

Universidade de Lisboa

Faculdade de Farmácia



**Conservação de Alimentos por exposição à
Radiação Ionizante**

Kátia Cristina Morais Soares Gomes

**Mestrado Integrado em Ciências
Farmacêuticas**

2020

Universidade de Lisboa

Faculdade de Farmácia



Conservação de Alimentos por exposição à Radiação Ionizante

Kátia Cristina Morais Soares Gomes

**Monografia de Mestrado Integrado em Ciências Farmacêuticas
apresentada à Universidade de Lisboa através da Faculdade de
Farmácia**

Orientadora: Professora Auxiliar, Doutora Lídia Maria Veloso Pinheiro

2020

RESUMO

Encontram-se atualmente descritas na literatura várias técnicas de conservação de alimentos, tendo todas elas o objetivo de aumentar o tempo de vida útil dos mesmos, evitando perdas nutricionais consideráveis. Uma das abordagens da Indústria alimentar tem consistido na utilização da energia ionizante para efeitos da conservação dos produtos alimentícios. A irradiação é um método físico que se baseia na exposição do alimento a uma determinada quantidade de radiação ionizante e por um determinado intervalo de tempo, tendo em conta as características do alimento a ser processado e a finalidade pretendida com a aplicação da técnica. O objetivo do presente trabalho foi realizar um levantamento bibliográfico com o intuito de fazer uma avaliação do panorama geral dos efeitos do uso da radiação ionizante nos microrganismos e componentes nutricionais dos alimentos, suas vantagens, princípios e limitações. A irradiação é utilizada de forma a minimizar a flora microbiana e a diminuir a velocidade das reações químicas intrínsecas dos alimentos. No âmbito da conservação dos alimentos, os tipos de radiação envolvidos são os raios gama (os mais utilizados), os raios X e os elétrons de elevada energia. A preocupação dos consumidores em relação aos alimentos processados por esta técnica é considerada uma limitação na difusão da mesma. Não obstante, os vários estudos reportados na literatura têm vindo a comprovar que o método de irradiação dos alimentos continua a ter um potencial promissor para o futuro, tornando-se fundamental a correta divulgação das suas vantagens e segurança dos métodos de irradiação.

Palavras-chave: Irradiação de alimentos; Radiação ionizante; Conservação de alimentos; Segurança alimentar.

ABSTRACT

Nowadays we can find several methods of food preservation and all of them share a common goal which is to increase food durability, avoiding unnecessary loss of nutrient components. One of the approaches of the Food Industry has been the use of ionizing energy for the purpose of preserving food products. Irradiation is a physical principle based on exposing a food product to a certain amount of ionizing radiation during a defined amount of time, taking into account the characteristics of the product itself and our intended purpose. The main objective of this thesis was to gather all the existing bibliographic information on the matter, to evaluate the effects of the use of ionizing radiation in the microorganisms and nutrient components of food products, and also its advantages, principles and limitations. Ionizing radiation is applied to minimize microbial flora and reduce the speed of food intrinsic chemical reactions. In the context of food preservation, the types of radiation involved are gamma rays (the most used), X-rays and high-energy electrons.

The consumer's concern about the use of this technique in food preservation is largely assumed as a limitation to propel it further in the market.

However, recent studies show that preserving food products by means of radiation has a promising future and therefore it is imperative to correctly disclose it, in regard to its advantages and safety, to minimize consumer's misconceptions.

Key Words: Irradiation of food products; Ionizing radiation; Preservation of food; Food Safety.

ÍNDICE GERAL

RESUMO.....	2
ABSTRACT	3
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABELAS	6
LISTA DE ACRÓNIMOS/SIGLAS	7
1. INTRODUÇÃO.....	8
2. OBJETIVOS	10
3. MATERIAIS E MÉTODOS	11
4. IRRADIAÇÃO EM ALIMENTOS.....	12
4.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA	13
4.2 FONTES DE RADIAÇÃO IONIZANTE NO PROCESSO DE IRRADIAÇÃO E IRRADIADORES	13
4.2.1 Raios Gama.....	15
4.2.2 Raios X	16
.....	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
4.2.3 Eletrões de elevada energia.....	17
4.3 DOSE DE RADIAÇÃO IONIZANTE NO PROCESSO DE IRRADIAÇÃO ALIMENTAR.....	17
4.4 FORMAS DE INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO IONIZANTE COM OS ALIMENTOS	19
4.4.1 Efeito fotoelétrico	19
4.4.2 Efeito Compton	20
4.4.3 Produção de pares	21
4.5 PRINCIPAIS TÉCNICAS DE IRRADIAÇÃO EM ALIMENTOS	21
4.6 ALTERAÇÕES QUÍMICAS, FÍSICAS E NUTRICIONAIS NOS ALIMENTOS IRRADIADOS	24
4.6.1 Efeito nas proteínas.....	25
4.6.2 Efeito nos lípidos.....	25
4.6.3 Efeito nos hidratos de carbono.....	26
4.6.4 Efeito nas vitaminas	26
4.7 EFEITOS DA RADIAÇÃO NOS MICRORGANISMOS	27
4.8 PRINCIPAIS VANTAGENS E LIMITAÇÕES DA IRRADIAÇÃO DE ALIMENTOS	29
4.9 ASPETOS LEGAIS, QUESTÕES DE SEGURANÇA E INFORMAÇÃO AOS CONSUMIDORES.....	31
5. CONCLUSÃO E PERSPETIVAS FUTURAS.....	34
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Irradiador gama numa instalação de Tecnologia Nuclear. Retirado de (18).	15
Figura 2: Irradiador gama comercial. Retirado de (20).	16
Figura 3: Diagrama esquemático de um típico irradiador de raios X (a) e de feixe de elétrons (b). Retirado de (23).	17
Figura 4: Efeito fotoelétrico. Retirado de (31).	20
Figura 5: Efeito Compton. Retirado de (31).	20
Figura 6: Produção de pares. Retirado de (31).	21
Figura 7: Carnes produzidas pela Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA, USA) que foram irradiadas (radapertização) Retirado de (6).	22
Figura 8: Batatas que receberam uma dose baixa de radurização. Adaptado de (6).	22
Figura 9: Carne que recebeu uma dose média de radiação. Retirado de (6).	24
Figura 10: Sobrevivência microbiológica versus dose de irradiação. Retirado (24).	28
Figura 11: Símbolo internacional da irradiação em alimentos. Retirado (46).	34

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Uso da irradiação para controlo da deterioração nos alimentos. Adaptado de (29)..	18
Tabela 2: Efeito da irradiação nos alimentos. Adaptado de (31).	Error! Bookmark not defined.
Tabela 3: Requisitos de dose para alguns usos típicos de irradiação de alimentos. Adaptado (3).	30

LISTA DE ACRÓNIMOS/SIGLAS

OMS- Organização Mundial da Saúde

IAEA- Agência Internacional de Energia Atômica

FAO- Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura

FDA- Food and Drug Administration

USDA- Departamento de Agricultura dos Estados Unidos

JECFI- Joint Expert Committee on Food Irradiation

Gy- Gray

Bq (Becquerel, número de desintegrações por segundo)

NASA- Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço

BPF- Boas Práticas de Fabricação

APPCC- Sistemas de Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle

1. Introdução

A moderna indústria de alimentos tem vindo a transformar a inovação, a sustentabilidade e a segurança nos seus principais focos. A conservação de alimentos é um processo que tem como objetivo aumentar a vida útil dos alimentos, de forma a manter a qualidade e propriedades organoléticas dos mesmos. Este processo envolve as ações realizadas para a manutenção dos alimentos segundo as propriedades ou natureza desejadas, por um período de tempo igualmente desejado (1).

Apesar de se apresentarem como formas eficientes na promoção da estabilidade dos alimentos, os métodos térmicos de processamento possuem as desvantagens de desencadear alterações sensoriais e nutricionais não desejáveis em alguns produtos (2).

Neste contexto, um conjunto de novas técnicas de conservação tem vindo a ser desenvolvido para responder às demandas atuais de conservação mais eficiente, bem como a uma maior satisfação do consumidor no que diz respeito aos aspetos nutricionais e sensoriais, conveniência, ausência de conservantes químicos, preço baixo e segurança ambiental. Entre estas novas técnicas podemos destacar vários processos não térmicos, como alta pressão hidrostática, campo elétrico pulsado e tecnologias de irradiação. Dentre eles, a irradiação de alimentos é considerada um dos métodos mais eficazes para a sua conservação (3).

A radiação ionizante, técnica de processamento não térmico, tem sido aplicada com diversos propósitos. Destaca-se a sua aplicação em alimentos, área em que se tornou bastante promissora para a conservação, quer em combinação com outros métodos ou para substituir o tratamento térmico (2).

A irradiação de alimentos é um processo físico, uma vez que consiste em expor os alimentos à ação de radiação ionizante - raios gama ou X, ou eletrões acelerados. Esta técnica atua no controlo de diversos microrganismos e os efeitos obtidos sobre estes são tanto maiores quanto maior for a energia absorvida pelos alimentos (4).

