

RADIAÇÃO IONIZANTE E SUAS APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA

PINO, E. S. ⁽¹⁾; GIOVEDI, C. ⁽²⁾

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares ⁽¹⁾

Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – 05508-000 – São Paulo – SP – Brasil

Centro Universitário Lusíada (UNILUS) ⁽²⁾

Rua Armando Salles de Oliveira, 150 – 11050-071 – Santos – SP – Brasil

Fone (13) 3235-1311; Fax (13) 3221-4488

espino@ipen.br ⁽¹⁾; cgiovedi@hotmail.com ⁽²⁾

Resumo

Radiação ionizante é a radiação transmitida por partículas de alta energia (partículas alfa, prótons, elétrons, nêutrons) ou ondas eletromagnéticas (raios X, raios gama) que possui energia suficiente para remover elétrons de valência de um átomo, produzindo conseqüentemente a sua ionização. Os principais tipos de radiação ionizante utilizados na indústria são os raios X, os raios gama (γ) e o feixe de elétrons. A interação de elétrons e fótons altamente energéticos com a matéria pode provocar os seguintes efeitos: ionização dos átomos que compõem o material devido ao deslocamento dos elétrons orbitais, excitação devido ao deslocamento de elétrons dos átomos para níveis energéticos superiores e produção de radiação eletromagnética devido ao retorno dos elétrons para seus estados de origem. As principais fontes industriais de radiação ionizante são os irradiadores de raios γ e os aceleradores de elétrons. A radiação ionizante pode ser aplicada com diferentes finalidades na indústria, dentre elas podem-se destacar: realização de ensaios não-destrutivos, modificação de materiais poliméricos, preservação e desinfestação de produtos alimentícios e esterilização de produtos farmacêuticos, médicos e cirúrgicos. O universo de possibilidades de aplicação desta técnica na indústria tende a se expandir no futuro com o desenvolvimento de equipamentos mais versáteis e econômicos.

Palavras-chave: Radiação ionizante. Aplicações industriais. Acelerador de elétrons. Irradiador gama.

1 INTRODUÇÃO

Radiação é a propagação de energia sob várias formas. Pode ser dividida, geralmente, em dois grupos: radiação corpuscular e radiação eletromagnética.

Radiação ionizante é a radiação transmitida por partículas de alta energia (partículas alfa, prótons, elétrons, nêutrons) ou ondas eletromagnéticas (raios X, raios gama) que possui energia suficiente para remover elétrons de valência de um átomo, produzindo conseqüentemente a sua ionização. Tal comportamento difere do observado com outras formas de energia como, por exemplo, a luz visível, o infravermelho e a microonda que possuem energia suficiente apenas para excitar os átomos sem alterar suas estruturas eletrônicas [1].

O estudo das diversas aplicações que podem ser feitas da radiação ionizante se confunde com a própria história da radiação, ou seja, com a descoberta dos raios X por Röntgen em 1895 e da radioatividade por Becquerel em 1896. Desde então, muito tem sido feito no sentido de utilizar a radiação ionizante em diferentes segmentos visando à melhoria da qualidade de vida da população e ao desenvolvimento tecnológico [2].

Cada tipo de radiação ionizante apresenta características próprias, as quais são determinantes na definição das aplicações que delas podem ser feitas nas mais diferentes áreas, como por exemplo, indústria, agricultura e medicina.

Os principais tipos de radiação ionizante utilizados na indústria são os raios gama (γ), os raios X e o feixe de elétrons.

Os raios γ são ondas eletromagnéticas (fótons) de alta energia sem carga elétrica e sem massa, portanto extremamente penetrantes, produzidos em processos nucleares, como a fissão nuclear e o decaimento de radioisótopos. Os raios X são ondas eletromagnéticas de propriedades similares às dos raios γ diferindo destes apenas quanto à origem. Os raios γ têm origem em processos nucleares, ao passo que os raios X têm origem na desexcitação de elétrons das camadas internas dos átomos, portanto um processo extra nuclear.

Os elétrons, por sua vez, são partículas com carga elétrica negativa e massa aproximada de $9,109 \times 10^{-28}$ g.

O crescente número de aplicações da radiação ionizante na área industrial decorre da alta capacidade energética deste tipo de radiação, o que faz com que ela possa ser utilizada com diferentes finalidades visando à modificação das propriedades de materiais a ela expostos.

2 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO IONIZANTE COM A MATÉRIA

Toda matéria é afetada, de um modo ou de outro, pela radiação, ainda que com pequenas doses o efeito muitas vezes possa ser considerado desprezível.

