
LABORATÓRIO VIRTUAL DE FÍSICA MODERNA: ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO PELA MATÉRIA⁺*

Nelson Canzian da Silva

Departamento de Física – UFSC

Florianópolis – SC

Resumo

Este artigo descreve como foi implementada uma simulação computacional de um sistema de detecção de radiação ionizante semelhante ao encontrado em tradicionais laboratórios de física moderna. A simulação modela um sistema composto por uma "fonte" de fótons com energias que podem ser escolhidas arbitrariamente, um "detector" de comportamento semelhante a um detector Geiger-Müller e o efeito de diferentes materiais atenuadores de espessura variável posicionados entre a fonte e o detector. São discutidos os detalhes do processo de cálculo da atenuação da radiação utilizando dados do National Institutes of Standards and Technology (NIST) dos EUA e, a partir deles, são exploradas peculiaridades da interação da radiação com a matéria, de seções de choque a flutuações estatísticas; também são apresentados exemplos de uso e sugestões de atividades exploratórias. A simulação foi utilizada com duas turmas do curso de licenciatura em física a distância da UFSC no início de 2011, associadas à realização do experimento real. Permeando o texto são discutidas as motivações e os problemas do uso das simulações nesse contexto. À guisa de conclusão, é discutido como o trabalho se relaciona às principais metas dos laboratórios introdutórios de física, segundo um comitê

⁺ Modern Physics Virtual Laboratory: attenuation of radiation by matter

^{*} *Recebido: junho de 2012.
Aceito: outubro de 2012.*

da American Physical Society, especificamente constituído para isso.

Palavras-chave: *Interação da radiação com a matéria. Simulação. Modelagem. Laboratório de física moderna.*

Abstract

This paper describes how was implemented a computer simulation of an ionizing radiation detection system similar to those found in traditional modern Physics laboratories. The simulation models a system with a 'source' of photons of arbitrarily chosen energies, a 'detector' that behaves like a Geiger-Müller detector and the effect of different attenuating materials with variable thickness inserted between the source and the detector. Details of the calculation of the radiation attenuation using data from the United States National Institutes of Standards and Technology (NIST) database are presented, and employed to explore characteristics of the radiation interaction with matter, from cross sections to statistical fluctuations. Examples and suggestions of exploratory activities are also presented. The simulation was used with two groups of about undergraduate students from a distance learning Physics course at UFSC in the beginning of 2011, along with the execution of the real experiment. Throughout the text, comments on the motivations and problems of using simulations in this context are discussed. Finally, it is discussed how this work relates to the main goals of introductory Physics laboratories, according to an American Physical Society Committee specifically created to evaluate that.

Keywords: *Interaction of radiation with matter. Simulation. Modeling. Modern Physics laboratory.*

I. Introdução

As radiações ionizantes, seus usos e efeitos estão cada vez mais presentes no cotidiano das pessoas. Além do interesse e das preocupações despertadas por acidentes nucleares como a recente tragédia em Fukushima, são conhecidas, tam-

bém, suas aplicações na medicina, especialmente na radiologia diagnóstica (radiologia convencional, tomografia computadorizada e medicina nuclear) e no tratamento do câncer (medicina nuclear e radioterapia com fontes radioativas e aceleradores lineares). O uso de radiações ionizantes na indústria é menos conhecido, apesar de crescente e estratégico. Aplicações tecnológicas incluem esterilização de medicamentos (FAIRAND; FIDOPIASTIS, 2010; JACOBS, 1995; CORRÊA; CICALI; PREVIDE; MORAIS; HIGASHI, 88) e instrumentação cirúrgica (IPEN, 2011), inativação de sementes (MAITY; KARA; BANERJEE; CHAKRABORTY; SANTRA, 2009), aplicações polêmicas como a varredura de pessoas (GIBLIN; LIPTON, 2011; BRENNER, 2011) e contêineres em aeroportos e terminais de cargas (VALENCIA; MILLER, 2011), espectroscopia e difração de raios-x para caracterização de materiais na indústria (STOCK, 2008). Na ciência básica, as radiações ionizantes estão presentes na Biologia – a hélice dupla do DNA foi "vista" com técnicas de difração de raios-x (WATSON; CRICK, 1953) – à astronomia (GUDEL, 2009), passando pelos grandes laboratórios de Física de partículas que buscam estender os limites de nosso conhecimento sobre a estrutura da matéria (ATLAS, 2008).

Tendo em vista essa grande presença das radiações ionizantes na ciência, tecnologia e, conseqüentemente, na economia e na segurança individual e social contemporâneas, torna-se premente a necessidade de sensibilizar e informar estudantes de vários perfis a respeito do assunto. Estudantes de bacharelado e licenciatura das ciências básicas (Biologia, Física, Química), das áreas tecnológicas (engenharias e ciências de materiais), das áreas médica e sanitária e de cursos técnicos de enfermagem e radiologia são o foco, mas aprender mais sobre radiações e a estrutura da matéria poderia ser muito benéfico para a formação que um cidadão recebe no Ensino Médio. Uma das intenções deste trabalho é apresentar uma estratégia para despertar e fomentar nesse público o interesse pelo tema.

Atividades experimentais, ainda raras em todos os níveis de ensino no Brasil, têm sido consideradas um importante complemento às aulas expositivas e ao estudo individual. Entretanto, atividades experimentais utilizando radiações ionizantes têm vários inconvenientes. São relativamente caras: um kit básico com um detector Geiger-Müller, um conjunto de fontes e um sistema computadorizado elementar de aquisição de dados custa hoje (maio de 2012), nos EUA, cerca de US\$ 3.000,00; sem isenção de impostos, com taxas de importação e alfândega, lucro dos representantes e muito trabalho para vencer a burocracia, o preço-Brasil do kit chega a R\$ 15.000,00. São difíceis de adquirir: fontes radioativas, mesmo as pouco intensas utilizadas em kits de venda livre nos EUA, são material controlado no Brasil pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e requerem que a

instituição que as compra e utiliza tenha um supervisor de proteção radiológica certificado que se responsabilize por elas. São difíceis de manter: muitas fontes pedagogicamente interessantes devido ao tipo de emissão e à energia da radiação têm meias-vidas relativamente curtas, o que faz com que tenham que ser substituídas frequentemente, adicionando custo e complexidade ao laboratório. Essas restrições são suficientes para, dada a (falta de) vontade política dos nossos governantes e legisladores com relação a investimentos em educação, dificultar a realização de experimentos deste tipo no ensino superior de física e engenharia e eliminar qualquer possibilidade de realização no ensino médio.

Simulações computacionais de experimentos de Física têm sido há anos desenvolvidas e utilizadas tanto pelo seu potencial pedagógico quanto para mitigar o problema dos custos e das dificuldades logísticas das atividades experimentais (DST, 2011; BIGELOW; MOLONEY; PHILPOTT; ROTHBERG, 1996; WIEMAN et al. 2011; ERNERFELDT; BODIN, 2011). Nos experimentos didáticos com radiações ionizantes, nos quais invariavelmente são utilizadas fontes radioativas e detectores ligados a um sistema computadorizado de aquisição de dados, não há muito o que mexer com as mãos – mudar a posição da fonte radioativa ou o material atenuador – nem muito para se ver com os olhos – a interação da radiação com a matéria nesses níveis não provoca variações perceptíveis de posição, cor, temperatura ou qualquer outra propriedade à qual o ser humano seja sensível. Nesse sentido, a virtualização de alguns experimentos deixa-os quase tão reais quanto os experimentos reais, particularmente quando comparados a experimentos de mecânica, ótica e termodinâmica. Convém ressaltar, no entanto, que mesmo nos casos em que a diferença entre o real e o virtual é mínima, o real oferece benefícios inatingíveis com o virtual. A experiência de seguir procedimentos de segurança para manipular uma pequena fonte radioativa, por exemplo, é insubstituível, particularmente se quem a manipula estiver informado sobre os efeitos da radiação nos tecidos biológicos.

