menos acentuados em comparação ao tratamento realizado à temperatura ambiente (18).

Por outro lado, a temperaturas mais elevadas o efeito da irradiação é potencializado. Geralmente, acima de 45°C, os sistemas de reparação de danos dos microrganismos encontram-se danificados, não sendo capazes de exercer a sua função o que torna os microrganismos menos tolerantes à radiação (8,45).

A presença de oxigénio também potencia o efeito da irradiação (8). No entanto, se estivermos na ausência de oxigénio, mas simultaneamente num ambiente húmido, a suscetibilidade dos microrganismos à radiação pode aumentar 2 a 4 vezes, pois a humidade ajuda a manter alguma vulnerabilidade. Já em ambientes secos, os microrganismos tornam-se muito mais resistentes à radiação (5).

Para estabelecer a dose de radiação necessária, é determinante a composição do meio que envolve os microrganismos (8). Quanto mais simplificado for o meio, menor será a competição entre os componentes do meio e as moléculas ativadas através da radiação pelos radicais livres formados a partir da água, o que resulta numa menor proteção para os microrganismos (4). Além disso, também é importante ter em conta a seleção do método de cultivo - seletivo, semi-seletivo, não seletivo - bem como o tempo decorrido entre a irradiação e a contagem de microrganismos (18). É difícil prever em quais alimentos certas células bacterianas serão mais ou menos suscetíveis à radiação (5).

Para um processo de irradiação eficaz, embalagens adequadas, que resistam à radiação e protejam contra a oxidação, são essenciais (18). Quando se utiliza como fonte de radiação os feixes de eletrões, normalmente, os alimentos são irradiados antes do acondicionamento, devido ao facto de esta fonte ter uma capacidade penetrante reduzida. O mesmo não ocorre com os r-X ou r- γ que são eficazes na penetração de materiais mais densos (18).

A radiação ionizante pode ser combinada com outros processos físicos ou químicos o que garante maior segurança dos alimentos (18). Esta combinação pode ser aplicada em casos onde doses elevadas de irradiação podem comprometer as características de qualidade (46). Noutros casos, pode ser combinado com tratamento por calor porque não existe uma associação direta entre a resistência ao calor e a resistência à radiação ionizante. Por exemplo, a *Moraxella sp.* possui elevada

resistência à radiação, mas é facilmente eliminada pelo calor. Em contraste, o *Bacillus stearothermophilus*, que é altamente resistente ao calor, é muito mais vulnerável à radiação ionizante (18).

4.7 Qualidade e Segurança

A qualidade dos alimentos irradiados pode ser avaliada através de uma análise multidisciplinar, envolvendo aspetos químicos, nutricionais, microbiológicos e toxicológicos (1). Essa abordagem assegura que os alimentos irradiados permanecem seguros, nutritivos e aceitáveis para o consumo humano (3).

A contaminação microbiana, uma preocupação em várias etapas da cadeia de produção e processamento dos alimentos, exige um controlo rigoroso para garantir a qualidade e a segurança alimentar (19). A irradiação tem sido amplamente aceite como um método eficaz na eliminação de microrganismos patogénicos e de substâncias nocivas como aminas biogénicas e fatores anti nutricionais (47), sem comprometer significativamente o valor nutricional e os aspetos sensoriais como cor, sabor e textura dos alimentos, que, contudo, podem ser afetados em doses mais elevadas (47).

Para uma avaliação abrangente da qualidade e segurança dos alimentos irradiados, é essencial compará-los com alimentos tratados por outros métodos de conservação (3). A irradiação, sendo um método não térmico, provoca alterações químicas e nutricionais mínimas, especialmente quando se utilizam doses baixas (1). Além disso, os produtos decorrentes da degradação radiolítica formados ocorrem em concentrações similares às observadas noutros métodos, como o processamento térmico ou enlatamento (19). Entre as técnicas de conservação não térmicas, a irradiação é geralmente considerada como a que provoca menos alterações nas características dos alimentos (4).

Este processo foi aceite por organizações como a OMS, FAO e IAEA que reconhecem a irradiação como uma tecnologia segura e eficaz para a segurança alimentar (19). Em 1981, a CAC estabeleceu 10 kGy como limite superior de dose considerado seguro para a irradiação. Um grupo de estudo conjunto FAO/IAEA/OMS sobre Irradiação de Altas Doses (JSGHDI - *Joint FAO/IAEA/WHO Study Group on High-Dose Irradiation*) formado em 1997 concluiu que alimentos irradiados com doses acima de 10 kGy eram seguros e nutricionalmente adequados, desde que permaneçam

palatáveis, mesmo que possam perder qualidade sensorial. Embora essa deterioração não afete a segurança dos alimentos, pode comprometer a sua aceitação comercial (12). Em 1999, o mesmo grupo afirmou que a irradiação de alimentos em qualquer dose necessária para alcançar o efeito tecnológico pretendido também era segura e não representava riscos significativos à saúde humana (40). Em 2003, foi sugerida a eliminação do limite de dose máxima, mas a mesma não foi aceita pela CAC por razões de segurança (48), reforçando que cada alimento deve ser avaliado individualmente (41).