O uso da radiação ionizante como meio de conservação de alimentos teve início nos primórdios dos anos 20 do século 20. Mais tarde, durante as décadas de 50 e de 60, o Exército dos Estados Unidos conduziu investigações sobre irradiação de baixa e alta dose em rações de combate (5).

A nível mundial, o número de produtos que são processados por irradiação está em constante aumento e desde a década de 90 que se tem observado a irradiação de diversos alimentos, nomeadamente frutas, legumes, carnes, frutos do mar e especiarias (6).

Atualmente, cerca de 60 países possuem legislação que autoriza o uso da radiação ionizante para conservação de mais de 100 tipos de alimentos (7).

Com a aplicação adequada, a irradiação pode ser um meio eficaz de eliminar e/ou reduzir contaminações microbianas e de insetos, bem como as doenças transmitidas por alimentos, melhorando assim a sua proteção e vida útil (5).

Devido ao fato da radiação ionizante ter potencial para causar alterações químicas, a segurança dos alimentos irradiados para o consumo humano tem sido questionada. Neste âmbito a salubridade dos alimentos irradiados tem sido objeto de investigações a nível nacional e internacional, revistas e avaliadas por comitês de especialistas conjuntos da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), da Organização Mundial da Saúde (OMS) e Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO). Estes grupos de especialistas concluíram de forma unânime que o processo de irradiação de alimentos não apresenta nenhum risco toxicológico, microbiológico ou nutricional acrescido, além daqueles ocasionados por técnicas convencionais de processamento alimentar (5).

Apesar da aprovação e regulamentação do uso da tecnologia, a comercialização dos alimentos irradiados de forma satisfatória tem encontrado dificuldade devido a alguns fatores que, curiosamente não têm origem técnica ou científica mas decorre da aceitação por parte dos consumidores (8). Para superar as expectativas dos consumidores face aos alimentos irradiados é mandatório que existam informações precisas sobre segurança, benefícios e limitações deste processo (4,9,10).

2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal realizar um levantamento bibliográfico conducente à avaliação do panorama geral sobre os efeitos da radiação ionizante nos microrganismos e componentes nutricionais dos alimentos.

Mais especificamente, perspectiva-se: *i)* discutir os tipos de radiação utilizada nos alimentos bem como suas diferenças e aplicações; *ii)* mostrar os benefícios desse método de conservação quando comparado com outros métodos físicos de conservação; *iii)* analisar a segurança dos alimentos irradiados e perceber o preconceito existente na população relativamente aos alimentos irradiados.

3. Materiais e Métodos

Para a realização deste trabalho, foram consultados artigos científicos, artigos de revisão, revistas científicas na área da alimentação/nutrição publicados e referenciados em vários motores de busca como o *GoogleScholar*, *PubMed*, *Science Direct*, *Scopus*, *Sibul* e *Scielo*. Os termos utilizados na pesquisa foram “ionizing radiation”, “food preservation”, “food processing”, “food treatment”, “food decontamination”. Esta pesquisa foi realizada no período compreendido entre 1 de Abril e 30 de Setembro de 2020. Deu-se preferência à inclusão de publicações a partir de 2009. De modo a esclarecer informações encontradas nos artigos selecionados, foi necessário a consulta de referências bibliográficas nestes descritas, anteriores ao período acima referido.

4. Irradiação em alimentos

A irradiação é uma forma eficaz de conservar alimentos e que prolonga a vida útil dos mesmos, reduzindo a sua deterioração. O processo também beneficia o consumidor, uma vez que diminui o risco de desenvolvimento de patologias de origem alimentar (5).

Devido ao aumento da incidência de doenças transmitidas por alimentos em todo o mundo, resultante das várias tentativas para a redução destas mesmas doenças, a OMS considera a irradiação de alimentos uma técnica relevante na garantia da segurança alimentar e na redução da perda de alimentos (5). O aumento da investigação na área de irradiação de alimentos tem sido provocado pelo igual aumento de surtos de patógenos transmitidos por alimentos. Efetivamente o método da irradiação é um tratamento sanitário e fitossanitário legítimo de alimentos e produtos agrícolas, podendo servir também como um tratamento de quarentena de produtos e como um substituto de fumigantes em países asiáticos e nos Estados Unidos da América (EUA) (5).

Sendo considerada um dos métodos mais rápidos de esterilização, a irradiação pode ser uma medida de controlo útil na produção de vários tipos de alimentos crus ou minimamente processados, como aves, carnes e derivados, peixes, frutos do mar, frutas e legumes (11). Para além disso apresenta ainda a vantagem de não ser prejudicial ao meio ambiente desde que sejam respeitadas as normas de segurança (10).

A técnica consiste na exposição de alimentos a um nível de radiação ionizante pré-estabelecido. Estes alimentos podem ser pré-embalados ou vendidos a granel, podendo ser consumidos imediatamente após a exposição aos raios, uma vez que não se tornam radioativos.

Apesar da reduzida dimensão do setor da irradiação dos alimentos em Portugal, a indústria alimentar mostra interesse pela técnica, uma vez que esta proporciona a descontaminação microbiana de especiarias que não pode ser feita pelo óxido de etileno, por exemplo, devido à sua proibição na Comissão Europeia como meio de descontaminação de produtos ou ingredientes alimentares (4).

O uso de radiação no processamento de alimentos para redução de microrganismos em Portugal é conhecido e autorizado pelo Decreto-Lei n.º 337/2001 de 26 de Dezembro, com vista à criação de iguais condições de concorrência dentro do mercado interno pela Diretiva n.º 1999/2/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 22 de Fevereiro, que veio fixar as normas de fabrico, comercialização e importação de alimentos e ingredientes alimentares tratados por radiação ionizante, prevendo ainda a adoção de uma lista positiva comunitária dos referidos alimentos, harmonizando-se, deste modo, as legislações dos Estados-Membros Europeus (12).

4.1 Evolução Histórica

As investigações na área de irradiação de alimentos tiveram início em 1895 com a descoberta do raio X por Roentgen e da radioatividade por Becquerel em 1896. Em 1905 surgiu a primeira patente sobre tratamento de alimentos (especialmente de cereais) feito com raios alfa, beta e gama oriundos de substância radioativa (2).

Durante a década de 50 do século 20 foi lançada nos EUA uma campanha denominada “Átomos para a Paz” e que tinha como objetivo dar visibilidade a todos os benefícios que a energia atômica apresenta. A partir deste programa o Departamento Médico das Forças Armadas Americanas, como pioneiro destas investigações, desenvolveu estudos na área de irradiação de alimentos. Outros países como a França, a Alemanha, o Canadá e a União Soviética também realizaram estudos nesta área (13).

A Food and Drug Administration (FDA) e o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) avaliaram durante um longo período de tempo os alimentos irradiados. Posteriormente, a OMS, em acordo com a FAO e a IAEA, juntamente com a Joint Expert Committee on Food Irradiation (JECFI), entre 1965 e 1970, passaram a avaliar a qualidade e a segurança dos alimentos irradiados (14).

A primeira utilização comercial de alimentos irradiados teve lugar na Alemanha no ano de 1957, com o emprego de um feixe de elétrons por uma indústria de especiarias, a qual tinha como objetivo o melhoramento da qualidade higiénica dos seus produtos. Apesar disso, os órgãos de saúde de muitos países hesitaram na permissão da comercialização de produtos irradiados, devido a pouca robustez dos estudos nesta área (13).

Em Portugal a legislação no domínio da irradiação alimentar surgiu apenas em 2001 através do Decreto-Lei n.º 337/2001 (anteriormente referido) que define os únicos alimentos que podem ser expostos à radiação ionizante com objetivos bem definidos, nomeadamente no que diz respeito à descontaminação e aumento do tempo de prateleira (12).

4.2 Fontes de radiação ionizante no processo de irradiação e irradiadores

O processo de irradiação alimentar é um método físico de conservação onde o alimento a ser irradiado é exposto a um nível de radiação ionizante pré-estabelecido através de raios gama, raios X ou feixe de elétrons. Por ser um processo que decorre à temperatura ambiente, o alimento pode ser acondicionado em embalagens plásticas ou de papel antes mesmo de ser irradiado (15).

Para além das fontes de radiação ionizante, são dados importantes a forma como a energia é quantificada, bem assim como as suas vantagens e limitações (9,14).

Os efeitos da radiação em materiais biológicos podem ser diretos ou indiretos. Os efeitos indiretos aparecem como consequências da difusão reativa de radicais livres formados pela radiólise da água, como por exemplo, o radical hidróxido OH^\cdot , eletrões hidratados e H^+ . Por outro lado, o fato das reações químicas ocorrerem como resultado do bombardeamento de energia irradiada na molécula alvo surge como efeito direto da radiação (9).

Entre os tipos de radiação ionizante geralmente utilizados no processamento de produtos alimentares, os raios gama são o tipo preferido devido ao fato dos efeitos conservantes nos alimentos serem adequados, isto é, não geram radioatividade em alimentos ou nos constituintes das embalagens e também por estarem disponíveis a custos razoáveis no âmbito comercial no processo de irradiação (16).

Os dois fatores levados em consideração na formação dos irradiadores são seu porte e a sua categoria. Por outro lado, para processar um certo alimento, a dose a ser utilizada, a densidade do alimento e a distribuição das doses compõem os requisitos do irradiador ideal (17).