Acreditamos que o experimento descrito neste artigo, no entanto, agrega os benefícios da simulação com poucos prejuízos advindos da falta de contato com os objetos reais. Isso se deve ao fato de que, nos dois casos (o real e o simulado), o contato do experimentador com o experimento se dá em grande medida através da tela de um computador, e a interface com o usuário utilizada na simulação é essencialmente a mesma oferecida pelos sistemas de aquisição de dados computadorizados.

O aplicativo e as estratégias para seu uso fazem parte de um conjunto maior desenvolvido para uma disciplina de laboratório de Física Moderna para um curso de licenciatura em Física na modalidade *a distância* e foi efetivamente utili-

zado com duas turmas com cerca de vinte e cinco alunos cada em janeiro e fevereiro de 2011. Apesar de o curso ser na modalidade *a distância*, a disciplina, assim como as outras disciplinas de laboratório, era de caráter presencial com as aulas concentradas em dois finais de semana para cada turma. As simulações foram concebidas para serem utilizadas associadas a exercícios de preparação para a parte presencial e para servirem de instrumento pedagógico para os futuros professores eventualmente utilizarem em suas próprias aulas para o Ensino Médio. Devido à logística do atendimento dos alunos durante as aulas, entretanto, o principal uso das simulações acabou ocorrendo nos encontros presenciais.

O conjunto completo de materiais envolve um livro-texto (SILVA, 2010), que aborda quatro experimentos clássicos de física moderna: a determinação da razão carga/massa do elétron pelo método de Thomson, a determinação da carga do elétron pelo método de Millikan, a identificação das linhas espectrais visíveis do hidrogênio e do hélio e experimentos com fontes de radiação gama e um Geiger-Müller e um espectrômetro de fótons. Para todos os experimentos, existem simulações que procuram repetir exatamente os controles e as medições que os alunos teriam que fazer em aula. Os programas foram registrados junto ao INPI pelo Departamento de Inovação Tecnológica da UFSC, mas são de livre acesso pela *internet* no endereço <http://www.fsc.ufsc.br/~canzian/labfismod/simulacoes>.

Estão disponíveis na *internet* alguns aplicativos de simulação da interação da radiação com a matéria e de seus processos de detecção e medição. Talvez o mais sofisticado deles seja o RadLab (SAHIN; SAHIN; KAYRIN, 2011), que dispõe de uma interface gráfica em que objetos associados a detectores, pré-amplificadores, amplificadores, discriminadores e outros módulos eletrônicos são representados por imagens fidedignas. Esse aplicativo permite ao usuário montar o seu próprio experimento, conectando os módulos entre si, e incorpora o estado da arte em técnicas de Monte Carlo, acumuladas ao longo de décadas de desenvolvimento de códigos para a comunidade de Física Nuclear e de partículas elementares, tais como o GEANT (ALLISON et al., 2006), PENELOPE, (SALVAT; FERNÁNDEZ-VAREA; ACOSTA; SEMPAAU, 2001) e EGSnrc (KAWRAKOW; MAINEGRA-HING; ROGERS; TESSIER; WALTERS, 2011). Mais modesto e mais próximo à proposta apresentada neste trabalho, está o *Virtual Radiation Laboratory* (SIEGEL; SIEGEL, 2011). Ainda assim, parece destinado a um público que já tem um bom conhecimento básico sobre os equipamentos e procedimentos experimentais e que busca uma razoável especialização nas práticas de aquisição e análise de dados em Física das radiações ionizantes. Finalmente, o *Física Nuclear Virtual* (DIAS; PINHEIRO; BARROSO, 2002) parece aproximar-se bastante da

proposta deste trabalho, mas oferece um número menor de possibilidades de uso e não apresenta detalhes da implementação.

A proposta deste trabalho foi a de desenvolver um conjunto de ferramentas leves e com poucos controles, mais preocupada em simplificar a interação, sem distanciar-se demais do que seria a situação real, para tentar engajar os usuários. Um grande investimento foi feito na elaboração de roteiros e exemplos que permitem a apropriação de conceitos básicos sobre radiações e de técnicas simples de análise e apresentação de dados. Destina-se a um público não acostumado a calcular variâncias, elaborar gráficos ou fazer ajustes de retas, mas que pode beneficiar-se muito com a aquisição dessas habilidades. Além disso, vários temas podem ser abordados durante um experimento didático sobre radiações ionizantes, entre eles: níveis de energia e transições atômicas e nucleares, comportamento corpuscular da luz (fótons), interação da radiação com a matéria e ciência dos materiais, aplicações de eletromagnetismo na detecção e processamento eletrônico de dados, análise estatística de dados e planejamento de experimentos.

II. Materiais e métodos

Uma representação esquemática do sistema simulado é apresentada na Fig. 1. Consiste de uma fonte radioativa emissora de fótons. A radiação emitida é colimada em um feixe muito estreito. Após atravessar um material com certa espessura, um detector de área pequena recebe os fótons originais que atravessam o material sem interagir.

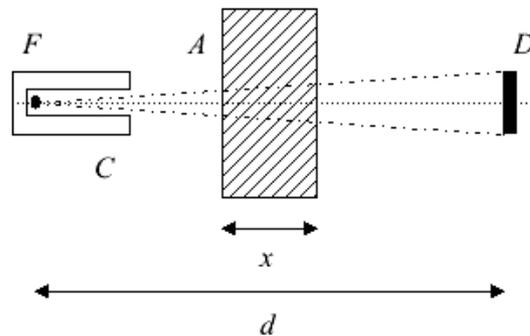


Fig. 1 – Uma fonte pontual F está posicionada dentro de um colimador C , que delimita um feixe muito estreito. A distância da fonte ao detector é d , assumida muito maior que o diâmetro do detector D . Entre a fonte e o detector está uma placa de material atenuador A , com espessura x .

A estreita colimação e a pequena área do detector são essenciais para reproduzir as condições em que são obtidos experimentalmente os dados para os coeficientes de atenuação utilizados nos cálculos da simulação. Experimentos desse tipo idealmente devem medir estritamente os fótons que deixam a fonte e atravessam o material atenuador sem interagir com ele. No material, podem acontecer essencialmente três tipos de interação: efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares. Em todos os casos há geração de radiação secundária. No efeito fotoelétrico, a vacância deixada pelo elétron ejetado será preenchida através do rearranjo eletrônico, com consequente emissão de radiação; no espalhamento Compton, há um fóton espalhado com energia menor que a do fóton incidente; na produção de pares, novos fótons são criados na aniquilação posterior do pósitron. Dessa maneira, quanto menor o diâmetro do feixe e do detector e maior a distância deste do material atenuador, menores as chances desses fótons secundários contaminarem os dados.

A Fig. 2 mostra as opções oferecidas ao usuário na tela da simulação. São quatro materiais disponíveis: água, alumínio, iodeto de sódio e chumbo. Na tela do *software*, eles são identificados pelas letras de A a D, o que permite que a sua identificação seja um possível experimento a ser realizado. A água foi escolhida por ser uma excelente aproximação para os tecidos moles dos seres vivos; o iodeto de sódio, por ser um cristal muito utilizado na detecção da radiação; o alumínio e o chumbo, por serem os materiais tipicamente comparados nos experimentos reais. É possível escolher arbitrariamente a energia, de 1 keV a 10 MeV, bem como a espessura do material e o tempo de contagem para cada aquisição de dados. O número de aquisições estabelece quantas vezes a medida é repetida. Feitas as escolhas, a simulação retorna o número de fótons incidentes para aquele tempo de aquisição (assumindo uma atividade arbitrária fixada internamente para a fonte), uma tabela com o número de contagens em cada aquisição e a média e o desvio padrão da média das contagens.

