



Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua  
(organizador)

# CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA E ENGENHARIAS:

Conhecimento e informação

 **Atena**  
Editora  
Ano 2022

Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua  
(organizador)



CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA  
E ENGENHARIAS:

Conhecimento e informação

 **Atena**  
Editora  
Ano 2022



**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira

**Assistente editorial**

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremona

Luiza Alves Batista

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena

Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial****Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof<sup>o</sup> Dr<sup>a</sup> Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará

Prof<sup>o</sup> Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande

Prof<sup>o</sup> Dr<sup>a</sup> Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Prof<sup>o</sup> Dr<sup>a</sup> Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba

Prof<sup>o</sup> Dr<sup>a</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Prof<sup>o</sup> Dr<sup>a</sup> Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí

Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



**Diagramação:** Camila Alves de Cremo  
**Correção:** Yaidy Paola Martinez  
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisão:** Os autores  
**Organizador:** Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)</b>	
C569	Ciências exatas e da terra e engenharias: conhecimento e informação / Organizador Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.  Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-258-0853-6 DOI: <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.536220612">https://doi.org/10.22533/at.ed.536220612</a>  1. Ciências exatas e da terra. 2. Engenharia. I. Paniagua, Cleiseano Emanuel da Silva (Organizador). II. Título.  CDD 507
<b>Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166</b>	

**Atena Editora**  
Ponta Grossa – Paraná – Brasil  
Telefone: +55 (42) 3323-5493  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



O e-book: “Ciências Exatas, da Terra e Engenharias: Conhecimento e informação” é constituído por doze capítulos de livros que foram organizados em quatro tópicos: *i)* fitoquímica e produtos naturais; *ii)* educação, meio ambiente e sustentabilidade e; *iii)* análise, estudo e desenvolvimento de ferramentas e materiais para diferentes aplicações.

Os capítulos I e II se constituem em trabalhos de revisão da literatura na qual se investigaram, respectivamente, a capacidade antioxidante de inúmeras espécies de plantas e; as inúmeras doenças encontradas em orquídeas causadas por diferentes espécies de fungos e quais as ferramentas disponíveis para uma identificação mais precisa destes micro-organismos.

O terceiro capítulo apresenta um estudo de caso na qual se avaliou a importância do tutor no processo de ensino-aprendizagem no curso de licenciatura em Física, na modalidade de educação à distância (EAD), da Universidade Estadual de Maringá (UEM). O capítulo IV se constitui em um estudo no qual se investigou a forma na qual as cidades da microrregião de Maringá/PR tem realizado os levantamentos de georreferenciamento, bem como os procedimentos e os profissionais que atuam no cadastramento de áreas urbanas. Já o capítulo V apresenta um estudo de análise de consumo de energia na Universidade do Estado do Amazonas (UEA) por meio de análise quantitativa que envolveu a iluminação e a climatização das dependências internas da instituição. Por fim, o sexto capítulo apresenta um estudo que avaliou a precipitação pluviométrica no período compreendido entre 01/01/1967 a 31/12/2016 na cidade de Belém/PA.

Os capítulos de VII a XII apresenta trabalhos de diferentes natureza e finalidades, entre os quais: *i)* utilização do *software* TQS (*Software* Definitivo para Engenharia de Estruturas) no cálculo estrutural de diferentes lajes convencionais; *ii)* avaliação dos principais fatores que afetam o desempenho e funcionalidade das máquinas rotativas e as possíveis soluções para melhorias; *iii)* utilização da dosimetria termoluminescente como ferramenta de controle de qualidade no tratamento e/ou diagnóstico de pacientes com câncer; *iv)* utilização da técnica de Monte Carlo na descrição da trajetória de elétrons e fótons em intervalos de energia; *v)* utilização de ferramentas para desenvolvimento e criação de ontologias a serem utilizadas de diferentes formas e; *vi)* reutilização e reciclagem de vidros de para-brisas para a produção de vitrocerâmicas com a adição de diferentes concentrações de pentóxido de nióbio ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ).

Nesta perspectiva, a Atena Editora vem trabalhando de forma a estimular e incentivar cada vez mais pesquisadores do Brasil e de outros países a publicarem seus trabalhos com garantia de qualidade e excelência em forma de livros, capítulos de livros e artigos científicos.