A Autoridade Europeia para a Segurança dos Alimentos (EFSA) declarou em 2011 que a irradiação dos alimentos é segura, não apresentando riscos microbiológicos para os consumidores e que forma substâncias químicas semelhantes às geradas por outros métodos de conservação, em quantidades não superiores (49).

Embora haja consenso sobre a segurança da irradiação e as análises químicas não tenham identificado nenhum composto suscetível de colocar em perigo a saúde dos consumidores, algumas preocupações permanecem em relação aos efeitos a longo prazo do seu consumo, especialmente naqueles tratados com doses muito elevadas (1). Testes de segurança alimentar têm sido realizados em humanos e animais (1), e alguns estudos em animais indicaram que os alimentos irradiados podem causar alterações cromossômicas reversíveis, mas, se consumidos por longos períodos, podem aumentar o risco de oncogênese, necessitando, contudo de mais pesquisas para confirmar esse efeito em humanos (49).

Os dados científicos disponíveis apontam que os alimentos irradiados, quando submetidos a doses adequadas, são seguros para o consumo humano e proporcionam uma solução eficiente para a segurança alimentar global (41). O símbolo Radura é a marca dessa qualidade e segurança dos alimentos irradiados (3).

4.8 Benefícios e Limitações

4.8.1 Benefícios

A irradiação dos alimentos, tratando-se de um processo não térmico, pode ser utilizada tanto em alimentos à temperatura ambiente como em congelados (5). O facto de ser um processo a frio (11), em comparação com processos térmicos tradicionais, não aumenta significativamente a temperatura dos alimentos, não induzindo alterações significativas nas propriedades organolépticas dos alimentos (3), nem afetando o

conteúdo nutricional dos mesmos (3). As alterações nutricionais que possam ocorrer são comparáveis a outros métodos de conservação (1). É um processo que necessita apenas de uma pequena quantidade de energia (1).

Apresenta uma elevada flexibilidade podendo ser aplicada em diferentes tipos de alimentos em qualquer estado físico – gasoso, líquido, sólido (8), e também em alimentos acondicionados devido à alta penetrabilidade que possui (8). Isto evita a recontaminação (3) e possibilita que os alimentos possam ser prontamente distribuídos após o tratamento (11). O princípio aplicado é sempre o mesmo, variando apenas as doses de radiação utilizadas (3). É, desta forma, um processo de fácil monitorização (11).

O processo de irradiação é considerado ecológico (2) e seguro para os trabalhadores e consumidores em geral (3), não necessitando da adição de reagentes químicos tóxicos ou compostos voláteis, nem produzindo produtos finais que necessitem de ser eliminados (8). Além disso, não induz qualquer radioatividade nos alimentos (3) e não é um processo dispendioso (2).

A irradiação tem como objetivo prolongar a vida útil dos alimentos, tendo a capacidade de destruir ou inativar microrganismos patogénicos e diminuir de forma eficiente o teor de compostos nocivos (2). Isto traduz-se num risco reduzido de transmissão de doenças pelos alimentos (24).

4.8.2 Limitações

Embora doses baixas e médias não impactem significativamente o conteúdo nutricional dos alimentos, doses superiores a 10 kGy podem degradar nutrientes, especialmente vitaminas, e causar alterações químicas nos alimentos através da radiólise, resultando na decomposição de macromoléculas como hidratos de carbono e na oxidação de lipídios (7), o que altera as propriedades organolépticas dos alimentos, como o odor e o sabor (3).

Sendo eficaz na destruição de grandes quantidades de bactérias (1), o processo pode ser indevidamente utilizado como substituto para boas práticas de fabrico, pois tem a capacidade de tornar vendáveis alimentos que, de outra forma, não seriam aceites (24).

Certas bactérias formadoras de esporos, como *Bacillus* e *Clostridium*, são resistentes à radiação, e doses inferiores a 10 kGy apenas reduzem o número de esporos,

exigindo a combinação com congelamento para evitar seu crescimento (3). Também existe a possibilidade de outros microrganismos desenvolverem resistência à radiação (1).

A irradiação torna-se insuficiente quando, apesar de eliminar as bactérias que produzem toxinas, os alimentos já estão previamente contaminados por essas toxinas (24). Outro exemplo reside no facto de a irradiação eliminar microrganismos responsáveis pela deterioração, mas deixar bactérias patogénicas ilesas, fazendo com que os alimentos pareçam frescos e seguros, mesmo quando podem ser perigosos para consumo (24).

Apesar de não ser um processo dispendioso, as instalações de irradiação e a manutenção dos seus equipamentos possuem custos elevados (24).

Por fim, o receio por parte dos consumidores dos efeitos radioativos (1) devido a falta de conhecimento sobre o processo são uma barreira para a aceitação deste método de conservação, representando uma desvantagem para o sucesso do mesmo (24).

4.9 Acondicionamento e rotulagem de alimentos irradiados

O acondicionamento adequado visa prevenir a contaminação ou infestação após a irradiação, proporcionando uma barreira segura, para que as propriedades nutricionais e sensoriais sejam preservadas (15). Desta forma, devem ser utilizados materiais de qualidade apropriada, resistentes à radiação, que não provoque a difusão de substâncias tóxicas aos alimentos afetando as suas propriedades (3).