Tal como os exercícios em livros didáticos, que eliminam todos os detalhes do mundo real em favor de um modelo minimalista com foco no que se deseja ensinar, o aplicativo simula apenas o que é absolutamente essencial no processo: a atenuação proporcionada pelo material, com sua respectiva flutuação estatística, descrita a seguir.

A intensidade de um feixe de fótons, ao atravessar um material, diminui exponencialmente com a espessura do material atravessado e é expressa por:

$$I = I_0 e^{-\mu x},$$

onde I é a intensidade da radiação medida após atravessar uma espessura x , I_0 a intensidade inicial e μ o coeficiente de atenuação do material.

Fig. 2 – Tela do programa de simulação da atenuação da radiação pela matéria. São oferecidas ao usuário opções de escolha do material atenuador, da energia da radiação, da espessura do material, do tempo de aquisição de dados e do número de aquisições.

Essa é a expressão usualmente encontrada em textos sobre o assunto. O que é raramente ressaltado é que o coeficiente de atenuação depende de uma maneira complexa da energia da radiação incidente e da configuração eletrônica do material, que dependem de seu estado físico (sólido, líquido ou gasoso) e de sua densidade. Para evitar essa dependência e apresentar um único conjunto de dados para um elemento ou substância, independentemente do seu estado físico ou densidade, as bases de dados em geral trazem os valores do *coeficiente de atenuação de massa*, definido como a razão entre o coeficiente de atenuação e a densidade do material, $\mu_p = \mu/\rho$. Em termos do coeficiente de atenuação de massa, a expressão acima fica:

$$I = I_0 e^{-(\mu_p)(\rho x)} = I_0 e^{-\mu_p (\rho x)}$$

A simulação utiliza os dados para os coeficientes de atenuação de massa disponíveis no site do *National Institutes of Standards and Technology* (NIST, 2011). (Mantido pelo governo americano, é um site que vale a pena ser visitado: esses e uma infinidade de outros dados estão disponíveis gratuitamente). Os dados estão disponíveis na forma de tabelas como a apresentada a seguir para o chumbo.

Tabela 1 – Dados disponíveis no site do *National Institutes of Standards and Technology* para o coeficiente de atenuação de massa do chumbo, em função da energia da radiação incidente. As linhas sombreadas indicam as energias em que ocorrem ressonâncias de absorção, quando a energia dos fótons incidentes é igual à energia de um nível de energia eletrônico do material e há uma abrupta elevação da probabilidade de interação. As linhas preenchidas com reticências indicam dados que são utilizados na simulação, mas que foram suprimidos na listagem para não sobrecarregar o texto.

Energia (MeV)	μ_p (cm ² /g)	Energia (MeV)	μ_p (cm ² /g)
1.00000E-03	5.21000E+03
1.50000E-03	2.35600E+03	1.00000E-02	1.30600E+02
2.00000E-03	1.28500E+03	1.30352E-02	6.70100E+01
2.48400E-03	8.00600E+02	1.30352E-02	1.62100E+02
2.48400E-03	1.39700E+03	1.50000E-02	1.11600E+02
2.53429E-03	1.72600E+03	1.52000E-02	1.07800E+02
2.58560E-03	1.94400E+03	1.52000E-02	1.48500E+02
2.58560E-03	2.45800E+03	1.55269E-02	1.41600E+02
3.00000E-03	1.96500E+03	1.58608E-02	1.34400E+02
3.06640E-03	1.85700E+03	1.58608E-02	1.54800E+02
3.06640E-03	2.14600E+03	2.00000E-02	8.63600E+01
3.30130E-03	1.79600E+03
3.55420E-03	1.49600E+03	8.00000E-02	2.41900E+00
3.55420E-03	1.58500E+03	8.80045E-02	1.91000E+00
3.69948E-03	1.44200E+03	8.80045E-02	7.68300E+00
3.85070E-03	1.31100E+03	1.00000E-01	5.54900E+00
3.85070E-03	1.36800E+03
4.00000E-03	1.25100E+03	2.00000E+01	6.20600E-02

A Fig. 3 mostra gráficos construídos a partir dos valores dos coeficientes de atenuação de massa dos elementos e substâncias utilizados na simulação. Nos gráficos para o iodeto de sódio (NaI) e para o chumbo, é possível ver claramente as mudanças abruptas nos valores de μ/ρ nas energias das ressonâncias. É importante notar que, para a água e o alumínio, compostos de elementos com número atômico relativamente pequeno, essas ressonâncias acontecem somente para baixas energias e são praticamente imperceptíveis.

Para energias da ordem de 1 MeV ou mais, os valores dos coeficientes de atenuação de massa dos diferentes materiais são aproximadamente iguais. Esquecer que o coeficiente de atenuação de massa remove a dependência com a densidade do material pode levar um leitor incauto a pensar que, nessas energias, a atenuação da água e do chumbo são as mesmas, embora isso não seja verdade. A densidade do chumbo, e, portanto, sua capacidade de atenuação da radiação, nesse caso, é cerca de onze vezes maior que a da água.

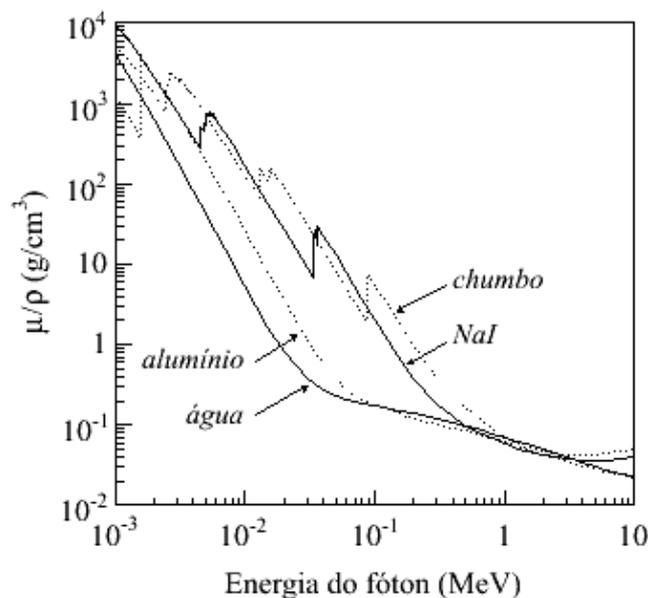


Fig. 3 – Coeficiente de atenuação de massa de diferentes materiais – água, alumínio, iodeto de sódio e chumbo – em função da energia da radiação incidente. Note que as escalas de ambos os eixos são logarítmicas, revelando a forte dependência do coeficiente de atenuação com a energia.

Na simulação, os valores para a energia dos fótons podem ser livremente escolhidos pelo usuário e podem não constar das tabelas de dados para a energia escolhida. Uma interpolação linear dos dados é feita para obter os coeficientes para energias arbitrárias:

$$\mu_p(E) = \mu_p(E_{i-1}) + (\mu_p(E_i) - \mu_p(E_{i-1})) \times (E - E_{i-1}) / (E_i - E_{i-1}),$$

onde E_{i-1} e E_i são os valores de energia encontrados na tabela mais próximos da energia escolhida pelo usuário, de tal modo que $E_{i-1} < E < E_i$.