**CAPÍTULO 1 ..... 1****COMPOSTOS COM CAPACIDADE ANTIOXIDANTE ENCONTRADOS EM PLANTAS MEDICINAIS E SEUS BENEFÍCIOS PARA SAÚDE: UMA REVISÃO**

Sharise Beatriz Roberto Berton

Milena do Prado Ferreira

Jomar Berton Junior

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5362206121>**CAPÍTULO 2 ..... 7****DOENÇAS COM ETIOLOGIA FÚNGICA EM PLANTAS DA FAMÍLIA ORCHIDACEAE**

Taciana Ferreira dos Santos

Jaqueline Figueredo de Oliveira Costa

Tiago Silva Lima


Cecília Hernandez Ramirez

Jackeline Laurentino da Silva

Maria Jussara dos Santos da Silva

Gaus Silvestre Andrade Lima

Iraíldes Pereira Assunção

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5362206122>**CAPÍTULO 3 .....35****PAPEL DOS TUTORES NAS PERSPECTIVAS DOS ACADÊMICOS DO CURSO DE FÍSICA (MODALIDADE A DISTÂNCIA) DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ/PR**


Glécilla Colombelli de Souza Nunes

Carolina da Silva Gonçalves

Karina Midori Endo

Lilian Felipe da Silva Tupan

Luciano Gonsalves Costa


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5362206123>**CAPÍTULO 4 .....49****CADASTRO TERRITORIAL URBANO: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE PROCEDIMENTOS E EXIGÊNCIAS DOS MUNICÍPIOS QUE COMPÕE A MICORREGIÃO DE MARINGÁ, PR**

Adriano Antonio Tronco

Claudia Regina Grégio d'Arce Filetti

Marcelo Luis Chicati


Roney Berti de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5362206124>**CAPÍTULO 5 .....62****ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM PRÉDIO PÚBLICO – UM ESTUDO DE CASO**

Nayra Gomes Neves

Phellipe Tocchetto Dinardi


Vinícius Cabral de Serra  
Walter Andrés Vermehren Valenzuela

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5362206125>

**CAPÍTULO 6 ..... 75**

ANALYSIS OF PRECIPITATION IN BELÉM-PA CITY (PERIOD 1967-2016)


Ronaldo Rosales Mendoza

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5362206126>

**CAPÍTULO 7 ..... 88**

ANÁLISE COMPARATIVA ESTRUTURAL ENTRE LAJES MACIÇAS CONVENCIONAIS E LAJES NERVURADAS DE CONCRETO ARMADO POR MEIO DE CÁLCULO MANUAL E O SOFTWARE TQS

João Paulo dos Santos Lima


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5362206127>

**CAPÍTULO 8 ..... 105**

FALHAS NO COMPORTAMENTO DE SISTEMAS ROTATIVOS E POSSÍVEIS SOLUÇÕES

Jomar Berton Junior

Sharise Beatriz Roberto Berton

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5362206128>

**CAPÍTULO 9 ..... 112**

DOSIMETRIA TERMOLUMINESCENTE


Luciana Tourinho Campos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5362206129>

**CAPÍTULO 10..... 119**

CÓDIGO DE MONTE CARLO APLICADO A RADIOTERAPIA


Luciana Tourinho Campos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.53622061210>

**CAPÍTULO 11 ..... 129**

FERRAMENTAS DE DESENVOLVIMENTO E CRIAÇÃO DE ONTOLOGIAS

Henderson Matsuura Sanches

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.53622061211>

**CAPÍTULO 12..... 135**

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE VITROCERÂMICAS OBTIDAS A PARTIR DE PÓ DE VIDRO RECICLADO DE PARA-BRISAS E ADIÇÃO DE Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

Hiasmim Rohem Gualberto


Mônica Calixto de Andrade

Edgard Poiate Júnior

Luiz Carlos Bertolino



Domenio de Souza Faria

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.53622061212>

**SOBRE O ORGANIZADOR..... 146**

**ÍNDICE REMISSIVO..... 147**

# CÓDIGO DE MONTE CARLO APLICADO A RADIOTERAPIA

*Data de aceite: 01/12/2022*

**Luciana Tourinho Campos**

<http://lattes.cnpq.br/9496950727471163>

**RESUMO:** O acoplamento das equações diferenciais que descrevem a trajetória de elétrons e fótons são complicadas para permitir um tratamento analítico. A técnica de Monte Carlo é um capaz de levar em consideração todos esses aspectos no intervalo de energia de interesse. O código de Monte Carlo é construído através do arranjo experimental das medidas e do cálculo de distribuição de probabilidade; por exemplo, aquelas que descrevem o processo de espalhamento fundamental e de perda de energia. A simulação por Monte Carlo do transporte de radiação descreve o processo físico real: as partículas em um meio têm uma determinada trajetória que depende da interação com o meio. Essa é governada através da distribuição de probabilidade (seção de choque total) para o local da interação para aquela energia e determinado ângulo. Este processo é continuado até a partícula ser completamente absorvida pelo meio, deixar a região de interesse, ou ainda, ser descartada por um limite de energia.