Os materiais orgânicos são menos resistentes à radiação ionizante quando comparados a metais e materiais cerâmicos. Isto porque ao utilizar elétrons energéticos na irradiação de materiais orgânicos, ocorre a produção de íons moleculares e também, devido ao excesso de energia existente, de íons excitados. O tempo de vida destas espécies dependerá de sua estrutura molecular. Os íons positivos presentes no sistema podem capturar elétrons, liberando neste processo energia igual ao potencial de ionização dos átomos presentes. A dissociação destas espécies excitadas geralmente leva à formação de radicais livres. Portanto, a interação da radiação com materiais orgânicos pode levar à formação de íons, estados excitados e radicais livres [1].

No caso específico de sistemas biológicos e microorganismos, a ação da radiação ionizante pode ocorrer de forma indireta, ou seja, induzindo modificações nas moléculas de água que compõem os materiais, dando origem à formação de radicais livres (OH^\cdot , H^\cdot) e moléculas de peróxido de hidrogênio, as quais reagem com elementos vitais das células destes organismos. Por outro lado, a radiação ionizante pode agir diretamente na molécula de DNA, ionizando uma parte dela, ou sobre outro componente vital das células, levando à falência total do organismo, o que ocorre no caso da irradiação de microorganismos patogênicos [3].

Embora existam diversos tipos de radiação ionizante, aqui serão apenas considerados os mecanismos de interação com a matéria de elétrons e fótons energéticos (raios X e γ). Isto devido ao fato destes serem predominantemente utilizados na pesquisa das radiações e em processos industriais.

Quando elétrons energéticos interagem com a matéria, perdem energia principalmente por meio de colisões elásticas e inelásticas com os elétrons orbitais dos átomos do material irradiado, deslocando-os e conseqüentemente deixando os átomos ionizados. Alternativamente, os elétrons do átomo que compõem o material irradiado podem ser excitados, passando então a estados energéticos superiores. Neste caso, estes elétrons retornam posteriormente a seus estados de origem, emitindo fótons com energias características do material irradiado.

No caso da radiação eletromagnética (fótons), a interação com a matéria se dá por meio de um processo complexo que depende da energia da radiação e do número atômico do material irradiado. Fótons de baixas energias podem retirar elétrons orbitais fracamente ligados na estrutura atômica, ao passo que um aumento na energia associada aos fótons permite a retirada de elétrons mais fortemente ligados produzindo ionização, ou em outros casos, estados excitados do átomo alvo.

Portanto, a interação de elétrons e fótons altamente energéticos com a matéria pode provocar os seguintes efeitos: ionização dos átomos que compõem o material devido ao deslocamento dos elétrons orbitais, excitação devido ao deslocamento de elétrons dos átomos para níveis energéticos superiores e produção de radiação eletromagnética devido ao retorno dos elétrons para seus estados de origem.

3 PRINCIPAIS FONTES INDUSTRIAIS

As principais fontes industriais de radiação ionizante são irradiadores de raios γ e aceleradores de elétrons. Outra fonte de fótons energéticos utilizada na indústria, porém em menor escala, é o gerador de raios X de alta potência.

Os irradiadores de raios γ produzem esta radiação devido ao decaimento natural de radioisótopos, como por exemplo, o cobalto 60 e o cério 137. Atualmente, o cobalto 60 é o radioisótopo mais utilizado para aplicações industriais devido ao fato de ter uma vida média de decaimento ($T_{1/2}$) muito grande (5,27 anos) e alta energia (valor médio de 1,25 MeV).

Os irradiadores γ produzem radiação de forma contínua devido ao fato de se basear em um processo de decaimento natural. A energia do raio γ produzido varia de acordo com o tipo de radioisótopo utilizado. Por exemplo, fontes de cobalto 60 produzem raios γ com energia de 1,17 a 1,33 MeV. A taxa de dose, ou seja, a quantidade de energia absorvida pelo material irradiado por unidades de massa e tempo, neste caso é muito baixa, da ordem de $0,1$ a 5 kGy h^{-1} , sendo uma função da quantidade do material radioativo presente no irradiador e da posição em relação à fonte do material irradiado. Devido às características da radiação γ tem-se, utilizando estas fontes, uma penetração da ordem de cm no material irradiado.

Os aceleradores de elétrons são dispositivos que produzem feixes de elétrons com energias que podem variar de $0,1$ a 10 MeV . Estes equipamentos possibilitam uma alta taxa de dose, da ordem de 100 kGy s^{-1} , considerando-se aceleradores com energia de $1,5 \text{ MeV}$ e feixe de elétrons de 25 mA . Esta alta taxa de dose se reflete em um pequeno tempo de processamento.