Além da escolha do material, o usuário pode escolher o tempo de aquisição, a energia da radiação e a espessura da amostra. Como discutido na próxima seção, esses três parâmetros podem ser manipulados para cumprir os objetivos pedagógicos do "experimento".

Ao pressionar o botão *OK*, a simulação retorna a lista dos valores para as contagens em cada aquisição. Assim, se foram escolhidas dez aquisições de sessenta segundos cada, o programa retorna uma lista com dez valores, cada um correspondente a um tempo de aquisição de sessenta segundos. Essa é uma das mais significativas diferenças entre o experimento virtual e o real: a simulação faz em fração de segundo o que demoraria, no mínimo, dez minutos no laboratório real. Se isso, por um lado, agiliza o processo, permitindo que o aluno foque nas questões da Física da interação e na estatística das contagens, por outro, não permite que tenha uma dimensão real das peculiaridades e dificuldades do processo experimental.

Os valores retornados para cada aquisição são, em geral, distintos, modelando a flutuação estatística intrínseca do experimento. A flutuação estatística deve-se essencialmente a três componentes: flutuação no número de fótons emitidos pela fonte no intervalo de tempo especificado; flutuação no número de fótons removidos do feixe pelo material atenuador e flutuação no número de fótons detectados para cada conjunto de fótons incidentes sobre o detector.

A distribuição binomial é o modelo estatístico mais geral para o tratamento das flutuações estatísticas. Infelizmente, no caso do decaimento nuclear, em que um grande número de núcleos ($\sim 10^{23}$) está envolvido no processo, o cálculo de probabilidades utilizando a distribuição binomial é computacionalmente muito custoso. Entretanto, por esse mesmo motivo, somado ao fato de as probabilidades serem relativamente pequenas (exceto no caso de núclídeos com meia-vida extremamente curta), a distribuição binomial pode ser aproximada por uma distribuição de Poisson, ou, o que é ainda mais comum e vantajoso, por uma distribuição gaussiana. Uma esclarecedora discussão sobre os critérios de aplicação das diferentes distribuições estatísticas aos decaimentos radioativos pode ser encontrada no clássico livro de Knoll (KNOLL, 2000).

Na simulação descrita neste artigo, assumimos que o número N de eventos é grande o bastante para que as flutuações estatísticas de cada componente, rigorosamente descritas por distribuições binomiais, possam ser modeladas por distribuições gaussianas que, combinadas, resultam, também, em uma distribuição gaussiana, em que a média é dada por N e cujo desvio padrão pode ser aproximado pela raiz quadrada desse valor, \sqrt{N} .

Para simular essas flutuações, é preciso dispor de um gerador de números aleatórios que retorne números que obedecem a uma distribuição gaussiana. As linguagens de programação têm, em geral, geradores de números aleatórios que obedecem a uma distribuição uniforme, mas somente bibliotecas especializadas possuem geradores de números aleatórios para outras distribuições (ANTCHEVA; 2010; PRESS et al., 2002). Neste trabalho, foi implementado o gerador descrito em PRESS et al. (2002), em que um número aleatório y que obedece a uma distribuição gaussiana de média y_m e desvio-padrão σ é obtido a partir de dois números aleatórios x_1 e x_2 que obedecem a uma distribuição uniforme entre 0 e 1 utilizando:

$$y = y_m + \sigma [-\log(x_1) \cos(2\pi x_2)]^{1/2}$$

A simulação foi desenvolvida em JavaScript (ECMA, 2010), uma linguagem que, no entendimento deste autor, oferece vantagens para esse tipo de aplicação, as quais não são encontradas em qualquer outra plataforma de desenvolvimento.

III. Resultados

A simulação permite que sejam realizados essencialmente os mesmos estudos que podem ser realizados com o experimento real. Neste texto discutimos três propostas: (a) estatística de contagens; (b) determinação do coeficiente de atenuação para uma energia fixa; (c) levantamento da dependência do coeficiente de atenuação com a energia.

Estatística de contagens

A simulação oferece a possibilidade de "concretizar" rapidamente a dependência das incertezas com a estatística das contagens, bem como a visualização e diferenciação dos seus diferentes indicadores. Na análise que segue, são estudados quatro diferentes esquemas de aquisição de dados. Nesta proposta, são dois os indicadores investigados: o desvio padrão e o desvio padrão da média.

Os esquemas de aquisição diferem entre si pelo tempo de aquisição e pelo número de vezes que o experimento é repetido (número de aquisições), mantendo-se fixos o material escolhido (chumbo), a espessura do material (0,1 cm) e a energia do fóton emitido pela fonte (100 keV). A tabela 2 apresenta a média do número de contagens e o seu desvio padrão, bem como o desvio padrão da média para o número de aquisições especificado.

Tabela 2 – Resultados das simulações de aquisições de dados para fótons de 100 keV utilizando chumbo, espessura de 0,1 cm, tempos de aquisição de 60 s e 600 s, para 20 e 200 aquisições. O desvio padrão indica a flutuação estatística no valor nas contagens, enquanto o desvio padrão da média indica a flutuação estatística no valor das médias das aquisições. Veja o texto para mais detalhes.

	Tempo de cada aquisição (s)	Número de aquisições	Média	Desvio padrão	Desvio padrão da média
1	60	20	42,3	6,5 (15%)	1,7 (4,0%)
2	600	20	418	20 (4,7%)	6,3 (1,5%)
3	60	200	40,9	6,4 (16%)	0,5 (1,2%)
4	600	200	416	20 (4,8%)	1,5 (0,4%)

A simulação devolve uma lista com o número de contagens para as aquisições especificadas. Uma planilha de cálculos ou outro programa para elaboração de gráficos pode ser utilizada para construir as distribuições de frequência (histogramas) para as diferentes configurações. A Fig. 4 mostra as distribuições dos dados obtidas em cada caso. Pode ser um exercício esclarecedor analisar com os alunos o efeito do tempo de aquisição e do número de aquisições na forma das distribuições.

O desvio padrão é uma medida da largura das distribuições e, como mencionado anteriormente, pode ser aproximado pela raiz quadrada de N para grandes valores N . No caso 1, por exemplo, significa que, ao fazermos medidas de 60 s, vamos obter, em média, 42,3 contagens, e em 68% das medidas o valor das contagens estará entre $(42,3 - 6,5) = 35,8$ e $(42,3 + 6,5) = 48,8$. O valor do desvio padrão praticamente não muda com o número de aquisições, pois a média de contagens em cada aquisição independe do número de aquisições.