É essencial que, tanto os alimentos como as suas embalagens estejam em condições higiénicas aceitáveis bem como em conformidade com as boas práticas de fabrico do processo de radiação, considerando as exigências específicas desta tecnologia para garantir a qualidade e segurança dos alimentos (15).

Os materiais utilizados no acondicionamento de alimentos irradiados podem ser submetidos à radiação antes de entrar em contacto com os alimentos ou, posteriormente, quando já se encontram em contacto com os mesmos. No primeiro caso, o material pode sofrer modificações, como ligações cruzadas, que podem comprometer a sua função de proteção dos alimentos. No segundo caso, pode ocorrer cisão da cadeia do material, resultando na formação de compostos, denominados produtos de radiólise (48), de

baixo peso molecular que se podem difundir para os alimentos (50), podendo afetar as suas propriedades organoléticas bem como a sua segurança (48).

Para garantir a segurança dos materiais utilizados, uma vez que são suscetíveis de degradação e/ou modificação durante a irradiação, é necessária uma avaliação de segurança obrigatória antes de serem autorizados. Nesta avaliação, são analisados quais os produtos de radiólise se podem formar e se há risco da sua transferência para os alimentos. Se os materiais cumprirem com a regulamentação aplicável podem ser utilizados (50).

Os materiais de acondicionamento que podem ser submetidos com segurança ao processo de irradiação, sem que nenhuma radioatividade induzida seja detetável no próprio material, de acordo com, a subparte C da parte 179 do título 21 do Código de Regulamentações Federais (CFR) dos Estados Unidos, publicado pela Food and Drug Administration (FDA), são os constam na tabela 4. Estes materiais podem ser submetidos a uma dose de radiação até 10 kGy, exceto quando especificado de outra forma (30 ou 60 kGy), durante o tratamento por radiação de alimentos pré-embalados utilizando r- γ , r-X e feixes de eletrões (50).

Tabela 4 - Materiais de embalagem listados no título 21 do CFR 179.45 para uso durante a irradiação de alimentos pré-embalados (51)

21 CFR	Material de acondicionamento	Dose máxima (kGy)
Secção 179.45(b)	Celofane revestido com nitrocelulose	10
	Papel glassine	10
	Papel cartão encerado (revestido a cera)	10
	Filme de poliolefnico	10
	Papel Kraft	0,5
	Filme de polietileno tereftalato (polímero básico)	10
	Filme de poliestireno	10

	Filme de cloridrato de borracha	10
	Filme de copolímero de cloreto de vinileno – cloreto de vinilo	10
	Nylon 11 (poliamida 11)	10
Secção 179.45(c)	Filme de copolímero de acetato de vinilo	30
Secção 179.45(d)	Papel vegetal	60
	Filme de polietileno	60
	Nylon 6 (poliamida 6)	60
	Filme de copolímero de cloreto de vinilo e acetato de vinilo	60

Por fim, de forma a dar conhecimento aos consumidores que produtos foram tratados por irradiação, bem como evitar a sua exportação para países que proíbem este processo, estes devem ser rotulados corretamente utilizando símbolos e declarações próprias (3).

Existe um logótipo internacional de irradiação alimentar, “Radura” – figura 6, derivado da palavra radurização que conjuga a palavra “radiação” com “durus”, termo em latim para “duro” ou “duradouro” (4). Este símbolo detém cor verde, exibindo uma planta, que representa os produtos agrícola, dentro de um círculo, onde, o semicírculo inferior é contínuo, mas o semicírculo superior contém quebras representando a radiação ionizante penetrante (3). É utilizado como sinal de qualidade e segurança dos alimentos irradiados (3).

A Norma Geral para Alimentos Irradiados do *Codex Alimentarius* (15), no que toca à rotulagem faz a distinção entre alimentos pré-embalados destinados ao consumo direto e alimentos em contentores a granel (15). Contudo, em ambos os casos os documentos de remessa pertinentes devem fornecer informação que permita identificar a instalação registada que realizou a irradiação do alimento, as datas de tratamento, a dose de irradiação aplicada e a identificação do lote (15).

No caso dos alimentos pré-embalados destinados ao consumo direto, estes têm de estar em conformidade com a Norma Geral para a Rotulagem de Géneros Alimentícios Pré-Embalados, do *Codex Alimentarius* (52). Esta Norma indica que o rótulo destes alimentos deve incluir, imediatamente próximo ao seu nome, uma declaração escrita indicando que o produto foi submetido a este tratamento, não sendo de presença obrigatória o símbolo “Radura”, mas caso se opte pela sua utilização, este deve constar na proximidade imediata do nome do alimento (52).

É importante destacar que a Norma Geral para a Rotulagem de Géneros Alimentícios Pré-Embalados também especifica que, sempre que um produto irradiado for utilizado como ingrediente de outro alimento, essa informação deve ser declarada na lista de ingredientes (21). Além disso, o rótulo do produto deverá conter uma declaração quando um produto de ingrediente único for preparado a partir de uma matéria-prima que tenha sido irradiada (21).

Em relação aos alimentos em contentores a granel, a Norma Geral para Alimentos Irradiados refere que deve estar perfeitamente claro nos documentos de transporte que os alimentos foram submetidos a este processo (15). Se os mesmos forem vendidos a granel ao consumidor final, tal como no caso anterior, o logótipo internacional e as palavras «Irradiado» ou «Tratado com radiação ionizante» devem constar junto do nome do produto no recipiente onde os produtos são inseridos (15).