Devido ao fato de se tratar de um processo dispendioso é exigido um rigoroso planeamento de todas estas fontes de radiação. A necessidade de um grande sistema de blindagem que proteja o ambiente exterior quando estas radiações estão a ser utilizadas (figura 1), justifica grande parte do elevado custo do processo. A instalação deve, além disso, cumprir a legislação de higiene e segurança (9).

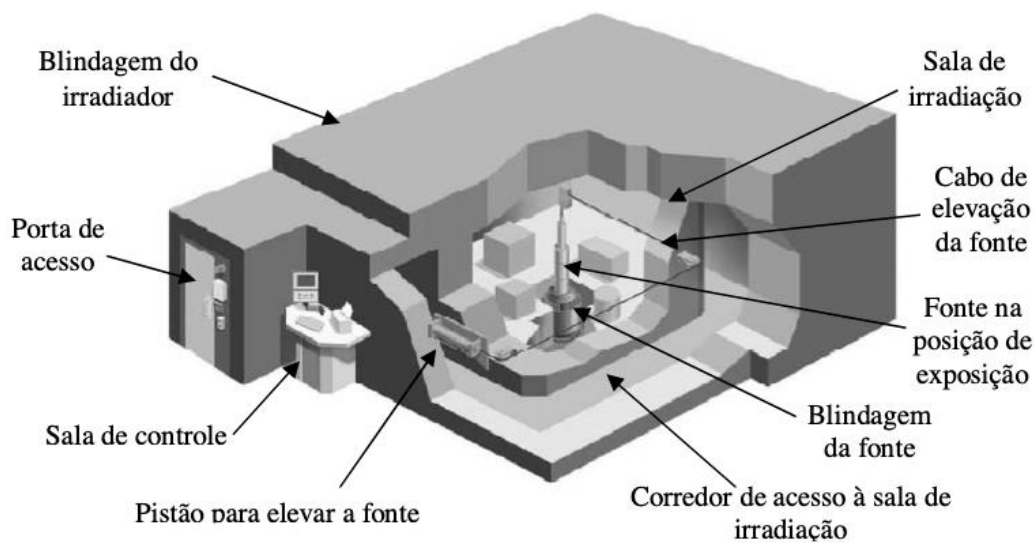


Figura 1: Irradiador gama numa instalação de Tecnologia Nuclear. Retirado de (18).

4.2.1 Raios Gama

Os raios gama são fótons de alta energia, com grande capacidade de penetração na matéria, produzidos pela desintegração espontânea de radionuclídeos como o cobalto-60 e o céσιο-137. O alto poder de penetração dos raios gama representa uma das principais características deste tipo de radiação e facilita seu uso no tratamento de produtos a granel, como frutas e legumes, uma vez que retarda o amadurecimento e promove a descontaminação dos mesmos. Produtos como especiarias, temperos, farinha, ovos e aves também são tratados por este tipo de radiação. Uma vez que os raios gama não dão origem a neutrões, os alimentos irradiados e seu material não se tornam radioativos (5,17).

O cobalto-60 é o radionuclídeo mais comumente utilizado para os alimentos. Emite radiação ionizante na forma de raios gama e apresenta como vantagens o fato de ter um tempo de semi-vida de 5,3 anos, decair para níquel não radioativo, proporcionar um tratamento mais lento dos alimentos (quando comparado com outras formas de radiação) e proporcionar uniformidade da dose (18).

A outra fonte radionuclídica, céσιο-137, tem um tempo de semi-vida muito superior ao do cobalto-60, atingindo os 30 anos, mas não é de utilização tão ampla (3).

As instalações de irradiação que utilizam o cobalto-60 como isótopo radioativo na maioria dos casos são constituídas pelo irradiador que, por sua vez apresenta-se como uma célula blindada no centro da qual se encontram as fontes isotópicas montadas numa estrutura. Fazer circular os

produtos alimentares em frente a esta estrutura, de tal forma que a energia eletromagnética emitida seja uniformemente absorvida, constitui o princípio do funcionamento do irradiador (4).

As fontes de radiação são recolhidas em tanque de água com blindagem sempre que a instalação não esteja a funcionar. Existem sistemas complexos de segurança, interligados entre si, que proporcionam o funcionamento seguro destas instalações (4).

Na figura 2 é possível observar um diagrama esquemático de um irradiador gama comercial, onde as fontes seladas são armazenadas em água e elevadas ao ar para irradiar um produto alimentar que pode ser movido para a sala de irradiação num sistema de transporte.

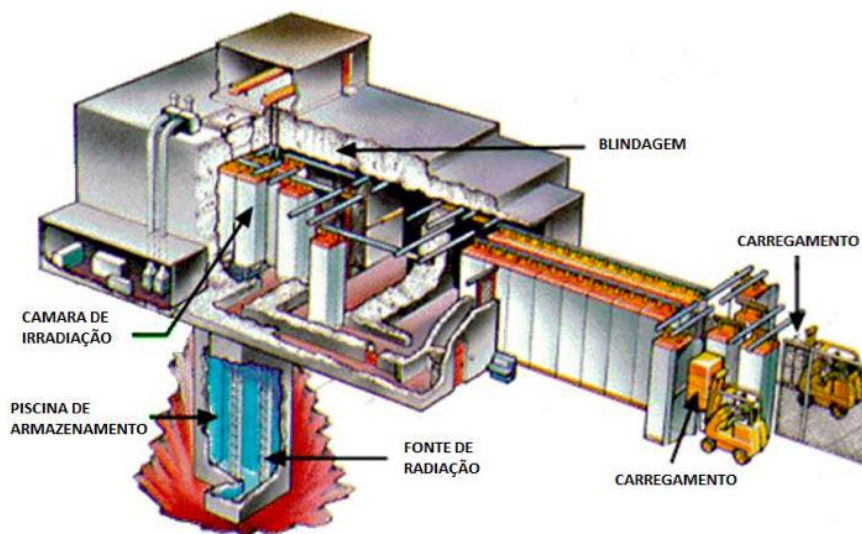


Figura 2: Irradiador gama comercial. Retirado de (19).

4.2.2 Raios X

A fonte menos utilizada são os raios X gerados pelo bombardeamento de elétrons de alta energia num alvo metálico (3). Apesar dos raios X apresentarem um elevado poder de penetração na matéria, tal como os raios gama, a energia operada na maioria dos aparelhos (energia máxima de 5 Mev), é muito baixa para induzir radioatividade nos alimentos (4,19). Dos poucos produtos alimentícios que podem ser tratados pelos raios X, podemos destacar as frutas e os legumes (20).

O diagrama apresentado na figura 3 permite-nos analisar um irradiador típico de raios X e feixe de elétrons, onde os elétrons são acelerados num alvo metálico para gerar um fluxo de raios X.

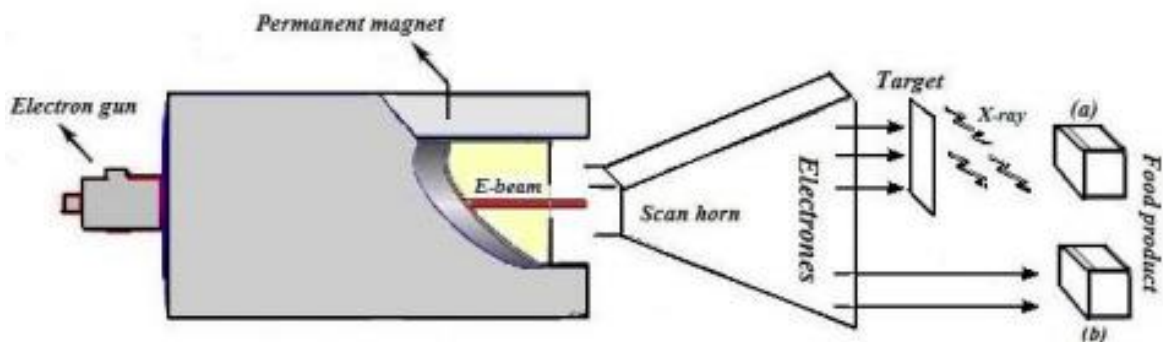


Figura 3: Diagrama esquemático de um típico irradiador de raios X (a) e de feixe de elétrons (b). Retirado de (20).

4.2.3 Elétrons de elevada energia

A segunda fonte principal de radiação ionizante são os elétrons acelerados produzidos por equipamentos denominados de aceleradores de partículas, mais precisamente aceleradores de elétrons (3).

A principal vantagem dos aceleradores de elétrons é que eles podem ser desligados quando não estão em uso, sem deixar risco de radiação. A temperatura do alimento processado não é alterada pelo feixe de elétrons e além disso possibilita a aplicação de altas taxas de dosagem (1000 a 100000 kGy/s em comparação com apenas 0,01 a 1 Gy/s para radiação gama) (21).

Os feixes de elétrons podem ser usados para o tratamento de vários produtos alimentícios, como grãos, alimentos de baixa densidade, como especiarias moídas, e também para a descontaminação da superfície de refeições preparadas (3).