O desvio padrão da média é, como o nome diz, uma medida da flutuação estatística da média para aquele número de aquisições. No caso de distribuições

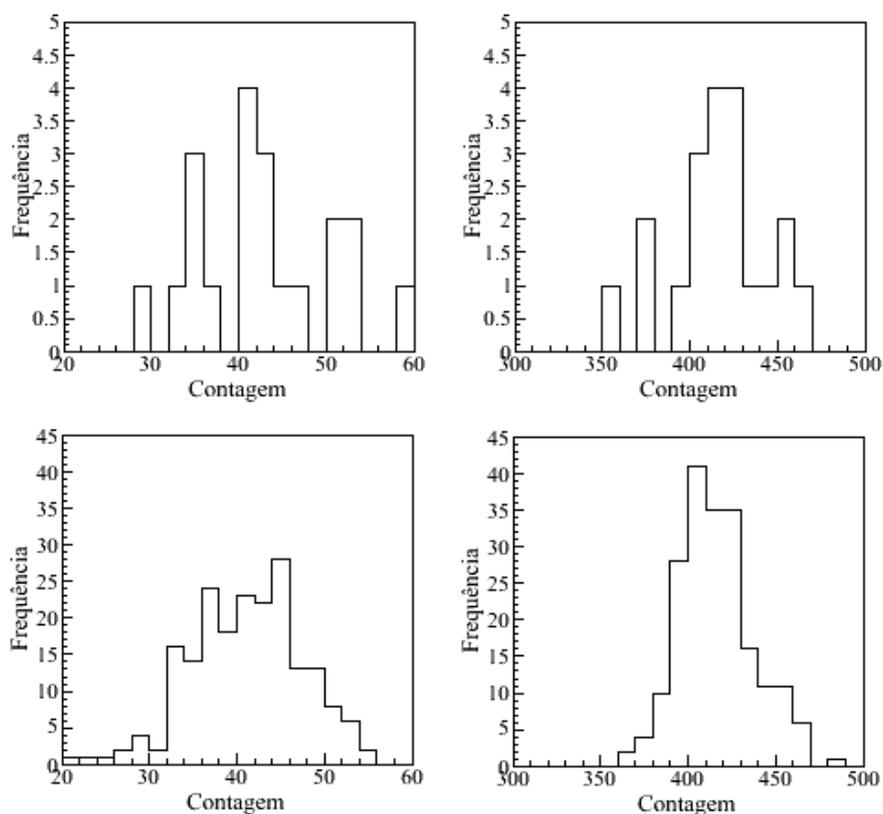


Fig. 4 – Distribuições de frequência das contagens obtidas em cada esquema de aquisição. Acima, à esquerda, a distribuição correspondente ao esquema 1; à direita, esquema 2; abaixo, à esquerda, esquema 3; à direita, esquema 4.

gaussianas, é dado pelo desvio padrão dividido pela raiz quadrada de $N - 1$, onde N é o número de medidas. Esse indicador reflete a flutuação no valor da média da distribuição.

No caso 1, por exemplo, significa que, ao fazermos vinte medidas de 60 s, obtemos uma média de 42,3 contagens e que, se fizermos novos conjuntos de vinte medidas de 60 s, vamos obter em 68% das vezes médias entre $(42,3 - 1,7) = 40,6$ e $(42,3 + 1,7) = 44,0$. Note que o valor do desvio padrão da média diminui com o número de medidas realizado. Além disso, quanto maior o número de contagens,

menor a flutuação relativa: para 60 s temos um desvio de 6,5, ou 15% do valor médio, enquanto para 600 s o desvio é de 20, ou 4,7% do valor médio, um resultado três vezes mais preciso.

Coefficiente de atenuação

A tabela 3 mostra dados experimentais obtidos e dados simulados para o número de contagens em função da espessura do material para fótons de 662 keV (Césio-137) atravessando diferentes espessuras de alumínio e chumbo. Os tempos de aquisição utilizados nas simulações foram escolhidos de modo que o número de contagens simulado para a menor espessura fosse, aproximadamente, igual ao medido de forma experimental.

Tabela 3 – Fótons de 662 keV transmitidos através do alumínio e do chumbo para diferentes espessuras. Os tempos de aquisição de cada medida nas simulações foram escolhidos de modo que o número de contagens simulado para a menor espessura fosse aproximadamente igual ao medido de forma experimental e são de 1,6 s para o alumínio e 2,4 s para o chumbo. O erro associado à medida é a raiz quadrada do número de contagens, uma vez que foi feita somente uma aquisição para cada espessura.

Alumínio												
x (cm)	0,12	0,22	0,32	0,52	1,72	2,77	3,81	4,86				
N_{exp}	571 (24)	562 (24)	557 (24)	513 (23)	437 (21)	310 (18)	256 (16)	198 (14)				
N_{sim}	563 (24)	537 (23)	536 (23)	573 (24)	414 (20)	326 (18)	296 (17)	214 (15)				
Chumbo												
x (cm)	0,06	0,14	0,22	0,32	0,42	0,52	0,64	0,84	1,04	1,25	1,46	1,62
N_{exp}	800 (28)	774 (28)	683 (26)	617 (25)	537 (23)	485 (22)	417 (20)	324 (18)	233 (15)	226 (15)	166 (13)	137 (12)
N_{sim}	809 (28)	743 (27)	723 (27)	606 (25)	515 (23)	436 (21)	382 (20)	290 (17)	142 (12)	158 (13)	67 (8)	64 (8)

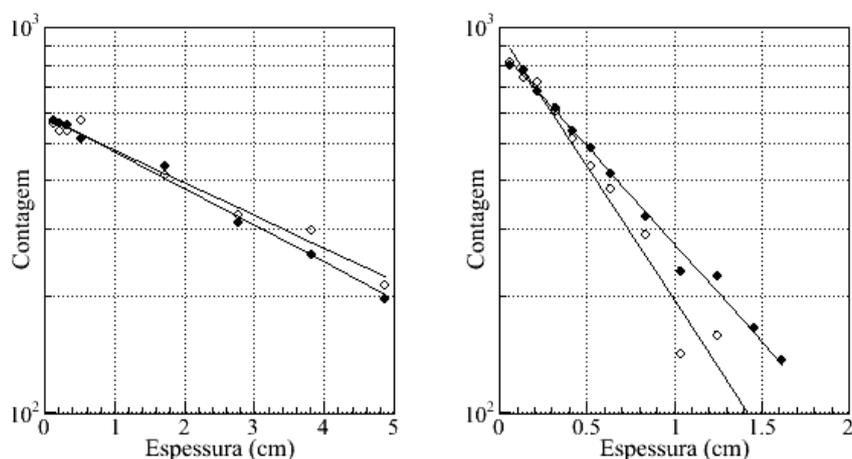


Fig. 5 – Gráficos de dados experimentais (pontos cheios) e dados simulados (pontos vazados) das contagens em função da espessura do material para o alumínio e o chumbo. Os valores para os coeficientes de atenuação experimentais, simulados e tabelados estão na tabela 4.

Tabela 4 – Coeficientes de atenuação obtidos a partir do ajuste de retas aos dados experimentais e aos dados simulados para o alumínio e o chumbo. Estão apresentados, também, os valores obtidos interpolando os dados tabelados (NIST).

Material	$\mu_{\text{exp}} (\text{cm}^{-1})$	$\mu_{\text{sim}} (\text{cm}^{-1})$	$\mu_{\text{tab}} (\text{cm}^{-1})$
Alumínio	$0,22 \pm 0,01$	$0,19 \pm 0,01$	0,2024
Chumbo	$1,16 \pm 0,03$	$1,59 \pm 0,04$	1,2883

Como se pode notar no exemplo anterior, quando se mantém constante o tempo de aquisição, a incerteza relativa na contagem aumenta com a diminuição do número de contagens: para o chumbo, varia de cerca de 4% para a menor espessura até cerca de 10% para a maior espessura. Essa flutuação se reflete no valor encontrado para o coeficiente de atenuação utilizando a simulação, que deveria aproximar-se do valor tabelado. Um exercício que pode sensibilizar os estudantes para essa característica do erro estatístico e o efeito nos dados é sugerir que escolham

tempos de aquisição tais que o erro estatístico fique sempre em torno de um valor determinado, digamos em torno de 1 a 2%, como indicado na tabela abaixo.