Figura 6 - Símbolo Radura (52)

5 Legislação

5.1 Internacional

A legislação da irradiação de alimentos é coordenada por várias organizações, com o objetivo de harmonizar normas, proteger a saúde dos consumidores e facilitar o comércio internacional de forma justa (48). Existem normas e regulamentos internacionais que abordam a segurança alimentar e a saúde humana, a dosimetria, o acondicionamento, a rotulagem e a gestão das instalações de irradiação (21,48).

A CAC, criada pela FAO e OMS, é responsável pela emissão, a nível internacional e de forma uniforme, do *Codex Alimentarius* (53). Este integra um conjunto de normas, códigos de práticas, diretrizes e recomendações sobre os alimentos desempenhando um papel fundamental para a segurança alimentar e saúde humana (48).

Em 1983 e, posteriormente revista em 2003, foi criada a Norma Geral do *Codex Alimentarius* para Alimentos Irrradiados (15). Estabelece padrões internacionais para o uso seguro da radiação ionizante em alimentos, definindo as fontes de radiação permitidas, os limites de dose mínima e máxima, e as práticas de higiene e o controlo de processos necessários para garantir que a irradiação não comprometa a segurança ou a qualidade dos alimentos (21). Aborda ainda a re-irradiação e a verificação pós-irradiação, servindo como referência global para regulamentações nacionais e facilitando o comércio internacional de alimentos irradiados (21).

Como a dosimetria é fundamental para assegurar que os alimentos recebem a dose correta de radiação, dentro dos limites de segurança e eficácia estabelecidos (24), os aparelhos que fazem a sua medição, dosímetros (48), devem estar devidamente calibrados e em conformidade com normas estabelecidas (21). Normas internacionais como as da IAEA e da Internacional Organization Standardization/American Society for Testing and Materials (ISO/ASTM) espelham as boas práticas de dosimetria (21).

Para o acondicionamento e, uma vez que os materiais utilizados são suscetíveis de degradação e/ou modificação durante a irradiação (50), devem ser utilizados materiais que mantenham as suas propriedades e não transfiram materiais tóxicos para os alimentos durante ou após o processo, garantindo assim a segurança dos alimentos (21). Desta forma, é necessária uma avaliação de segurança obrigatória antes de serem

autorizados (50). Nos Estados Unidos da América (EUA), a subparte C da parte 179 do título 21 do Código de Regulamentações Federais dos Estados Unidos, publicado pela FDA, é a legislação que define as normas que os materiais de embalagem utilizados nos alimentos irradiados devem seguir para manter a segurança e qualidade dos alimentos, protegendo a saúde dos consumidores (48). Outros países podem adotar ou formular as próprias normas com base nos regulamentos da FDA (21).

Relativamente à rotulagem, a sua regulamentação pode variar bastante de país para país (21). A CAC publicou uma Norma Geral para a Rotulagem de Géneros Alimentares Pré-embalados (52) que indica que o rótulo destes alimentos deve incluir, imediatamente próximo ao seu nome «Tratado por irradiação» ou «Tratado com radiação ionizante» (48), não sendo de presença obrigatória o símbolo “Radura”, mas caso se opte pela sua utilização, também deve estar na proximidade imediata do nome do alimento (21). Sempre que um produto irradiado for utilizado noutra alimento deverá ser indicado na lista de ingredientes, mesmo que seja um ingrediente que não conta no rótulo (48). Caso um produto de ingrediente único for preparado a partir de uma matéria-prima irradiada o rótulo do produto deverá indicar isso (21). Contudo, por exemplo nos EUA, apesar da FDA exigir que os alimentos sejam rotulados com o símbolo “Radura” e descritos como «Tratados com radiação ionizante» ou «Tratados por irradiação», ingredientes irradiados utilizados em alimentos não requerem rotulagem especial (13), a menos que o alimento tenha sido irradiado na sua totalidade (48). A FDA indica ainda que alimentos irradiados devem ser rotulados da mesma forma, tanto a nível grossista como a retalho, com a declaração «Não voltar a irradiar» no transporte e na documentação; não exige a rotulagem para alimentos irradiados servidos em estabelecimentos de restauração (48).

Por último, no que toca à gestão e funcionamento das instalações de irradiação para o tratamento de alimentos, estas são orientadas pelas normas implementadas pela IAEA (21) e pelo Código Internacional de Práticas recomendadas pela CAC (54). A fim de assegurar a harmonização internacional, a norma ISO 14470:2011 destaca-se como principal referência para a irradiação dos alimentos, definindo os requisitos para o desenvolvimento, validação e controlo da rotina do processo (54). A gestão da qualidade nestas instalações foi formalmente reconhecida através da norma ISO 9001:2008 (21). Os operadores das instalações podem recorrer ao Manual de Boas Práticas para Irradiação de Alimentos ainda que não seja uma norma global (21).

5.2 União Europeia

Na União Europeia, a irradiação de alimentos é regulamentada principalmente pelas Diretivas 1999/2/CE e 1999/3/CE (55).