4.3 Dose de radiação ionizante no processo de irradiação alimentar

A dose de radiação ou nível do tratamento é definida como a quantidade de energia absorvida durante a exposição do produto, onde D é conhecida como dose absorvida, (dE) representa a energia transmitida ao alimento pelos fótons ou partículas ionizantes e (dm) traduz a unidade de massa (10,21).

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (1)$$

Tradicionalmente, a dose de radiação de ionização absorvida pelo material irradiado tem sido medida em unidades de rad, mas recentemente esta unidade foi substituída pelo gray (Gy), que

é igual a 100 rad. Por sua vez, o Gy equivale a 1 Joule de energia absorvida por quilograma do produto irradiado, cuja energia absorvida é dependente da massa, densidade e espessura do alimento. As doses nos alimentos irradiados são usualmente classificadas como: baixas (menores que 1,0 kGy), médias (1-10 kGy) e elevadas (maiores que 10 kGy) (9,22).

A dose real de radiação utilizada em qualquer aplicação de processamento de alimentos representa um equilíbrio entre a quantidade necessária para produzir um resultado desejado e a quantidade que o produto pode tolerar sem sofrer alterações indesejadas (23).

A fim de se confirmar a adequação da dose aplicada no produto, é necessário que haja um sistema dosimétrico devidamente calibrado nos equipamentos irradiadores, permitindo assim a determinação da dose absorvida (24).

Estes efeitos podem limitar a dose permissível, pois muitas vezes são acompanhados por uma deterioração acelerada se o produto for contaminado por microrganismos após o tratamento por irradiação (23).

Assim, é extremamente importante a determinação da dose máxima e de tolerância, onde a dose máxima é a dose fundamental para conseguir o resultado pretendido e a dose de tolerância é a maior dose que o alimento pode receber para não afetar a saúde do consumidor (10).

A tabela a seguir apresentada aponta para a relação que existe entre as doses (kGy) toleráveis e as mínimas necessárias para o controle da deterioração nos alimentos, por exemplo.

Tabela 1: Uso da irradiação para controle da deterioração nos alimentos. Adaptado de (29).

<i>Alimento</i>	<i>Dose máxima tolerável estimada de colheita</i>	<i>Dose mínima necessária estimada para controle</i>
Damascos	50	200
Espargos	15	5 – 10
Frutos silvestres	100	200
Limões/Limas	25	150 – 200
Nectarinas	100	200
Laranjas	200	200
Pêssegos	100	200
Framboesas	100	200
Morangos	200	200
Uvas	25 - 50	1000
Tomates	100 - 50	> 300

4.4 Formas de interação da radiação ionizante com os alimentos

Como já referido anteriormente, na indústria de alimentos as formas de radiação utilizadas são a radiação eletromagnética, principalmente a radiação gama e raios X e a radiação por feixes de elétrons (10).

O princípio da radiação demonstra que ocorre interação da radiação com a matéria quando os raios gama, X ou feixe de elétrons entram em contato com a matéria, que por sua vez absorve esta energia, resultando na formação de elétrons energizados que circundam aleatoriamente a matéria e que são capazes de provocar uma excitação dos átomos e moléculas ou uma ionização. O mecanismo de ação de raios gama e X tem como base três processos: efeito fotoelétrico, produção de pares e efeito Compton. Entre eles, o efeito Compton representa o principal mecanismo de transferência de energia em alimentos irradiados (25). O tipo de interação resultante é determinado pelo número atômico e pela energia do fóton ou da partícula incidente que formam a matéria (10).

4.4.1 Efeito fotoelétrico

No efeito fotoelétrico há transferência de energia de um fóton do feixe do raio gama (com exceção da energia usada para superar a ligação elétron-átomo) ao elétron orbital, com o intuito de facilitar a sua remoção do átomo. Este fenômeno leva à extinção do fóton. Depois de ejetar o elétron, e para voltar ao equilíbrio eletrônico, o átomo preenche a camada da qual foi retido o elétron, com outro das camadas superiores; esta transição de elétrons conduz à emissão de raios X (26).

Existe, entretanto, um favorecimento da colisão com elétrons orbitais de outros átomos por parte dos elétrons ejetados que possuem energia suficiente para tal, levando assim a novas ionizações de modo a restabelecer um novo equilíbrio químico (26).

Este método ganha importância em situações onde há maior probabilidade da sua ocorrência e isso acontece quando é aplicado a materiais pesados e em energias baixas. Também acontece com fótons de altas energias, embora quando se trata de materiais leves a probabilidade de ocorrer limita-se aos fótons de energias baixas (10). A Figura a seguir representada ilustra a ejeção de um elétron orbital pelo efeito fotoelétrico.

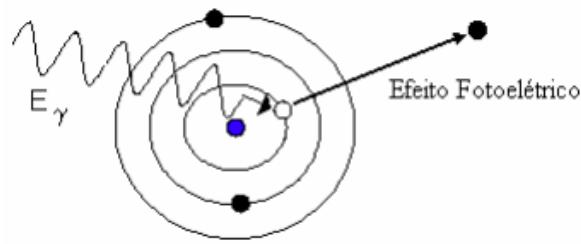


Figura 4: Efeito fotoelétrico. Retirado de (31).

4.4.2 Efeito Compton

O efeito Compton é o principal mecanismo de transferência de energia em alimentos irradiados. Neste processo, um fóton incidente interage com o átomo e transfere sua energia, de forma a provocar a ejeção do elétron. O elétron ejetado possui uma trajetória e energia dependentes da energia inicial do fóton incidente (27).

De acordo com o que podemos observar na figura 5, o efeito Compton ocorre quando há uma dispersão de fótons devido ao fato da energia do fóton ser superior à necessária para ejetar um elétron. O fóton incidente neste efeito, é desviado por um elétron livre ou fracamente ligado ao átomo e este elétron livre irá receber parte da energia do fóton incidente. A outra parte da energia transforma-se em um fóton desviado (com comprimento de onda maior, isto é, energia menor do que o fóton inicial) (26).

Ocorre no alimento transformações químicas e biológicas após a penetração profunda da radiação como consequência da interação com átomos e moléculas por meios físicos (25).

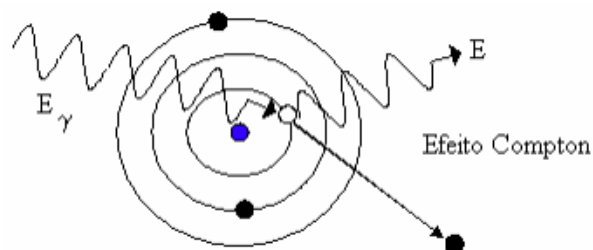


Figura 5: Efeito Compton. Retirado de (31).

4.4.3 Produção de pares

O efeito de produção de pares ocorre quando a radiação incidente é de alta energia e representa uma das formas predominantes de absorção da radiação eletromagnética de alta energia.

Dá-se a formação de um par de partículas quando o raio passa próximo de núcleos com número atômico elevado. Estas partículas que se formam e que estão demonstradas na figura 6 são um elétron e um pósitron, os dois providos de uma determinada velocidade (9,27).

Posteriormente ocorre uma transmissão de energia cinética para o meio material, por parte das duas partículas produzidas, do qual o pósitron se recombina com um elétron do meio e gera dois fótons. Além do nível de energia da radiação, o número atômico e a massa atômica também contribuem na probabilidade da ocorrência deste fenômeno (9,27).

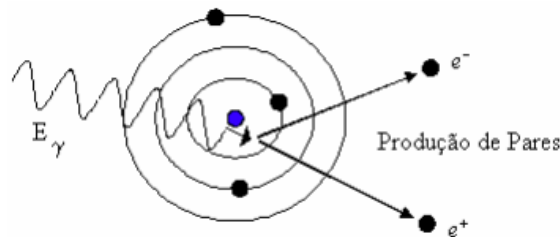


Figura 6: Produção de pares. Retirado de (31).

4.5 Principais técnicas de irradiação em alimentos

Com a aplicação da técnica de irradiação para a conservação de alimentos, aparece a necessidade de uma terminologia que fizesse referência às doses utilizadas nos alimentos. Assim sendo, em 1964, um grupo de microbiologistas definiu as terminologias radapertização, radurização e radicidação (14). Dependendo da dose de irradiação que se aplica em cada uma das técnicas, tem-se um efeito de pasteurização ou esterilização, como mostra a tabela 2.

Na radapertização (figura 7) utilizam-se doses 10 kGy acima da dose permitida, tendo em conta que tem como objetivo a esterilização do produto, o que por outro lado pode causar alterações sensoriais e nutricionais no alimento (25). Com esta dose, os alimentos são então considerados estéreis comercialmente e como exemplo temos carne embalada, frangos, produtos de origem marinha, alimentos preparados, dietas hospitalares, aditivos alimentares e outros (14).



Figura 7: Carnes produzidas pela Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA, USA) que foram irradiadas (radapertização) Retirado de (6).

O processo de radurização (figura 8) visa a redução do número de leveduras, fungos e bactérias não esporoladas para prolongar a vida de prateleira do produto e por isso são aplicadas doses relativamente baixas, entre 0,75 a 2,5 kGy. Esta dose é geralmente empregue em produtos naturais como especiarias, legumes, temperos, chás e substâncias vegetais secas para condimentos (2,13).