Tabela 5 – Fótons de 662 keV transmitidos através do chumbo para diferentes espessuras, durante tempos de aquisição tais que a incerteza relativa de cada medida permanece em torno de 1-2%. O erro associado à medida é a raiz quadrada do número de contagens, uma vez que foi feita somente uma aquisição para cada espessura.

x (cm)	0,06	0,14	0,22	0,32	0,42	0,52	0,64	0,84	1,04	1,25	1,46	1,62
t (s)	10	10	10	20	20	20	20	20	40	40	60	60
N_{sim}	3530 (59)	3164 (56)	2803 (53)	4989 (71)	4355 (66)	3830 (62)	3266 (57)	2542 (50)	3920 (63)	2869 (54)	3397 (58)	2777 (53)
N_{sim}/s	353,0 (5,9)	316,4 (5,6)	280,3 (5,3)	249,4 (3,5)	217,8 (3,3)	191,5 (3,1)	163,3 (2,9)	127,1 (2,5)	98,0 (1,6)	71,7 (1,3)	56,6 (1,0)	46,3 (0,9)

O coeficiente de atenuação calculado com esses dados é de $1,31 \pm 0,01 \text{ cm}^{-1}$, consistente com o valor tabelado utilizado na simulação ($1,29 \text{ cm}^{-1}$). Note que o tempo total de aquisição, que era de pouco menos de 28.8 s no primeiro caso, aumentou mais de dez vezes, passando para 330 s. Com um custo de tempo muito mais alto, esse resultado poderia melhorar repetindo-se cada medida várias vezes para substituir a raiz quadrada do número de contagens pelo desvio padrão da média como incerteza na medida. Essa reflexão dá ao aluno uma dimensão mais concreta das dificuldades e do custo para se obter medidas de grande precisão, tais como as disponíveis nos institutos de referência como o NIST.

Dependência da atenuação com a energia

Outro experimento didático que pode ser realizado é a investigação da dependência da atenuação com a energia da radiação incidente. Nesse caso, entretanto, é muito mais difícil, senão impossível, encontrar laboratórios didáticos com condições para permitir uma ampla percepção dos detalhes dessa dependência. Isso porque as fontes de fótons disponíveis, em geral, são poucas e de energias relativamente baixas, raramente acima de 1 MeV. Com a simulação, é possível investigar essa dependência até 20 MeV, energia usualmente disponível somente em aceleradores de partículas. No que segue, são apresentados três roteiros que permitem investigar: (a) as variações abruptas do coeficiente de atenuação para energias

próximas às energias dos níveis de energia atômicos (ressonâncias), (b) o fato de, à medida que a energia aumenta, a atenuação depender cada vez menos do material atenuador e da energia da radiação, e (c) estimativas da energia depositada em um material por radiações ionizantes provenientes de diferentes fontes.

A tabela 6 e a Fig. 6 mostram conjuntos de dados obtidos com a simulação para fótons de 25 keV a 120 keV atravessando 0,1 cm de iodeto de sódio e chumbo, para tempos de aquisição de 3600 s. Esse intervalo de energias foi escolhido porque nele encontram-se duas importantes ressonâncias de absorção para esses materiais, correspondentes às energias necessárias para a remoção de um elétron da camada K: a de 33,2 keV para o iodo do NaI, que pode ser vista entre 30 keV e 35 keV, e a de 88,0 keV para o Pb, que pode ser vista entre 85 keV e 90 keV.

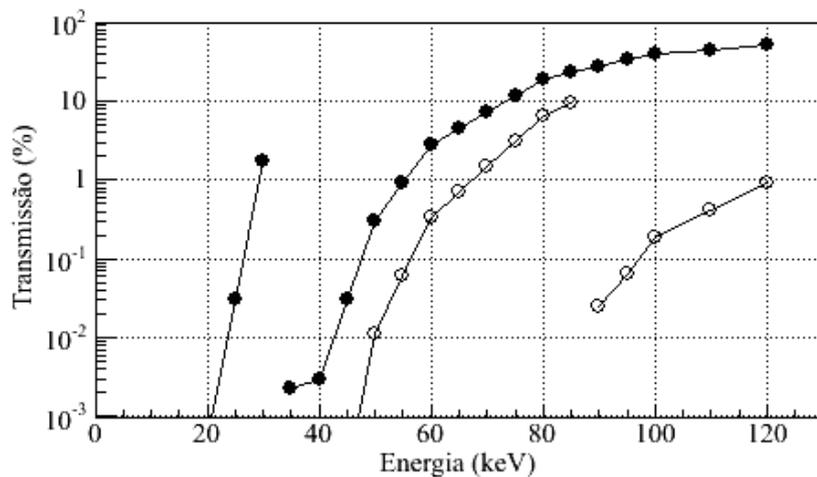


Fig. 6 – Transmissão de fótons com energias entre 25 keV e 120 keV através do iodeto de sódio (NaI, pontos cheios) e do chumbo (Pb, pontos vazados). Nos dois conjuntos de dados nota-se a presença de bordas de absorção: entre 30 keV e 35 keV para o iodo do NaI e entre 85 keV e 95 keV para o Pb. Os dados foram simulados utilizando um tempo de aquisição de 3600 s e espessura de 0,1 cm. As linhas ligando os pontos não são ajustes e visam apenas a ajudar a realçar as transições. Os primeiros pontos das curvas, presentes na tabela, foram omitidos dos gráficos para evitar comprimir demais a escala vertical.

A tabela 7 e a Fig. 7 mostram as taxas de contagem (em contagens por segundo) obtidas para energias entre 10 keV e 10 MeV, considerando 1 cm de água e de alumínio entre a fonte e o detector. Os valores correspondem às médias de cinco medidas. O tempo de aquisição foi ajustado de modo a manter a incerteza estatística inferior a 1%, o que representa um total de contagens da ordem de 10000. É importante notar que esse total de contagens corresponde a tempos de aquisição muito parecidos, de cerca de 30 segundos, para fótons de alta energia (5-10 MeV) incidindo sobre os dois materiais, mas tempos muito distintos para fótons de baixa energia (10-20 keV): 1 hora e meia para a água e 80 horas para o alumínio. A semelhança entre os tempos de aquisição a altas energias deve-se, principalmente, ao fato de que o feixe é pouco atenuado pelos dois materiais, e mesmo com grandes diferenças nos coeficientes de atenuação a taxa de contagem permaneceria relativamente alta em ambos os casos. Já para baixas energias, para as quais a atenuação dos dois materiais é muito maior, as taxas de contagem ficam muito mais sensíveis às diferenças entre os coeficientes de atenuação.

Tabela 7 – Taxas de contagens, em fótons por segundo, para fótons de diferentes energias detectados após atravessar 1 cm de água e de alumínio. Para manter a precisão da medida (três algarismos significativos), os tempos de aquisição foram ajustados para valores 30 segundos (para os dois materiais no caso de fótons de alta energia) e 1 hora e meia (água), e 80 horas (alumínio) para o caso de fótons de baixa energia.