A Diretiva 1999/2/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 22 de fevereiro de 1999 estabelece as condições gerais para a utilização da radiação ionizante em produtos alimentares e dos seus ingredientes, harmonizando as legislações dos Estados-Membros (EM) da UE (56). Aborda o fabrico, especificando que a irradiação só pode ser realizada em instalações autorizadas e licenciadas, que devem cumprir requisitos rigorosos de segurança, a comercialização e importação, os tipos de fontes permitidas, as condições necessárias para autorizar o processo, a dosimetria bem como a mesma deverá ser calculada, e exige rotulagem clara alinhando-se com as diretrizes do *Codex Alimentarius* (21).

Cada EM é responsável por garantir o cumprimento das normas, incluindo a inspeção das instalações de irradiação, devendo transmitir os resultados das verificações realizadas e a verificação da conformidade dos produtos (13).

Esta diretiva é complementada pela Diretiva 1999/3/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 22 de fevereiro de 1999, fornece informações sobre os alimentos e ingredientes que podem ser sujeitos a radiação ionizante, bem como a dose máxima que pode ser aplicada a esses mesmos alimentos. Somente ervas aromáticas secas, especiarias e condimentos vegetais, sendo o valor máximo de dose global média de radiação absorvida 10 kGy (57).

Contudo países como a Bélgica, França e Países Baixos admitem que outros alimentos possam ser tratados por irradiação (24).

5.2.1 Portugal

Em Portugal, a legislação sobre irradiação de alimentos encontra-se alinhada com as normas da União Europeia, transpondo para a legislação nacional a Diretiva 1999/2/CE e a Diretiva 1999/3/CE, originando o Decreto-Lei n.º337/2001 de 26 de dezembro – em anexo A1 (ANEXO IV do Decreto-Lei (DL) n.º337/2001 que nos indica os géneros alimentícios que podem ser tratados por radiações ionizantes e doses máximas de irradiação) (58).

O Decreto-Lei nº108/2018 de 3 de dezembro, estabelece o regime jurídico da proteção radiológica em Portugal, transpondo para a legislação nacional a Diretiva 2013/59/Euroatom que fixa as normas de segurança relacionadas à exposição a radiações ionizantes. Isso inclui a proteção de trabalhadores, populações e o meio ambiente contra os riscos associados a radiações, além de definir as competências das autoridades responsáveis pela regulação e inspeção (59). Este DL foi alterado pelo Decreto-Lei nº 81/2022, de 6 de dezembro (60), que introduziu ajustes ao regime jurídico da proteção radiológica, principalmente nas regras de incompatibilidades, no regime contraordenacional (sanções administrativas), e na aplicação no espaço, adaptando as normas para acompanhar a evolução das atividades com radiações ionizantes, tanto no território nacional quanto em contextos como o espaço aéreo e atividades espaciais (61).

As autoridades nacionais, como a Autoridade de Segurança Alimentar e Económica (ASAE) e a Direção-Geral de Alimentação e Veterinária (DGAV), enquanto autoridade responsável pela Gestão do Sistema de Segurança dos Alimentos, são responsáveis por aplicar e fiscalizar o cumprimento dessas regras (62,63).

6 Aceitação dos consumidores

A aceitação por parte dos consumidores é fundamental para o sucesso ou fracasso de uma nova tecnologia alimentar e, geralmente o receio demonstrado perante as mesmas deve-se à falta de conhecimento sobre o seu funcionamento e benefícios (64). Além da segurança alimentar, os consumidores procuram alimentos que ofereçam um sabor agradável e atraente. Desta forma, a segurança e a qualidade, principalmente a sensorial são fatores essenciais para a aceitação de um produto (4,47).

Apesar das evidências científicas da sua segurança, a irradiação de alimentos, ainda é vista negativamente pelos consumidores (40). O termo “irradiação” é frequentemente interpretado como algo adicionado aos alimentos tornando-os radioativos (3,40). Além disso, muitos consumidores fazem uma associação equivocada com termos intimamente ligados ao cancro como “radioterapia” ou “radiação”, o que oferece uma conotação negativa, traduzindo-se em medos infundados sobre o processo (40). A necessidade de rotular alimentos irradiados também contribui para a falta de confiança dos consumidores (40), pois esta é entendida como um alerta e não como apenas uma informação (46).

As características dos produtos juntamente com fatores como os seus valores culturais e sociais, as preferências pessoais e estilo de vida dos consumidores influenciam a aceitação do processo (40). Culturalmente, muitos rejeitam a irradiação por contrariar tradições alimentares (40). Contudo, em crises humanitárias, a irradiação de refeições étnicas prontas é considerada como uma mais-valia para garantir alimentos familiares e prevenir a desnutrição entre refugiados (40). Quanto às preferências pessoais, preocupações com o meio ambiente, alimentos naturais e dietas como o veganismo levam consumidores a evitar alimentos irradiados. Além disso, a irradiação é proibida em produtos orgânicos, limitando ainda mais sua aceitação (40).