Em processos industriais de irradiação, a energia dos elétrons não deve atingir valores altos o suficiente para que no processo de irradiação ocorra a interação com os núcleos dos átomos do material irradiado, o que poderá levar à sua ativação.

Os aceleradores de elétrons são equipamentos descontínuos, ou seja, podem ser ligados e desligados de acordo com as necessidades de uso.

Devido à forte repulsão coulombiana entre o feixe de elétrons gerado pelo acelerador e os elétrons orbitais dos átomos que compõem o material irradiado, o poder de penetração deste tipo de radiação ionizante é muito pequeno, da ordem de mm, dependendo da energia das partículas geradas e da densidade do material a ser irradiado.

No caso do gerador de alta potência, produzem-se raios X por meio da eficiente conversão da energia dos elétrons em radiação de frenamento (*bremstrahlung*). Isto acontece quando elétrons atingem alvos constituídos de elementos de elevado número atômico, como por exemplo, tungstênio.

Em 2001 havia no mundo todo cerca de 200 irradiadores γ e 1000 aceleradores de elétrons dedicados exclusivamente a aplicações industriais [4], desde então estes números vem aumentando consideravelmente. Estes equipamentos são utilizados com diversas finalidades, porém as áreas em que esta tecnologia é mais difundida são a modificação de

polímeros, a esterilização de materiais cirúrgicos e a irradiação de alimentos.

4 PRINCIPAIS APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA

A radiação ionizante pode ser aplicada com diferentes finalidades na indústria, dentre elas podem-se destacar: realização de ensaios não-destrutivos, modificação de materiais poliméricos, preservação e desinfestação de produtos alimentícios e esterilização de produtos farmacêuticos, médicos e cirúrgicos.

No caso da realização de ensaios não-destrutivos, utiliza-se a propriedade de penetração da radiação na matéria para a inspeção do interior de materiais e conjuntos lacrados. Podem ser inspecionados componentes de aviões, parte de navios, qualidade de soldas, entre outros. Os ensaios podem ser realizados utilizando-se fontes de raios X (radiografia) ou de raios γ (gamagrafia). Tanto no caso da radiografia quanto da gamagrafia podem ser analisadas desde folhas finas até aços com espessura aproximada de 25 cm.

A ação da radiação ionizante sobre materiais poliméricos promove principalmente dois processos: (a) reticulação (*cross-linking*), que é a formação de ligações químicas entre cadeias moleculares e (b) degradação (*scission*) das cadeias moleculares, o que leva à destruição da estrutura do polímero. Embora estes efeitos ocorram simultaneamente, sempre um deles prevalecerá sobre o outro. Os fatores que definem qual deles será preponderante são a estrutura química do polímero, a dose de radiação utilizada e as condições gerais de realização da irradiação (atmosfera, taxa de dose, tipo de radiação etc). De maneira geral, a reticulação melhora as propriedades físicas, químicas e mecânicas do material, enquanto a degradação promove a deterioração da estrutura, podendo levar à sua completa destruição [5].

Na indústria a radiação ionizante é aplicada na reticulação de polímeros visando à melhoria das propriedades térmicas, mecânicas e químicas destes materiais [4, 6]. A radiação ionizante é muito aplicada na reticulação do material de revestimento de fios e cabos elétricos a serem utilizados principalmente nas indústrias automobilística, eletroeletrônica e aeronáutica. Outra aplicação na indústria automobilística é a produção de pneus, onde a radiação é utilizada na reticulação da borracha, obtendo-se produtos com melhores propriedades estruturais e estabilidade dimensional [7].

Um grande impulso industrial tem sido dado no sentido de utilizar a radiação ionizante na cura (polimerização) de materiais poliméricos, especificamente de compósitos. Estes materiais são destinados a aplicações que requerem elevada solidez mecânica como, por exemplo, estruturas de aviões, satélites e tubulações para plataformas de petróleo [8]. As principais vantagens associadas ao uso da radiação ionizante neste caso, quando comparada a processos convencionais, são: a realização do processo a temperatura ambiente, a baixa emissão de produtos voláteis, o pouco tempo empregado e as melhores propriedades mecânicas alcançadas.

No caso da degradação, um exemplo de aplicação industrial é o tratamento com radiação ionizante de polímeros fluorados, como o

politetrafluoretileno (PTFE), comercialmente conhecido como teflon. O uso da radiação ionizante possibilita o tratamento de rejeitos e sobras de processamento deste polímero, transformando-o em pó, que é então utilizado como matéria-prima nas indústrias de tintas e lubrificantes [9].