Energia (keV)	Taxa de contagem (s ⁻¹)		Energia (keV)	Taxa de contagem (s ⁻¹)		Energia (keV)	Taxa de contagem (s ⁻¹)	
	Água	Al		Água	Al		Água	Al
10	1,82	0,00	60	300	177	200	328	270
20	168	0,03	70	302	196	500	343	300
30	258	17,8	80	309	217	1000	347	317
40	283	80,9	90	314	227	5000	362	350
50	300	139	100	313	234	10000	368	354

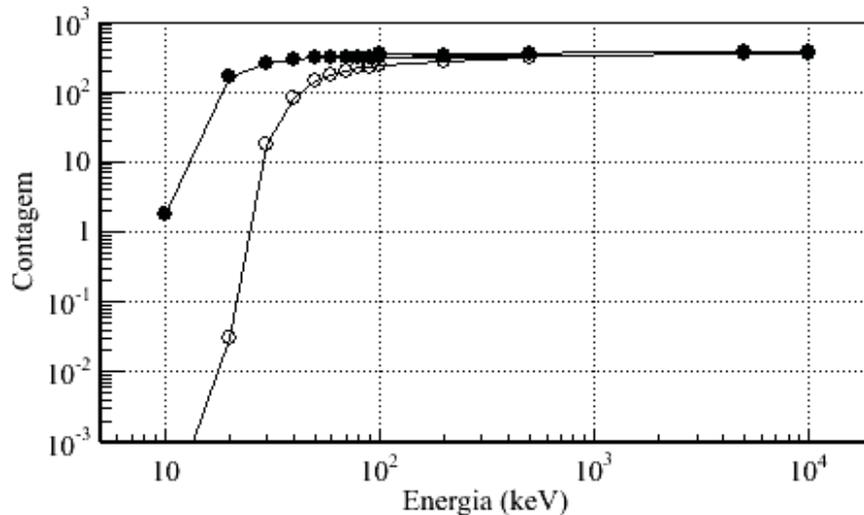


Fig. 7 – Gráfico do número de contagens detectado em função da energia da radiação incidente na água (pontos cheios) e no alumínio (pontos vazados). As linhas ligando os pontos não são ajustes e visam apenas a ajudar na visualização. O primeiro ponto da curva de pontos vazada, presente na tabela, foi omitido do gráfico para evitar comprimir demais a escala vertical.

Essa provavelmente é a atividade com menor chance de ser realizada em um laboratório real. Isso porque é muito improvável que um laboratório didático disponha de fontes de fótons monoenergéticos com energia variando de 10 keV a 10 MeV. Ainda assim, o experimento virtual pode ser realizado para sensibilizar os alunos sobre algumas consequências curiosas da dependência da probabilidade de interação com a energia. Além disso, vale ressaltar que os gráficos das Fig. 6 e 7 e os da Fig. 3 mostram essencialmente a mesma coisa, uma vez que os coeficientes de atenuação são obtidos a partir dos dados de transmissão. Pode ser um exercício instrutivo refazer os gráficos das Fig. 6 e 7 em função da atenuação para uma comparação mais direta com os gráficos da Fig. 3.

É possível utilizar a simulação para estimular a reflexão sobre a exposição à radiação em diferentes situações. Os danos biológicos são diretamente relacionados à dose absorvida (energia por unidade de massa) de radiação ionizante (aqui, convém ressaltar que a radiação não ionizante – o calor de uma lâmpada incandescente, por exemplo – pode ser absorvido em quantidades relativamente grandes

sem maiores consequências, mas a mesma energia absorvida de fontes de radiações ionizantes pode ser fatal). Considerando fótons com energia de 25 keV (energia média dos fótons em uma mamografia típica), 75 keV (energia média dos fótons em uma radiografia típica de tórax) e 3 MeV (energia média dos fótons em uma sessão típica de radioterapia), incidindo sobre um tecido mole (essencialmente água) com 10 cm de espessura, e assumindo que toda a radiação removida do feixe deposita sua energia no tecido atingido, como se comparam as energias depositadas em cada caso?

A tabela 8 resume os resultados de um "experimento" simulado utilizando 10 cm de água como material atenuador e 100 s de tempo de aquisição (correspondendo a 37500 fótons incidindo sobre a amostra), para as três energias consideradas. A fração de fótons removidos do feixe é dada por $f_{rem} = (N_{inc} - N_{det})/N_{inc}$, onde N_{inc} é o número de fótons incidentes e N_{det} o número de fótons detectados. A energia depositada é calculada multiplicando-se o número de fótons removidos pela energia dos fótons, assumindo que toda a energia da radiação secundária é absorvida pela amostra. Como se pode notar, um aumento de cento e vinte vezes na energia (de 25 keV para 3000 keV) corresponde a um aumento de quarenta vezes ($3\times$ menor) na energia depositada. À medida que a energia aumenta, essa relação fica ainda menor.

Tabela 8 – Comparação entre o número de fótons removidos, a respectiva fração com relação aos fótons incidentes, e a energia depositada por fótons de 25 keV, 75 keV e 3000 keV incidindo sobre uma amostra com 10 cm de espessura de água. O tempo de aquisição foi ajustado para 100 segundos.

Energia (keV)	25	75	3000
Fótons transmitidos	98	5640	25125
Fração removida (%)	99,7	85,0	33,0
Energia depositada (MeV)	0,93	2,39	37,1

IV. Conclusão

À guisa de conclusão, resolvemos discutir como o presente trabalho se relaciona às principais metas dos laboratórios introdutórios de Física, tais como colocadas por um documento relativamente antigo (TAYLOR et al., 1998), mas ainda bastante atual, produzido por um comitê da American Physical Society. Segun-

do esse comitê, as principais metas dos laboratórios introdutórios de Física visam a fazer com que os estudantes desenvolvam: 1) a arte da experimentação; 2) habilidades de experimentação e análise; 3) aprendizagem conceitual; 4) entendimento do conhecimento de base da física; 5) habilidades de aprendizado colaborativo. Ao analisarmos o que os autores querem dizer com cada um dos itens, vemos que o experimento virtual proposto cumpre boa parte dessas funções.

No que se refere à "arte da experimentação", os autores argumentam que as atividades laboratoriais devem "engajar os estudantes em vivências significativas do processo experimental, incluindo alguma experiência em propor investigações" e auxiliar os estudantes a compreenderem que "a Física é uma ciência experimental e que a observação e a experimentação são tão importantes quanto conceitos e teorias". Acreditamos que a simulação apresentada cumpre bem essa função: possui diversos dispositivos independentes (materiais, espessuras, energias, tempos de contagem, agrupamento de dados) que o estudante pode combinar para propor diferentes investigações. Sobre esse ponto, os autores argumentam, ainda, que "deve ser clara a diferença entre exercícios laboratoriais e demonstrações, que fornecem uma experiência crítica dos fenômenos sob o controle do instrutor, e experimentos de laboratório, em que as decisões do estudante sobre o desenho e a condução do experimento influenciam seu resultado", que é claramente o caso da simulação proposta.

Quanto a habilidades experimentais e analíticas, os autores argumentam que "o laboratório deve ajudar o estudante a desenvolver uma vasta gama de habilidades básicas e de uso de ferramentas de Física experimental e análise de dados" e que "é recomendável fazer com que os estudantes utilizem muitos tipos de equipamentos básicos de laboratório para fazer observações". Nesse sentido, essa simulação, como qualquer outra que não use maquetes de equipamentos, deixa a desejar, pois experimentos virtuais não contemplam alguns itens, tais como o cuidado necessário ao manipular equipamentos, a atenção na realização de conexões de cabos de energia e de sinais, a manutenção da integridade dos equipamentos, o alinhamento entre as peças e sensibilidade para as consequências da degradação natural dos equipamentos. Outra diferença fundamental (e proposital, no presente caso) entre o real e o virtual é a passagem do tempo: experimentos que poderiam levar horas no laboratório real são executados em poucos minutos no laboratório virtual. Se, por um lado, isso permite explorar aspectos que não seriam possíveis de serem explorados no laboratório real, por outro, oferece uma perspectiva deformada desse aspecto do processo experimental. Por fim, os autores argumentam que "o computador é uma importante ferramenta para um curso de Física baseado na investigação porque se tornou a mais universal das ferramentas de investigação na

pesquisa científica" e, nesse sentido, o experimento virtual tem uma contribuição em tudo semelhante à do experimento real.