Em termos globais, a aceitação da irradiação dos alimentos varia entre regiões. Na Europa, os consumidores demonstram maior desconfiança em relação a esses alimentos comparativamente aos americanos, enquanto na China e na Coreia a aceitação tem aumentado (40). A legislação restritiva da União Europeia limita o uso dessa tecnologia, embora países do Leste Europeu, como a Hungria, aceitem sua aplicação. Nos EUA, 14 tipos de alimentos podem ser irradiados, enquanto no Canadá apenas seis. México, Brasil, Cuba e Chile permitem a irradiação de alimentos com uma dose máxima de 10

kGy. Na Ásia e na África, a aceitação é diversa, com o Japão a limitar a prática à irradiação de batatas, enquanto o Irão e alguns países africanos estão em processo de implementação (40).

Para aumentar a aceitação dos alimentos irradiados pelos consumidores, é importante realizar campanhas educativas que expliquem claramente os benefícios da tecnologia pois, estudos de mercado indicam que 80-90% dos consumidores optariam por esses produtos após serem informados sobre sua segurança e benefícios (13,18). Estas campanhas devem envolver autoridades reguladoras e científicas transparentes e confiáveis pois, a aceitação vai depender não apenas da informação, mas também da confiança dos consumidores nas instituições/fontes que promovem essa informação (64). As campanhas devem focar-se nos valores que importam aos consumidores, como a segurança e a qualidade dos alimentos, em vez de apenas explicar a tecnologia de irradiação em si, pois é mais eficaz (18). A fim de aumentar a confiança dos consumidores, também se deve garantir uma rotulagem transparente e envolver pessoas que apoiem a irradiação nas decisões (18).

A harmonização das regulamentações globais sobre rotulagem e irradiação é necessária para ampliar o uso da tecnologia mundialmente (40).

7 Conclusões e Perspetivas Futuras

A irradiação dos alimentos tem sido alvo de bastante investigação científica e estudos rigorosos e atualmente encontra-se aprovada em cerca de 60 países. Trata-se de uma tecnologia não térmica, reconhecida como uma das mais eficazes para inativar agentes patogênicos e melhorar a segurança alimentar, prolongando a vida útil dos alimentos, sem apresentar riscos toxicológicos, microbiológicos ou nutricionais superiores aos dos métodos tradicionais de preservação de alimentos. Além disso, contrariamente ao que se pensa, a irradiação não torna os alimentos radioativos nem deixa resíduos ou toxinas nos mesmos.

Embora na União Europeia seja utilizada de forma mais limitada, e ainda enfrente desafios como custos elevados e resistência por parte dos consumidores devido falta de informação e preconceitos em relação à radiação, essas barreiras podem ser superadas com uma abordagem holística que inclua a educação dos consumidores, a sensibilização para os seus benefícios e a colaboração entre cientistas, empresas e órgãos reguladores. Desta forma, para ampliar a sua adoção global, é essencial harmonizar as regulamentações internacionais e promover campanhas educativas.

O futuro da irradiação aponta para inovações tecnológicas que otimizem o processo, como a combinação com inteligência artificial para otimizar o controlo de qualidade, a dosimetria, a previsão de vida útil e a monitorização em tempo real. A combinação com outras técnicas de conservação também poderá ser promissora.

Mais que um simples método de conservação, a irradiação, tem o potencial de revolucionar a cadeia alimentar, aumentando a disponibilidade de alimentos seguros em áreas vulneráveis. Com a sua crescente aceitação e comercialização, pode desempenhar um papel crucial na luta contra a fome e subnutrição, contra a insegurança alimentar e contra as doenças transmitidas por alimentos.

Referências Bibliográficas

1. Indiarito R, Pratama AW, Sari TI, Theodora HC. Food Irradiation Technology: A Review of The Uses and Their Capabilities. *Int J Eng Trends Technol.* 2020;68(12):91–8.
2. Yang J, Pan M, Han R, Yang X, Liu X, Yuan S, et al. Food Irradiation: An Emerging Processing Technology to Improve the Quality and Safety of Foods. *Food Rev Int.* 2024;40(8):2321–43.
3. Mshelia RD zaria, Dibal NI, Chiroma SM. Food irradiation: an effective but under-utilized technique for food preservations. *J Food Sci Technol.* 2023;60(10):2517–25.
4. Chaudhary S, Kumar S, Kumar V, Singh B, Dhiman A. Irradiation: A tool for the sustainability of fruit and vegetable supply chain-Advancements and future trends. *Radiat Phys Chem.* 2024;217:111511.
5. Bisht B, Bhatnagar P, Gururani P, Kumar V, Tomar MS, Sinhmar R, et al. Food irradiation: Effect of ionizing and non-ionizing radiations on preservation of fruits and vegetables– a review. *Trends Food Sci Technol.* 2021;114:372–85.
6. Arapcheska M, Spasevska H, Ginovska M. EFFECT OF IRRADIATION ON FOOD SAFETY AND QUALITY. *Curr Trends Nat Sci.* 2020;9(18):100–6.
7. Danyo EK, Ivantsova M, Selezneva I. Ionizing radiation effects on microorganisms and its applications in the food industry. *Foods Raw Mater.* 2023;12(1):1–12.
8. Ajibola OJ. An overview of irradiation as a food preservation technique. *Novel Res Microbiol J.* 2020;4(3):779–89.
9. Misra NN, Koubaa M, Roohinejad S, Juliano P, Alpas H, Inácio RS, et al. Landmarks in the historical development of twenty first century food processing technologies. *Food Res Int.* 2017;97:318–39.
10. Ehlermann DAE. The early history of food irradiation. *Radiat Phys Chem.* 2016;129:10–2.