Outro uso da radiação ionizante aplicado a polímeros é a enxertia (*grafting*) que consiste na modificação de polímeros por meio da inserção, via radiação, de monômeros na cadeia polimérica principal. Com a adição do monômero ao polímero inicial obtém-se um copolímero que passa a ter as propriedades do monômero enxertado sem prejuízo das propriedades iniciais [10].

Também é possível aplicar a radiação ionizante na indústria visando à cura de filmes poliméricos (*coatings*) para recobrimento de materiais. Assim, formulações especiais contendo um monômero são preparadas, colocadas na forma de filme sobre a superfície a ser recoberta e então irradiadas, normalmente em atmosfera inerte. Este procedimento é geralmente aplicado sobre superfícies de madeira, papel, metal e plástico [9].

Uma outra aplicação industrial da radiação ionizante que envolve polímeros é a produção de hidrogéis para uso na medicina. Hidrogéis são sistemas formados por dois componentes: um polímero, reticulado e insolúvel, e a água. Tais sistemas são capazes de absorver água até atingir um estado de equilíbrio e retê-la sem perder sua forma original. Estes materiais são utilizados com diferentes finalidades como, por exemplo, tratamento de queimaduras e diferentes tipos de lesões de pele. Seu uso diminui o tempo de cicatrização e a dor [11].

Na indústria alimentícia a radiação ionizante pode ser utilizada com diferentes finalidades: inativação de organismos nocivos, aumento do tempo de prateleira dos produtos, controle de parasitas e insetos e, inibição de brotamento. Tais fatos ocorrem devido à ação da radiação sobre a estrutura de moléculas vitais de bactérias e microorganismos, levando à sua destruição [12].

Considerando o fato de que de acordo com as características do alimento cada um reage de forma diferente ao tratamento por irradiação, deve-se seguir um procedimento específico desenvolvido especialmente para cada alimento e a finalidade do tratamento a ser realizado. Estes procedimentos devem ser seguidos adequadamente para que os alimentos não percam a consistência e características organolépticas como cor, sabor e odor [13].

A irradiação aplicada a alimentos não se resume apenas ao alimento em si, mas também a alguns tipos de embalagens. Por exemplo, as folhas de plástico laminado recobertas com alumínio são usualmente esterilizadas por meio de radiação ionizante. Essas folhas são utilizadas para produtos hermeticamente vedados e embalados em condições assépticas, tais como massa de tomate, sucos de fruta e leite. Outros materiais de embalagem asséptica também são irradiados, como por exemplo, para produtos derivados do leite, e rolhas para garrafas de vinho. Estas últimas são esterilizadas por radiação antes do enchimento e fechamento das garrafas, impedindo assim a contaminação.

A esterilização de produtos farmacêuticos, médicos e cirúrgicos baseia-se na eliminação de

microorganismos nocivos à saúde por meio da energia associada à radiação ionizante. Dentre as vantagens desta técnica destacam-se o fato de não ser necessária a utilização de calor e dos materiais já serem esterilizados embalados, eliminando assim os riscos de contaminação após a realização do procedimento. Inúmeros estudos foram realizados nesta área de modo a fixar as condições ideais para a realização deste tratamento. A dose utilizada neste caso é de 25 kGy, o que garante a presença de apenas 1 microorganismo com capacidade de se reproduzir em cada 1 milhão de peças esterilizadas, ao mesmo tempo que são mantidas as propriedades dos materiais irradiados. Esta tecnologia é amplamente difundida e dados mostram que cerca de 60 % do material cirúrgico utilizado no mundo é esterilizado por meio de radiação ionizante [14].

Também vem ganhando importância crescente nos últimos anos o uso da radiação ionizante no tratamento de gases industriais, águas residuais, lodos e esgotos. Este crescimento está intimamente ligado à busca de soluções para os graves problemas ambientais que vem deteriorando a cada dia a qualidade de vida da população. Neste caso, a radiação ionizante é utilizada para decompor produtos tóxicos, no caso do tratamento de gases e eliminar microorganismos, no caso do tratamento de águas, lodos e esgotos. Além da eliminação de resíduos tóxicos, o processo de irradiação de gases industriais contendo óxidos de enxofre e de nitrogênio, possibilita a obtenção de fertilizantes como produto final, os quais podem ser utilizados na agricultura [15].

5 CONCLUSÃO

A radiação ionizante, devido às suas características e aos efeitos que produz ao interagir com a matéria, pode ser aplicada a processos industriais de grande relevância econômica.

Atualmente, a ação da radiação ionizante tem sido amplamente aplicada na indústria visando à melhoria da qualidade de produtos devido à modificação de propriedades físicas, químicas e/ou mecânicas dos mesmos.