Figura 8: Batatas que receberam uma dose baixa de radurização. Adaptado de (6).

Tabela 2: Efeito da irradiação nos alimentos. Adaptado de (31).

<i>Tipo de Tratamento</i>	<i>Aplicação</i>	<i>Dose (kGy)</i>	<i>Alimentos</i>
<i>Radurização</i>	<p>Inibição da germinação</p> <p>Retardo da maturação</p> <p>Morte ou esterilização sexual de insetos e parasitas para substituição do período de quarentena;</p> <p>Prevenção da disseminação de pestes e insetos transmissores de doenças</p>	Até 1 kGy	Batata, cebola, alho, cereais, farinha e frutas
<i>Radicação ou Radiopasteurização</i>	<p>Redução da população de bactérias e fungos</p> <p>Destruição de microrganismos e patógenos</p> <p>Aumento do tempo de armazenamento</p>	1 – 10 kGy	Carne, peixe, mariscos, legumes, frutas e especiarias
<i>Radapertização ou Esterilização Comercial</i>	<p>Esterilização industrial</p> <p>Descontaminação de microrganismos, incluindo patógenos</p>	10 – 50 kGy	Carnes, dietas hospitalares e outros produtos processados

A radicação (figura 9) tem como objetivo diminuir a quantidade de microrganismos patogênicos não formadores de esporos. Há utilização de doses menores que na radapertização, uma vez que as bactérias que causam toxinfecções alimentares apresentam-se menos resistentes à radiação do que as esporoladas (25). É mais utilizada em sumos e carne frescas, tendo em conta que prolonga a deterioração e aumenta o tempo de vida útil do alimento (10).

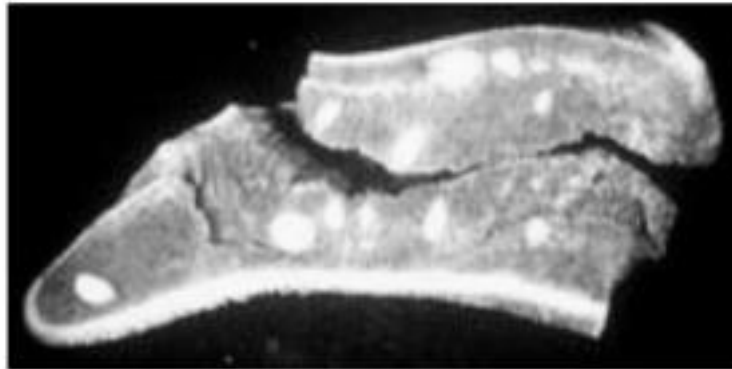


Figura 9: Carne que recebeu uma dose média de radiação. Retirado de (6).

O aumento do nível de radioatividade natural dos alimentos e a multiplicação de microrganismos que causam a decomposição dos mesmos são dois aspetos fundamentais que não podem ser observados no processo de irradiação. Quando feita em condições controladas, a irradiação não apresenta risco de radioatividade aos alimentos. Na nossa dieta diária são inevitáveis produtos provenientes do nosso ambiente e que contêm quantidades típicas (cerca de 150 a 200 Bq) de radioatividade natural. Ou seja, ainda que os alimentos fossem expostos a doses muito elevadas, o nível máximo de radioatividade induzida seria mínimo (um milésimo de Bq por quilograma de alimento). Este valor é duzentas mil vezes menor que o nível que encontramos nos alimentos que possuem radioatividade natural e isso prova a segurança do alimento irradiado no que diz respeito à radioatividade (6).

4.6 Alterações químicas, físicas e nutricionais nos alimentos irradiados

Segundo a IAEA, a irradiação impede a divisão de células vivas como bactérias e células de organismos superiores, pois altera suas estruturas moleculares, além de inibir a maturação de alguns vegetais ao induzir alterações bioquímicas nos processos fisiológicos dos tecidos (28). O processo de irradiação leva a alterações químicas mínimas nos alimentos que não são nocivas ou perigosas, e por isso a OMS aconselha sua aplicação e uso. Fatores como a dose a qual o

alimento é submetido, o tipo de alimento, sua embalagem e condições de processamento (como a temperatura durante a irradiação) e o tempo de armazenamento são responsáveis pela variação do valor nutritivo causada pela irradiação (28).

Alterações organoléticas a nível do sabor e da textura podem surgir como consequência da aplicação de altas doses de radiação, especialmente em alimentos de origem animal, como laticínios. No caso de frutas e vegetais frescos, ocorre um amolecimento dos mesmos devido à radiação (17).

Embora induza alterações químicas insignificantes nos alimentos, quando devidamente controlado, o tratamento por irradiação não altera fisicamente a aparência, a forma ou a temperatura dos produtos (29).

O uso da radiação pode afetar os seguintes constituintes dos alimentos: as proteínas, hidratos de carbono e lípidos (27).

4.6.1 Efeito nas proteínas

A irradiação mesmo que em doses baixas, costuma atuar nas proteínas que sofrem *unfolding*, coagulação e divisão de aminoácidos. Este efeito é utilizado para provocar *unfolding* na molécula da proteína, aumentando assim sua capacidade para mais reações, embora seja considerado um efeito indesejável (25).

As ligações peptídicas são as menos propensas aos efeitos da irradiação, enquanto que os principais efeitos ocorrem nas pontes dissulfureto e nas pontes de hidrogénio (25).

O efeito da radiação nas proteínas afeta não só a estrutura das mesmas bem como as suas propriedades funcionais e temos como exemplo disso o ovo, em que a dose essencial para eliminação da *Salmonella* provoca a eliminação da viscosidade da clara, além de proporcionar sabores não desejáveis na gema (30).

4.6.2 Efeito nos lípidos

O efeito da irradiação nos lípidos provoca alterações de aroma e sabor no alimento. Ocorre a produção de hidroperóxidos, como no processo de auto oxidação, que serão responsáveis pelo surgimento de aromas e sabores desagradáveis, especialmente nos casos em que a irradiação ou armazenamento posterior for realizado na presença de oxigénio. Existe a possibilidade de minimização deste efeito indesejado através da irradiação de alimentos congelados, apesar de não ser recomendada a irradiação de alimentos com alto teor de lípidos (2).

Para além da auto oxidação, também poderá ocorrer uma decomposição radiolítica nos lípidos, sobretudo nos ácidos gordos insaturados, por via de uma quebra preferencialmente na posição do carbono funcional da dupla ligação. Esta decomposição promove a formação de alguns compostos voláteis que são responsáveis pelos odores indesejáveis (9).

4.6.3 Efeito nos hidratos de carbono

O uso da irradiação nos hidratos de carbono provoca normalmente a quebra em unidades menores dos mesmos. Por ter como consequência a quebra da parede celular, este processo é responsável, por exemplo, pelo amaciamento de frutas e outros vegetais. Este efeito depende da variedade e estágio de maturação do vegetal (27).

Nas frutas, a aplicação da irradiação apresenta algumas desvantagens, pois pode ocorrer o escurecimento, amolecimento e aparecimento de depressões superficiais, além do amadurecimento anormal e perda de aroma e sabor dos produtos, dependendo da dose que se utiliza (31).

4.6.4 Efeito nas vitaminas

A sensibilidade que as vitaminas apresentam em relação à irradiação é variável e depende de fatores como a dose recebida, o tipo e o estado físico do alimento (32). Na irradiação, algumas vitaminas como a tiamina e vitaminas A, C, E e K são relativamente lábeis enquanto que outras como a riboflavina, niacina e vitamina D, são bastante estáveis (27).

Quando a irradiação é feita na presença de oxigénio ocorre a degradação de vitaminas, nomeadamente a vitamina A, B12, C, E, K e tiamina, que é bastante estável.

As vitaminas C e B também podem ser parcialmente afetadas pela irradiação, sendo que as perdas de vitamina estão normalmente associadas à exposição de doses altas e irreais, ou em condições irreais (9).

Os efeitos da radiação na água dos alimentos apresentam especial interesse, uma vez que a água constitui o principal componente dos alimentos. Ao serem irradiadas, as moléculas da água sofrem radiólise e a radiação ionizante ao penetrar no tecido vivo, produz iões altamente reativos devido à remoção dos eletrões das moléculas da água (10).

O processo de radiólise dá-se quando há formação de radicais livres provenientes da água do alimento irradiado. Estes radicais livres reagem entre si e com outras moléculas e são geralmente responsáveis pelo aroma e sabor desagradáveis nos alimentos. Estas alterações de

sabor e aroma nos alimentos podem ser reduzidas quando a irradiação é feita em anaerobiose ou abaixo da temperatura de congelamento, embora estas condições apresentem menos nocividade aos microrganismos (33).

A irradiação pode ter um efeito direto sobre os organismos e produtos alimentícios, causado por espécies reativas de oxigênio oriundos da radiólise da água ou indireto quando a radiação ioniza uma molécula vizinha, que por sua vez reage com o material genético (o dano aos ácidos nucleicos) (16).