11. Roberts PB. Food irradiation is safe: Half a century of studies. *Radiat Phys Chem.* 2014;105:78–82.
12. Ehlermann DAE. Wholesomeness of irradiated food. *Radiat Phys Chem.* 2016;129:24–9.
13. Ravindran R, Jaiswal AK. Wholesomeness and safety aspects of irradiated foods. *Food Chem.* 2019;285:363–8.
14. Codex Alimentarius Commission. Code of Practice for Radiation Processing of Food (CXC 19-1979). Revised 2003. 2003.
15. Codex Alimentarius Commission. General Standard for Irradiated Foods. CODEX STAN 106-1983, Rev.1-2003. Rome; 2003.
16. Shahi S, Khorvash R, Goli M, Ranjbaran SM, Najarian A, Mohammadi Nafchi A. Review of proposed different irradiation methods to inactivate food-processing viruses and microorganisms. *Food Sci Nutr.* 2021;9(10):5883–96.
17. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Manual of Good Practice in Food Irradiation. Technical Reports Series No. 481. Vienna; 2015.
18. Munir MT, Federighi M. Control of Foodborne Biological Hazards by Ionizing Radiations. *Foods.* 2020;9(7):878.
19. Gautam S, Tripathi J. Food Processing by Irradiation—An effective technology for food safety and security. *Indian J Exp Biol.* 2016;54(11):700–7.
20. Mittendorfer J. Food irradiation facilities: Requirements and technical aspects. *Radiat Phys Chem.* 2016;129:61–3.
21. Roberts PB. Food irradiation: Standards, regulations and world-wide trade. *Radiat Phys Chem.* 2016;129:30–4.
22. International Atomic Energy Agency. Radiation Safety of Gamma, Electron and X Ray Irradiation Facilities. Em: IAEA Safety Standards Series No SSG-8. Vienna; 2010. p. 4–11.

23. Nam KC, Jo C, Ahn DU. Irradiation of meat and meat products. Em: Emerging Technologies in Meat Processing. Wiley; 2016. p. 7–36.
24. Fellows PJ. Irradiation. Em: Food Processing Technology. 3.^a ed. Elsevier; 2009. p. 271–89.
25. Hinds LM, O'Donnell CP, Akhter M, Tiwari BK. Principles and mechanisms of ultraviolet light emitting diode technology for food industry applications. *Innov Food Sci Emerg Technol*. 2019;56:102153.
26. Baatout S, editor. Basic Concepts of Radiation Biology. Em: Radiobiology Textbook. Cham: Springer International Publishing; 2023. p. 30.
27. Lung HM, Cheng YC, Chang YH, Huang HW, Yang BB, Wang CY. Microbial decontamination of food by electron beam irradiation. *Trends Food Sci Technol*. 2015;44(1):66–78.
28. Kalyani B, Manjula K. Food Irradiation-Technology and Application. *Int J Curr Microbiol App Sci*. 2014;3(4):549–55.
29. ISO/ASTM International. Practice for Dosimetry in an X-ray (bremsstrahlung) facility for Radiation Processing at Energies between 50 KeV and 7.5 MeV. ISO/ASTM 51608:2015. 3rd ed. Switzerland; 2015.
30. Bhoir SA, Muppalla SR, Kanatt SR, Chawla SP, Sharma A. Radappertization of ready-to-eat shelf-stable, traditional Indian bread – Methi Paratha. *Radiat Phys Chem*. 2015;111:24–7.
31. Feliciano CP. High-dose irradiated food: Current progress, applications, and prospects. *Radiat Phys Chem*. 2018;144:34–6.
32. Lima F, Vieira K, Santos M, Mendes de Souza P. Effects of Radiation Technologies on Food Nutritional Quality. Em: Descriptive Food Science. IntechOpen; 2018. p. 142–7.
33. Indiarto R, Irawan AN, Subroto E. Meat Irradiation: A Comprehensive Review of Its Impact on Food Quality and Safety. *Foods*. 2023;12(9):1845.

34. Han Z, Cai M jie, Cheng JH, Sun DW. Effects of electric fields and electromagnetic wave on food protein structure and functionality: A review. *Trends Food Sci Technol.* 2018;75:1–9.
35. Anwar MM, Ali SE, Nasr EH. Improving the nutritional value of canola seed by gamma irradiation. *J Radiat Res Appl Sci.* 2015;8(3):328–33.
36. Kumar V, Rani A, Hussain L, Jha P, Pal V, Petwal VC, et al. Impact of Electron Beam on Storage Protein Subunits, In Vitro Protein Digestibility and Trypsin Inhibitor Content in Soybean Seeds. *Food Bioproc Tech.* 2017;10(2):407–12.
37. Rahaman T, Vasiljevic T, Ramchandran L. Effect of processing on conformational changes of food proteins related to allergenicity. *Trends Food Sci Technol.* 2016;49:24–34.
38. Shahidi F, Hossain A. Role of Lipids in Food Flavor Generation. *Molecules.* 2022;27(15):5014.
39. Ehlermann DAE. Particular applications of food irradiation: Meat, fish and others. *Radiat Phys Chem.* 2016;129:53–7.
40. Castell-Perez ME, Moreira RG. Irradiation and Consumers Acceptance. *Em: Innovative Food Processing Technologies.* Elsevier; 2021. p. 122–35.
41. Zanardi E, Caligiani A, Novelli E. New Insights to Detect Irradiated Food: an Overview. *Food Anal Methods.* 2018;11(1):224–35.
42. Bashir K, Aggarwal M. Physicochemical, structural and functional properties of native and irradiated starch: a review. *J Food Sci Technol.* 2019;56(2):513–23.
43. Awuchi C, Godswill V, Somtochukwu E, Kate C. Health Benefits of Micronutrients (Vitamins and Minerals) and their Associated Deficiency Diseases: A Systematic Review. *Int J Food Sci.* 2020;3(1):1–32.
44. Jayne V Woodside. Nutritional aspects of irradiated food. *Stewart Postharvest Rev.* 2015;11(3):1–6.