Além das aplicações industriais aqui apresentadas, há inúmeras outras possibilidades de utilização da radiação ionizante, as quais vêm sendo pesquisadas e poderão ser aplicadas futuramente. É o caso, por exemplo, da reciclagem de plásticos e da produção de microcomponentes eletrônicos.

Esta tecnologia apresenta um futuro promissor devido à contínua e crescente utilização dos processos já estabelecidos e às permanentes atividades de pesquisa e desenvolvimento realizadas nesta área. Tais fatos aliados ao desenvolvimento de sistemas de irradiação mais versáteis e econômicos representam um passo importante para a expansão do uso desta tecnologia em diferentes atividades industriais, bem como na área médica, na preservação do meio ambiente ou quaisquer outras atividades que visem à melhoria das condições de vida da sociedade.

6 REFERÊNCIAS

- [1]. KIRCHER, J. F.; BOWMAN, R.E. Effects of radiation on materials and components. Nova York: Reinhold, 1964.
- [2]. TUBIANA, M.; BERTIN, M. Radiobiologia e radioproteção. Rio de Janeiro: Edições 70, 1989.
- [3]. BOLT, R. O.; CARROL, J. G. Radiation effects on organic materials. Nova York: Academic Press, 1963.
- [4]. CLOUGH, R. L. High-energy radiation and polymers: A review of commercial processes and emerging applications. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. v. 185, p. 8-33, 2001.
- [5]. GIOVEDI, C.; MACHADO, L. D. B.; AUGUSTO, M.; PINO, E. S.; RADINO, P. Evaluation of the mechanical properties of carbon fiber after electron beam irradiation. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. v. 236, p. 526-530, 2005.
- [6]. IAEA (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY). Advances in radiation chemistry of polymers. Proceedings of a Technical Meeting. Indiana: IAEA, 2004.
- [7]. CHMIELEWSKI, A. G., HAJI-SAIED, M.; AHMED, S. Progress in radiation processing of polymers. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. v. 236, p. 44-54, 2005.
- [8]. BEREJKA, A., EBERLE, C. Electron beam curing of composites in North America, Radiation Physics and Chemistry. v. 63, p. 551-556, 2002.
- [9]. CHAPIRO, A. A worldwide view of radiation processing. Radiation Physics and Chemistry. v. 22, p. 7-10, 1983.
- [10]. CHAPIRO, A. Radiation induced grafting. Radiation Physics and Chemistry. v. 9, p. 55-67, 1977.
- [11]. ROSIAK, J. M. Radiation effects on Polymers. Ed. por Clough, R. L. e Shalby, S. Washington: American Chemical Society, 1991.
- [12]. IAEA (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY). Facts about food irradiation. Consultive group on food irradiation. Viena: IAEA, 1999. Disponível em: <<http://www.iaea.org/programmes/nafa/d5/public/foodirradiation.pdf>>. Acesso em: 23/05/2005.
- [13]. DIEHL, J. F. Food irradiation – past, present and future. Radiation Physics and Chemistry. v. 63, p. 211-215, 2002.
- [14]. SATO, Y.; TAKAHASHI, T.; SAITO, T., SATO, T.; TAKEHISA, M. Sterilization of Health Care Products, Radiation Physics and Chemistry, v. 42, p. 337-345, 1993.
- [15]. MACHI, S. New trends of radiation processing applications. Radiation Physics and Chemistry. v. 47, p. 333-336, 1996.

IONIZING RADIATION AND ITS APPLICATIONS IN INDUSTRY

Abstract

Ionizing radiation is the radiation transmitted by high energy particles (protons, electrons, neutrons) or electromagnetic waves (X and gamma rays) with energy to remove valence electrons of an atom, producing its ionization. The main types of ionizing radiation applied in industrial process are X rays, γ rays and electron beam. The interaction of electrons and high energy photons with the matter can

induce the following effects: ionization of atoms due to the ejection of orbital electrons, formation of excited states in which electrons are dislocated to higher atomic energetic states and production of electromagnetic radiation by a process in which excited electrons return to their original energy states. The main industrial radiation sources are gamma irradiators and electron beam accelerators. Ionizing radiation presents diverse industrial applications such as: non-destructive tests, polymer modification, preservation and de-infestation of food products and sterilization of pharmaceutical, medical and surgical products. The big scope of applications of this technology in the industry has promise expansion due to the constant technological developments and the construction of more versatile and economical radiation sources.

Keywords: Ionizing radiation. Industrial applications. Electron beam accelerators. Gamma irradiator.