De uma forma geral, os macronutrientes alimentares (hidratos de carbono, proteínas e lípidos), bem como a maioria dos micronutrientes (principalmente as vitaminas hidrossolúveis e lipossolúveis) quando sujeitos a doses ionizantes no intervalo de 10 kGy não sofrem alterações significativas em relação ao seu conteúdo de nutrientes. Por outro lado, a irradiação de lípidos em altas doses e principalmente na presença de oxigênio pode gerar produtos de oxidação que apresentam odores e sabores indesejáveis (ranço), como já visto anteriormente. Entretanto, este fenómeno é passível de ser contornado pela remoção de oxigênio e/ou pelo congelamento do alimento antes da irradiação (16).

Entre os micronutrientes, a tiamina adquire grande importância devido à sua sensibilidade relativamente alta aos efeitos da radiação. Alimentos que contêm tiamina (por exemplo, carne de porco) são adequados como indicadores de segurança alimentar em relação ao tratamento de irradiação (34).

4.7 Efeitos da radiação nos microrganismos

A irradiação pode ter um efeito direto sobre os microrganismos, causado por espécies reativas de oxigênio oriundos da radiólise da água ou indireto quando a radiação ioniza uma molécula vizinha, que por sua vez reage com o material genético (o dano aos ácidos nucleicos) (16).

A inativação de microrganismos por radiação ionizante é altamente dependente desta dose. Existem bactérias patogénicas que possuem elevada sensibilidade às radiações ionizantes, como por exemplo a *E.coli.* e *Salmonellae* e, portanto, doses inferiores a 10 kGy são suficientes para eliminá-las de forma eficaz (4).

Entre os organismos mais resistentes à ionização podemos destacar os vírus de DNA pequenos e simples. Em seguida, devido ao seu citoplasma pouco hidratado, vêm os esporos bacterianos ou fúngicos, seguidos por células vegetativas de bactérias, fungos e leveduras numa faixa de dosagem relativamente ampla. Quando se trata das funções vitais dos insetos, as doses necessárias serão menores. Germes de bulbos e tubérculos, que são exemplos de parasitas e

meristemas de plantas, são habitualmente mais sensíveis à radiação ionizante. Os humanos aparecem no final da escala, pois possuem um DNA muito mais complexo e um citoplasma celular altamente hidratado (35).

A resposta à radiação por parte de microrganismos, bactérias, bolores, leveduras, etc., acontece de uma forma específica e esta especificidade é normalmente quantificada como “dose de redução decimal” ou valor de D10 e é traduzida como a quantidade de radiação necessária para destruir 90% da população inicial ou reduzi-la em um ciclo logarítmico, ficando uma fração sobrevivente de 10% (24).

Pode-se considerar então que, num alimento em que a população inicial é N_0 , a população após irradiação, com a dose D , será N . D . Este valor pode ser calculado de acordo com a seguinte equação (36):

$$D_{10} = D / (\log N_0 - \log N) \quad (2)$$

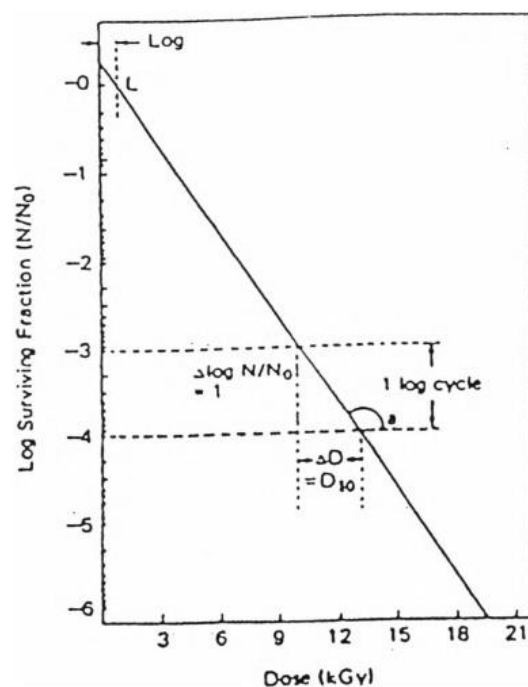


Figura 10: Sobrevivência microbiana versus dose de irradiação. Retirado (24).

Na figura 10, os eventuais desvios à reta podem estar relacionados com diversos fatores que influenciam a suscetibilidade dos microrganismos à radiação. De entre os fatores, destacam-se a dose de radiação aplicada, o ambiente e o tipo de organismo (dimensão, número e idade das células), a temperatura e a presença ou não de oxigênio, o estado físico do alimento e a população inicial (9).

4.8 Principais vantagens e limitações da irradiação de alimentos

A técnica da radiação ionizante inicialmente foi utilizada para a esterilização de dispositivos médicos, embora atualmente seja utilizada como uma medida de intervenção em saúde pública no controlo de doenças (37).

O reconhecimento do tratamento do alimento com radiação ionizante está cada vez mais presente, pois é visto como um método de redução de patologias e das despesas em saúde resultantes das mesmas, tendo em conta que promove a inativação de microrganismos causadores de doenças em aves domésticas, carnes vermelhas, peixes e mariscos. O processo de decomposição no alimento não pode ser revertido por esta técnica, assim como acontece noutros métodos de conservação de alimentos, mas contribui para a diminuição de perdas pós-colheita de frutas, grãos e especiarias, além de aumentar a “vida de prateleira” do alimento (38). Existe uma dose mínima a ser respeitada para cada aplicação de irradiação nos alimentos, a fim de se obter o efeito pretendido (23). A tabela 3 mostra as aplicações da irradiação de alimentos que são geralmente organizadas em três categorias de acordo com o intervalo da dose administrada.

Em qualquer aplicação de processamento de alimentos, a dose real de radiação utilizada traduz um balanço entre a quantidade necessária para produzir um resultado desejado e a quantidade que o produto pode tolerar sem sofrer alterações indesejadas (23).

A maioria dos microrganismos e todos os insetos que causam danos a produtos frescos como peixes, carnes, frutas, vegetais e seus produtos são sensíveis à irradiação de baixa dosagem, o que contribui para a redução da perda de alimentos. Assim, irradiar o alimento com uma dose entre 1 e 5 kGy resulta em desinfestações de insetos e uma redução de microrganismos causadores de doenças, aumentando a vida útil do alimento (16).

As alterações químicas provenientes do processo de irradiação nos alimentos são mínimas e, portanto, não são nefastas ou de risco à saúde, o que faz com que a sua aplicação e uso sejam recomendados pela OMS. O tratamento por irradiação também não altera a aparência física dos alimentos, quando devidamente controlado, nem a forma ou a temperatura dos mesmos, permanecendo apenas alterações químicas insignificantes (28). As alterações organoléticas, por exemplo, são desencadeadas por altas doses de radiação, especialmente em alimentos de origem animal, como laticínios. Ao se tratar de frutas e vegetais frescos, o que se observa é um amolecimento e aumento da permeabilidade do tecido devido à radiação (23).

Tabela 3: Requisitos de dose para alguns usos típicos de irradiação de alimentos. Adaptado (3).

<i>Nível da Dose</i>	<i>Objetivo</i>	<i>Tipo de Alimento</i>
<p>1. Dose baixa</p> <p><i>Desinfestações / retardo de amadurecimento (até 1 kGy)</i></p>	<p>Inibe o crescimento de brotos de batatas e outros alimentos.</p> <p>Elimina insetos e larvas em trigo, farinha, frutas e vegetais após a colheita.</p> <p>Retarda o processo de amadurecimento.</p> <p>Elimina certos parasitas prejudiciais presentes em alimentos</p>	<p>Batatas, cebolas, alho, gengibre, banana, mangas e certas outras frutas não cítricas, cereais e leguminosas, vegetais desidratados, peixe seco e carne, carne de porco fresca.</p>
<p>2. Dose Média</p> <p><i>Pasteurização (1-10 kGy)</i></p>	<p>Reduz drasticamente o número ou elimina certas bactérias e parasitas que causam a deterioração dos alimentos.</p> <p>Reduz ou elimina muitos microrganismos patogénicos.</p>	<p>Peixe fresco, morangos, uva, legumes desidratados, frutos do mar frescos ou congelados, aves cruas ou congeladas e carnes.</p>
<p>3. Dose Alta</p> <p><i>Esterilização (10-50 kGy)</i></p>	<p>Esteriliza alimentos para uma variedade de usos, como refeições para pacientes em hospitais que sofrem de doenças imunológicas e podem comer apenas alimentos livres de bactérias.</p> <p>Elimina alguns vírus causadores de doenças.</p> <p>Descontamina certos aditivos e ingredientes alimentares.</p>	<p>Carnes, aves, frutos do mar refeições esterilizadas para dietas hospitalares, especiarias, preparações enzimáticas, pastilhas naturais.</p>

A avaliação dos efeitos químicos e físicos provocados pela interação da radiação ionizante com o produto irradiado é indispensável em alimentos tratados por irradiação. A rotulagem deste tipo de alimentos tem sido exigida pela legislação e pelo mercado consumidor e isto tem servido de incentivo para a realização de diversos estudos focados em definir se o alimento foi ou não irradiado e, em caso afirmativo, determinar qual a dose recebida (39).