45. Bhatnagar P, Gururani P, Bisht B, Kumar V, Kumar N, Joshi R, et al. Impact of irradiation on physico-chemical and nutritional properties of fruits and vegetables: A mini review. *Heliyon*. 2022;8(10):e10918.
46. Prakash A, Ornelas-Paz J de J. Irradiation of Fruits and Vegetables. Em: *Postharvest Technology of Perishable Horticultural Commodities*. Elsevier; 2019. p. 563–89.
47. Pi X, Yang Y, Sun Y, Wang X, Wan Y, Fu G, et al. Food irradiation: a promising technology to produce hypoallergenic food with high quality. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2022;62(24):6698–713.
48. Rahman MH, Islam MS, Begum S, Ali ML, Sutradhar BC, neil VO, et al. Scientific Opinion on the Standards and Regulations of Irradiated Food. *J Nutr Food Sci*. 2018;08(04).
49. M R. Food Irradiation: A call for caution. *World Nutrition*. 2022;13(4):64–70.
50. Komolprasert V. Packaging food for radiation processing. *Radiat Phys Chem*. 2016;129:35–8.
51. FDA. Packaging Materials Listed in 21 CFR 179.45 for Use During Irradiation of Prepackaged Foods [Internet]. 2007. Disponível em: <https://www.fda.gov/food/irradiation-food-packaging/packaging-materials-listed-21-cfr-17945-use-during-irradiation-prepackaged-foods>
52. Codex Alimentarius Commission. General Standard for the Labelling of Prepackaged Foods. CXS 1-1985. Revised 2018. Rome; 2018.
53. Direção-Geral de Alimentação e Veterinária (DGAV). Codex Alimentarius [Internet]. Disponível em: <https://www.dgav.pt/alimentos/conteudo/codex-alimentarius/>
54. Parlato A, Giacomarra M, Galati A, Crescimanno M. ISO 14470:2011 and EU legislative background on food irradiation technology: The Italian attitude. *Trends Food Sci Technol*. 2014;38(1):60–74.
55. European Commission. Food Irradiation: Legislation [Internet]. 2023. Disponível em: https://food.ec.europa.eu/food-safety/biological-safety/food-irradiation/legislation_en

56. European Parliament and Council. Directive 1999/2/EC of the European Parliament and the Council on the approximation of the laws of the Member States concerning foods and food ingredients treated with ionising radiation. Brussels; 1999.
57. European Parliament and the Council. Directive 1999/3/EC of the European Parliament and the Council on the establishment of a Community list of foods and food ingredients treated with ionising radiation. Brussels; 1999.
58. Ministério da Agricultura do desenvolvimento R e das P. Decreto-Lei nº 337/2001. Diário da República nº297/2001. 2001.
59. Presidência do Conselho de Ministros. Decreto-Lei nº 108/2018. Diário da República nº 232/2018, Série I. 2018.
60. Presidência do Conselho de Ministros. Decreto-Lei nº 81/2022. Diário da República nº 234/2022, Série I. 2022.
61. Direção-Geral de Alimentação Veterinária (DGAV). Irradiação de Alimentos [Internet]. 2023. Disponível em: <https://www.dgav.pt/alimentos/conteudo/generos-alimenticios/garantir-a-seguranca-dos-alimentos/irradiacao/>
62. Direção-Geral de Alimentação e Veterinária (DGAV). Missão [Internet]. Disponível em: <https://www.dgav.pt/quemsomos/conteudo/missao/>
63. Autoridade de Segurança Alimentar e Económica (ASAE). A ASAE [Internet]. Disponível em: <https://www.asae.gov.pt/a-asae/>
64. Silva A, Rocha C, Ribeiro JC, Aganovic K, Lima RC, Methven L, et al. Consumer perception of risk towards new sustainable non-thermal food processing technologies: A cross-cultural study between Portugal, Germany, and the UK. *Innov Food Sci Emerg Technol*. 2024;96:103772.

Anexos

A1. ANEXO IV Decreto-Lei nº 337/2001

Géneros alimentícios que podem ser tratados por radiações ionizantes e doses máximas de irradiação

Categoria de géneros alimentícios	Dose global média de radiação absorvida (valor máximo) (kGy)
Ervas aromáticas secas, especiarias e condimentos vegetais . . .	10