No que se refere à aprendizagem conceitual e ao entendimento do conhecimento de base da Física, praticamente não existem diferenças entre o que pode ser abordado pelo laboratório real e pelo virtual, pelo menos no caso das abordagens mais básicas. A simulação implementa praticamente todos os elementos fundamentais sobre a Física e a estatística da emissão e detecção das radiações ionizantes. Para citar uma diferença, podemos dizer que um laboratório real possui uma gama maior de equipamentos (multímetro e osciloscópio, por exemplo) que podem ser empregados para incrementar o aprendizado sobre o processo de aquisição de dados, e que não foram incluídos na presente simulação. São aspectos importantes para a formação de um físico experimental, mas relativamente irrelevantes para uma compreensão geral da Física básica do decaimento radioativo e da estatística das contagens em uma perspectiva mais generalista.

Por fim, no que se refere ao desenvolvimento de habilidades para a aprendizagem colaborativa, o experimento virtual tende a ser mais solitário devido à interação exclusiva com o computador. Não existem peças a serem manipuladas, e mesmo que a experiência seja realizada em equipe, em geral apenas um dos integrantes tem uma intensa interação com o teclado e o *mouse*. Por outro lado, a própria proposta de realizar simulações desse tipo nasce de uma demanda específica: a de atingir pessoas que não têm oportunidade ou meios de participar do laboratório real e colaborativo.

Agradecimentos

O autor gostaria de agradecer aos árbitros por todas as críticas e comentários que contribuíram para aprimorar o texto e, mesmo quando não acatados, para uma reflexão mais profunda sobre as opções feitas pelo autor.

Referências

ALLISON, J. et al. **Geant4 Developments and Applications**. IEEE Transactions on Nuclear Science, v. 53, n. 1, February 2006.

ANTCHEVA, I.; COUET, O. **ROOT: An Object-Oriented Data Analysis Framework Users Guide**. Genebra: CERN, 2010. Disponível em: <<http://root.cern.ch/drupal/>>. Acesso em: 25 jun. 2012.

ATLAS Collaboration et al. **The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider**. *Journal of Instrumentation*, v. 3, August 2008. DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/S08003

BIGELOW, R.; MOLONEY, M. J.; PHILPOTT, J.; ROTHBERG, J. **Nuclear and Particle Physics Simulations**: the consortium of upper-level Physics software. WILEY, 1996.

BRENNER, D. J. Are X-ray backscatter scanners safe for airport passenger screening? For most individuals, probably yes, but a billion scans per year raises long-term public health concerns. *Radiology*, v. 259, n. 1, p. 6-10, April 2011.

DIAS, N. L.; PINHEIRO, A. G.; BARROSO, G. C. Laboratório Virtual de Física Nuclear. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 24, n. 2, p. 232-236, Jun. 2002.

DST (Design Simulation Technologies, Inc.) **Interactive Physics**. Disponível em: <<http://www.design-simulation.com/IP/>>. Acesso em: 25 jun. 2012.

ECMA International. **ECMAScript-262 Language Specification**. 5th. ed. Ecma International, 2009. Disponível em: <<http://www.ecma-international.org/publications/files/ECMA-ST/ECMA262.pdf>>. Acesso em: 25 jun. 2012.

ERNERFELDT, E.; BODIN, K. **PHUN!** Disponível em: <<http://www.vrlab.umu.se/research/phun/>>. Acesso em: 25 jun. 2012.

FAIRAND, B. P.; FIDOPIASTIS, N. Radiation sterilization of aseptically manufactured products. *PDA Journal of Pharmaceutical Science and Technology*, v. 64, n. 4, p. 299-304, July-August 2010.

GIBLIN, P.; LIPTON, E. New airport X-rays scan bodies, not just bags. *The New York Times*, February 24, 2007. Disponível em: <<http://www.nytimes.com/2007/02/24/us/24scan.html>>. Acesso em: 25 jun. 2012.

GUIDOLIN, R.; CORRÊA, A.; CICARELLI, R. M. B.; PREVIDE, E.; MORAIS, J. F.; HIGASHI, H. G. Esterilização de soros e vacinas por radiação gama de cobalto. *Revista de Saúde Pública*, v. 22, n. 2, p. 113-7, São Paulo, 1988.

GÜDEL, M. A decade of X-ray astronomy with XMM-Newton. **Astronomy and Astrophysics**, v. 500, n. 1, p. 595-596, June II 2009. DOI 10.1051/0004-6361/200912208.

IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares). Irradiação garante esterilização de materiais médicos e cirúrgicos. **Jornal Órbita**, 01 maio 2003. Disponível em: <<http://www.ipen.br/sitio/?idc=814>>. Acesso em: 25 jun. 2012.

JACOBS, G. P. A review of the effects of gamma radiation on pharmaceutical materials. **J. Biomater. Appl.**, v. 10, n. 1, p. 59-96, July, 1995.

KAWRAKOW, I.; MAINEGRA-HING, E.; ROGERS, D. W. O.; TESSIER, F.; WALTERS, B. R. B. **The EGSnrc code system: Monte Carlo simulation of electron and photon transport**. National Research Council of Canada Report PIRS-701, May 9, 2011.

KNOLL, G. F. **Radiation detection and measurement**. 3rd. ed. New York: Wiley & Sons, 2000.

MAITY, J. P.; KARA, S.; BANERJEE, S.; CHAKRABORTY, A.; SANTRA, S. C. Effects of gamma irradiation on long-storage seeds of *Oryza sativa* (cv. 2233) and their surface infecting fungal diversity. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 78, Issue 11, p. 1006-1010, Nov. 2009.

NIST (National Institute of Standards and Technology), U.S. Department of Commerce. **Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV for elements Z = 1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest**. Disponível em: <<http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/index.cfm>>. Acesso em: 25 jun. 2012.

PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. **Numerical recipes in C: the art of scientific computing**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

SAHIN, D.; SAHIN, S.; KAYRIN, K. **RADLab - Virtual radiation detection experiment open source software**. Disponível em: <<http://radlab.sourceforge.net>>. Acesso em: 25 jun. 2012.

SALVAT, F.; FERNÁNDEZ-VAREA, J. M.; ACOSTA, E.; SEMPAU, J. **PENELOPE: A code system for Monte Carlo simulation of electron and photon**

transport. NUCLEAR ENERGY AGENCY, ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, 2001.

SIEGEL, P.; SIEGEL, J. **California State Polytechnic University Physics Department's Virtual Radiation Laboratory**. Disponível em: <<http://www.csupomona.edu/~pbsiegel/vertuallab/vertlab.html>>. Acesso em: 25 jun. 2012.

SILVA, N. C. **Laboratório de Física Moderna**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

STOCK, S. R. Recent advances in X-ray microtomography applied to materials. **International Materials Reviews**, v. 53, n. 3, p. 129-181, May 2008.

TAYLOR, G. Goals of the introductory Physics laboratory. **Am. J. Phys.**, v. 66, n. 6, June 1998.

VALENCIA, J.; MILLER, S. **X-ray scan detection for cargo integrity** Proc. SPIE 7983, 79830X (2011). DOI:10.1117/12.882003. In: CONFERÊNCIA NON-DESTRUCTIVE CHARACTERIZATION FOR COMPOSITE MATERIALS, AEROSPACE ENGINEERING, CIVIL INFRASTRUCTURE, AND HOME-LAND SECURITY, 2011, San Diego, California, USA.

WATSON, J. D.; CRICK, F. H. C. Molecular structure of nucleic acids: a structure for the deoxyribose nucleic acid. **Nature**, v. 171, p. 737-738, April 1953.

WIEMAN, C. et al. **PHET**. Disponível em: <<http://phet.colorado.edu/>>. Acesso em: 25 jun. 2012.