Por outro lado, a tecnologia de irradiação de alimentos também apresenta as suas desvantagens, nomeadamente a nível económico e de infraestruturas. Assim como outros processos físicos

alimentares, a irradiação tem alto custo de capital e requer capacidade crítica e volume do produto para operação econômica (16).

A tecnologia de irradiação de alimentos também apresenta as suas desvantagens e as principais são a nível econômico e de infraestrutura. Assim como outros processos físicos alimentares, a irradiação tem alto custo de capital e requer capacidade crítica e volume do produto para operação econômica (16).

O seu alto custo de implementação ligado à falta de consumidores e à cultura contrária a irradiação, o que dificulta ainda mais sua implantação. Além disso, este processo não pode ser aplicado em todos os tipos de alimentos, como por exemplo, nos alimentos que por consequência podem sofrer rancificação oxidativa devido ao seu alto teor de gordura. Também há possibilidade de aquisição de resistência à radiação por parte de certos microrganismos e da perda nutricional no alimento. Alimentos líquidos como o leite podem ganhar um sabor desagradável, visto que são mais propensos à radiólise (16).

A radiação também é capaz de alterar as propriedades químicas e mecânicas nos materiais das embalagens, uma vez que é capaz de desencadear modificações na estrutura das mesmas (25).

Uma melhor avaliação da migração de produtos de radiólise dos polímeros para o alimento permitirá adequar os materiais de embalagem de alimentos e adjuvantes destinados ao uso durante a irradiação de alimentos pré-embalados (5).

4.9 Aspectos legais, questões de segurança e informação aos consumidores

É necessário haver regulamentação nos países onde a irradiação é permitida para que se faça o licenciamento da planta das instalações, dos materiais radioativos ou do processo em si. Isto tudo para garantir a proteção contra radiação, segurança ambiental, saúde e segurança gerais durante a operação, além de favorecer a retirada segura de quaisquer materiais que possam ser causadores de perigo no fim da operação. No entanto, existe uma variação considerável de país para país acerca da regulamentação governamental sobre a irradiação de alimentos. Por norma, cada país adota a sua própria abordagem para a introdução, aprovação e regulamentação da tecnologia para a produção de alimentos (5).

É necessário que haja uma determinação por parte das agências reguladoras quantos aos alimentos que podem ser tratados por irradiação e para que finalidades específicas. Também deve ser estabelecida a quantidade exata de radiação que se deve utilizar no processamento de cada tipo de alimento para atingir o efeito desejado (5).

Existe um acordo entre especialistas de comitês internacionais sobre o limite da dose de irradiação (10 kGy) em que os alimentos são considerados seguros e saudáveis para consumo após tratamento. Apesar disso, não há em nenhum país a aprovação para irradiação de todos os alimentos até esse limite. A maioria dos países aprova a irradiação de alimentos caso a caso (5). Desde o início do século XX que é estudada a utilização da radiação ionizante na esterilização de alimentos e esta encontra-se regulamentada pela FDA desde 1963 (15).

A *Codex Alimentarius Commission*, sob a proteção da FAO e da OMS, publicou em 1984 o “Codex Padrão Geral para Alimentos Irradiados e Código de Prática Internacional Recomendado para o Funcionamento de Instalações de Radiação Utilizadas para o Tratamento de Alimentos”. A publicação deste documento teve uma profunda influência em novos desenvolvimentos internacionais e formou a base da legislação em muitos países (40).

A partir de 1997, após estudos comprovarem que a técnica não é prejudicial à saúde, a OMS aprovou a utilização da técnica para todo tipo de alimento (15).

As agências reguladoras também devem levar em consideração a inclusão na rotulagem dos alimentos irradiados informação sobre o processo. Um alimento que foi tratado com radiação ionizante deve ser rotulado de forma a indicar esse fato, segundo a Norma Geral do *Codex Alimentarius* para Rotulagem de Alimentos Pré-embalados (23).

Em 2010, cerca de 9264 toneladas de alimentos foram irradiadas na União Europeia e pelo menos 10 países fizeram aplicações comerciais de irradiação de alimentos. Entre estes países podemos destacar a Bélgica, França e Holanda (41).

A aplicação da irradiação em alimentos em Portugal é feita numa única instalação, um número muito inferior a países como os USA e a China, que possuem 50 e 70 instalações, respetivamente. As especiarias e os vegetais desidratados são os principais alimentos irradiados em Portugal, de acordo com o Decreto-Lei nº 337/2001 (onde apenas estes alimentos se encontram vinculados à lista de géneros alimentícios que podem ser tratados por radiação ionizante em Portugal) (12).

Além da indicação da instalação autorizada onde foi feita a irradiação, os produtos expostos à radiação devem abranger uma das seguintes referências «Irradiado», «Tratado por irradiação» ou «Tratado por radiação ionizante», bem como deverão estar devidamente rotulados com o símbolo “RADURA” (42).

As autoridades governamentais responsáveis pela segurança da irradiação de alimentos e de outras aplicações da irradiação determinam a regulamentação e supervisão das plantas de irradiação de alimentos e o tipo de análise dado a todas as operações de processamento de produtos alimentícios. Assim sendo, um sistema duplo de controlo garantirá que a irradiação

de alimentos não apresente riscos indevidos aos trabalhadores, consumidores ou meio ambiente (23).

A utilização da irradiação como processo alimentar comercial depende da sua aceitação pelos consumidores. Estes por sua vez, são conservadores e relutam em aceitar produtos processados por novas tecnologias, como o método de irradiação de alimentos. Tudo isto deve-se ao fato de existir uma falta de compreensão do processo e ao medo e confusão sobre a radiação em si por parte da população em geral (20).

A aceitação do consumidor tem como base um método de tomada de decisão onde se avaliam os riscos/benefícios adquiridos da técnica de irradiação de alimentos em relação a outras alternativas existentes. Os fatores que comumente influenciam a aceitação estão relacionados às necessidades, crenças e atitudes do consumidor individual e à natureza do ambiente económico, político e social em que as escolhas alimentares acontecem (5).

Apesar de haver documentação científica sobre os benefícios e a segurança da irradiação de alimentos, a conscientização do público sobre essas informações tem sido limitada. Consequentemente, os consumidores rejeitam a irradiação de alimentos devido à confusão sobre o que é irradiação de alimentos (5).

A segurança, nutrição, deteção e rotulagem de produtos irradiados apresentam-se como as principais preocupações das organizações de consumidores. A segurança do processo é a chave da preocupação com a irradiação de alimentos. Deste modo, a apresentação de informações sobre a irradiação de alimentos em segurança com declarada evidência científica (acumulada ao longo de décadas e investigação) tem permitido abordagens positivas por parte do consumidor (20).

Embora os alimentos irradiados devam estar devidamente identificados com o símbolo "RADURA", como já mencionado anteriormente, esta prática não é exigida em todos os países. Nos EUA, foi estabelecida a obrigatoriedade de rotular alimentos irradiados com a identificação "Tratado com irradiação" ou "Tratado por irradiação", tornando-se necessário utilizar no ponto de venda o logotipo RADURA (figura 12). No entanto, em alguns países, particularmente na União Europeia permitem seu uso opcional (3,43).



Figura 11: Símbolo internacional da irradiação em alimentos. Retirado (46).

É extremamente importante haver informação ao consumidor sobre os tratamentos alimentares, sobretudo para os tratamentos que nem sempre são universalmente bem aceites. No caso da radiação ionizante, informações sobre sua aplicação ao alimento e/ou a um dos ingredientes do alimento são obrigatórias (43,44).

Os níveis de aceitação de alimentos irradiados por parte do consumidor variam muito entre os países, mas existem aqueles em que se observa uma maior evolução, como é o caso da América do Norte (43,44). A avaliação dos benefícios dos alimentos irradiados é a base da educação do consumidor. Resultados de estudos mostraram que após a receção da informação sobre os benefícios do produto; segurança e salubridade; questões de segurança ambiental; e aprovação pelas autoridades de saúde reconhecidas, os consumidores desenvolvem uma atitude positiva em relação à irradiação de alimentos (5).

5. Conclusão e perspectivas futuras

A irradiação de alimentos constitui um dos métodos não térmicos de conservação de alimentos. O processo consiste em expor o alimento a quantidades controladas de radiação ionizante, quer seja este embalado ou a granel. O objetivo é a extensão da vida útil, desinfeção de insetos, eliminação de patógenos e parasitas transmitidos por alimentos.

A radiação ionizante é capaz de alterar as estruturas moleculares, impedindo a divisão de células vivas através da aplicação de radiação do tipo gama, raios X ou feixe de eletrões, promovendo assim a conservação dos alimentos. A avaliação dos efeitos químicos, físicos e sensoriais causados pela interação da radiação ionizante com o alimento no emprego deste processo tecnológico é indispensável.

O método de irradiação, conforme até agora visto, apresenta vantagens e limitações, assim como nos outros processos de conservação de alimentos.

Quando comparado a outros métodos de processamento, como o calor e métodos químicos, é considerado um método mais eficaz e apropriado para aumentar a estabilidade e segurança alimentar, além de não reduzir a qualidade nutricional e sensorial dos alimentos em doses mais baixas de forma notória.

A segurança da aplicação da energia ionizante em alimentos, apesar de já ter sido comprovada, de ser permitida sua utilização em diversos países e ser cientificamente aceita como excelente método de conservação de alimentos, o seu progresso comercial tem sido lento face às interpretações equivocadas dos consumidores e à ausência de informações sobre o uso desta tecnologia.

Apesar disso, as vantagens que a tecnologia apresenta superam as desvantagens do processo, uma vez que a irradiação de alimentos possui elevado potencial para ser propagada de forma contínua pela indústria de alimentos.

Numa perspectiva futura, a realização de estudos focados mais diretamente nas questões relacionadas às expectativas do consumidor faria com que houvesse o desenvolvimento de uma melhor compreensão sobre alimentos irradiados, principalmente na Europa onde o progresso da aplicação da técnica ainda é lento. Isto deve-se ao fato de não haver uma promoção ativa do uso desta tecnologia por parte das autoridades de saúde, como ocorre em alguns países como os EUA. Neste sentido, a utilização de estratégias de marketing e informativas mais eficazes, bem como a expansão da aplicação comercial da irradiação de alimentos, também surgem como meios de se conseguir uma melhor aceitação desta e de novas tecnologias no mercado de amanhã.

6. Referências Bibliográficas

1. Rahman MS. Food Preservation and Processing Methods. *Handb Food Process Des.* 2012;I(1):1–17.
2. Filho TL, Teixeira LJQ, da Rocha CT, Ferreira GAM, de Souza MC. Energia ionizante na conservação de alimentos: Revisão. *Bol Cent Pesqui Process Aliment.* 2012;30(2):243–54.
3. Shah MA, Mir SA, Pala SA. Enhancing Food Safety and Stability Through Irradiation: a Review. *J Microbiol Biotechnol Food Sci.* 2017;7(3):371–8.
4. Andrade ME. Conservação de Alimentos por Radiações Ionizantes. In: *Radioproteção.* 1st ed. Sacavém: Sociedade Portuguesa de Protecção Contra Radiações; 2014. p. 29–42.
5. Morehouse KM, Komolprasert V. Irradiation of food and packaging: An overview. *ACS Symp Ser.* 2004;875(1):1–11.
6. Couto RR, Graduanda E, Santiago AJ. Radioatividade e irradiação de alimentos. *RECEN - Rev Ciências Exatas e Nat.* 2010;12(2):193–215.
7. IAEA. International Atomic Energy Agency. 2012.
8. Ornellas CBD, Gonçalves MPJ, Silva PR, Martins RT. Atitude do consumidor frente à irradiação de alimentos. *Cienc e Tecnol Aliment.* 2006;26(1):211–3.
9. Diana V, Rufino J, Nunes C, Mendes N. *Utilização Da Irradiação No Tratamento De Alimentos.* Coimbra; 2010.
10. Rodrigues G. *Panorama E Perspectiva Do Uso De Irradiação Na Conservação De Alimentos.* Universidade Federal De Uberlândia; 2019.
11. Molins RA, Motarjemi Y, Käferstein FK. Irradiation: A critical control point in ensuring the microbiological safety of raw foods. *Food Control.* 2001;12(6):347–56.
12. Ministério da Agricultura do DR e das P. Decreto-Lei nº 337/2001. *Diário da República nº 297/2001.* 2001. p. 8434–7.
13. Diehl JF. Food irradiation - Past, present and future. *Radiat Phys Chem.* 2002;63(3–6):211–5.
14. Souza S, Carem C, Fontainha P. *Uso Da Radiação Gama Nos Alimentos Para O Combate À Escherichia Coli.* Pontifícia Universidade Católica de Goiás; 2014.
15. Sugiyono PD. Aceitação De Alimentos Irradiados: Uma questão De Educação. *J Chem Inf Model.* 2016;53(9):1689–99.
16. Kebede G, Simachew A, Disassa H, Kabeta T, Zenebe T. Review on Radiation as a Means of Food Preservation and its Challenge. *Acad J Nutr.* 2015;4(2):77–83.
17. Nabilghobril C. *Gestão tecnológica para instalação de um irradiador de alimentos no Vale do Ribeira.* Autarquia associada à Universidade de São Paulo; 2008.
18. Hirneisen KA, Black EP, Cascarino JL, Fino VR, Hoover DG, Kniel KE. Viral Inactivation in Foods: A Review of Traditional and Novel Food-Processing Technologies. *Compr Rev Food Sci Food Saf.* 2010;9(1):3–20.
19. Martins D. *Uso Da Irradiação Na indústria De Alimentos.* Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais; 2016.

20. Ahari H, Mahyar S, Fathollahi H. The Potential of Food Irradiation: Benefits and Limitations. *Trends Vital Food Control Eng.* 2012;I(April 2012):44–68.
21. Tahergorabi R, Matak KE, Jaczynski J. Application of electron beam to inactivate Salmonella in food: Recent developments. *Food Res Int.* 2012 Mar;45(2):685–94.
22. Sadler G, Chappas W, Pierce DE. Evaluation of e-beam, γ - and X-ray treatment on the chemistry and safety of polymers used with pre-packaged irradiated foods: A review. *Food Addit Contam.* 2001;18(6):475–501.
23. Bentley D. Book Review: Food Irradiation. A Technique for Preserving and Improving the Safety of Food. *Nutr Health.* 1990;6(4):206–206.
24. Mclaughlin WL, Desrosiers MF. Dosimetry systems for radiation processing. *Radiat Phys Chem.* 1995;46(4-6 PART 2):1163–74.
25. Neves G. Panorama do Uso De Radiação No Processamento De Alimentos. Centro Universitário Facvest - Unifacvest; 2019.
26. Da Silva RC, Da Silva RM, Da Silva Aquino KA. The interaction of gamma radiation with matter in the process of sterilization. *Rev Virtual Quim.* 2014;6(6):1624–41.
27. Souza AS de. Efeitos Da Irradiação Na Composição E Propriedades Funcionais Da Soja. Universidade Estadual De Campinas; 2006.
28. da Silva ALF, da Roza CR. Uso da irradiação em alimentos: Revisão. *Bol Cent Pesqui Process Aliment.* 2010;28(1):49–56.
29. Verruma-Bernardi MR, Spoto MHF. Efeito da radiação gama sobre o perfil sensorial de suco de laranja. *Ciência e Tecnol Aliment.* 2003;23(1):28–32.
30. Cieśla, K., Roos, Y., & Głuszewski W. Denaturation processes in gamma irradiated proteins studied by differential scanning calorimetry. *Radiat Phys Chem.* 2000;58(3):233–43.
31. Chitarra, M. I. F.; Chitarra AB. Pós-colheita de frutas e hortaliças. Lavras:FAEPE. Embrapa Hortaliças (CNPq); 1990. 293 p.
32. Fellows PJ. Tecnologia do Processamento de alimentos: princípios e prática. 2.ed. Artmed PA, editor. 2006. 602 p.
33. Franco, B. D. G. M.; Landgraf M. Microbiologia dos Alimentos. Atheneu; 2008. 182 p.
34. Miller RD. Electronic irradiation of foods: Combined effects of antimicrobial coating, Introduction to the Technology. NY: Springer; 2005. 295 p.
35. Munir MT, Federighi M. Control of Foodborne Biological Hazards by Ionizing Radiations. *Foods.* 2020;9(7):878.
36. Mariano CO. Efeitos Da Radiação Gama Na Conservação Da Carne Bovina Refrigerada. Universidade de São Paulo; 2004.
37. Rodrigues Júnior A. Vidro Comercial Como Detector E Mediador DE Radiação Num Irradiador DE Grande Porte. Autarquia associada à Universidade de São Paulo; 2000.
38. Almeida APG. Avaliação Da Influência Do Processo De Irradiação Em Especiarias Utilizando A Técnica De Difração De Raios X. *J Chem Inf Model.* 2006;53(9):1689–99.
39. Leal AS, Krambrock K, Guedes K, Rodrigues RR. Ressonância paramagnética eletrônica-RPE aplicada à análise de especiarias irradiadas (com radiação gama).

- Ciência e Tecnol Aliment. 2004;24(3):427–30.
40. Nordion. The History of Food Irradiation. Nordion. Ottawa; 2010.
 41. Maherani B, Hossain F, Criado P, Ben-Fadhel Y, Salmieri S, Lacroix M. World Market Development and Consumer Acceptance of Irradiation Technology. *Foods*. 2016;5(4):79.
 42. Alimentar, Base de Dados de Qualidade e Segurança A e H. Irradiação de alimentos: sim ou não? [Internet]. Qualfood. 2019 [cited 2020 Sep 1]. Available from: <http://www.qualfood.com/noticias/item/1379-irradiacao-de-alimentos-sim-ou-nao>
 43. Marcotte, M; Kunstadt P. Radiation Physics and Chemistry. *Chem Rev*. 1993;42:307–11.
 44. Kunstadt P. Industrial application of electron accelerators in G.D.R. *Rad Phys Chem*. 1990;35(4–6):248–52.