Este processo completo é chamado de história. Deste modo, grandezas de interesse podem ser calculadas a partir de um número significativo de histórias. As grandezas estimadas por Monte Carlo têm uma incerteza estatística que depende do número de histórias da partícula.

**PALAVRAS-CHAVE:** Monte Carlo, radioterapia, dosimetria.

**ABSTRACT:** The coupling of differential equations that describe the trajectory of electrons and photons are complicated to allow an analytical treatment. The Monte Carlo technique is capable of taking into account all these aspects in the energy range of interest. The Monte Carlo code is constructed by experimentally arranging the measurements and calculating the probability distribution; for example, those that describe the fundamental scattering and energy loss process. The Monte Carlo simulation of radiation transport describes the actual physical process: particles in a medium have a certain trajectory that depends on the interaction with the medium. This is governed by the probability distribution (total cross-section) for the interaction site for that energy and given angle. This process is continued until the

particle is completely absorbed by the medium, leaves the region of interest, or is discarded by an energy limit. This complete process is called history. In this way, quantities of interest can be calculated from a significant number of stories. The quantities estimated by Monte Carlo have a statistical uncertainty that depends on the number of histories of the particle.

**KEYWORDS:** Monte Carlo, radiotherapy, dosimetry

## 1 | CÓDIGO DE MONTE CARLO

O acoplamento das equações diferenciais que descrevem a trajetória de elétrons e fótons são complicadas para permitir um tratamento analítico. A técnica de Monte Carlo é um capaz de levar em consideração todos esses aspectos no intervalo de energia de interesse.

O código de Monte Carlo é construído através do arranjo experimental das medidas e do cálculo de distribuição de probabilidade; por exemplo, aquelas que descrevem o processo de espalhamento fundamental e de perda de energia.

A simulação por Monte Carlo do transporte de radiação descreve o processo físico real: as partículas em um meio têm uma determinada trajetória que depende da interação com o meio. Essa é governada através da distribuição de probabilidade (seção de choque total) para o local da interação para aquela energia e determinado ângulo. Este processo é continuado até a partícula ser completamente absorvida pelo meio, deixar a região de interesse, ou ainda, ser descartada por um limite de energia. Este processo completo é chamado de história. Deste modo, grandezas de interesse podem ser calculadas a partir de um número significativo de histórias. As grandezas estimadas por Monte Carlo têm uma incerteza estatística que depende do número de histórias da partícula.

Os fótons interagem com a matéria através de quatro processos básicos: Interação Compton, Interação Rayleigh, Interação Fotoelétrica e Produção de Pares. Dependendo do meio considerado e da energia do fóton um tipo de interação pode dominar.

Elétrons interagem com a matéria através de perdas radiativas e colisões inelásticas com elétrons atômicos. As perdas radiativas podem ocorrer na forma de radiação de frenamento ou aniquilação de pósitrons.

Colisões inelásticas de elétrons e interações de fótons com elétrons atômicos levam a excitação dos átomos ao longo de trajetórias de partículas. Átomos excitados com vacâncias em camadas internas relaxam via emissão de fótons e elétrons com energias características.

O código de Monte Carlo EGSnrc (*Electron Gamma Shower of National Research Council Canada*). O EGSnrc é um pacote para a Simulação de Monte Carlo de transporte de elétrons, pósitrons e fótons em diversas geometrias e com intervalo de energia de 1 keV à 10 GeV [1].

O EGSnrc foi desenvolvido através de uma interface de parâmetros de entrada com quatro códigos de usuário onde é possível modificar os parâmetros de entrada para a



geometria de interesse no intervalo de energia de interesse. Todos esses quatro códigos foram desenvolvidos em uma geometria cilíndrica chamada *RZ*. O *R* é o raio do cilindro e *Z* é a altura ou mais comumente a profundidade.

Esses quatro códigos são: o *DOSRZnrc*, *FLURZnrc*, *CAVRZnrc* e o *SPRRZnrc*.

Cada código tem parâmetros de saída diferentes e pode se adequar a uma determinada situação.

Com o código *DOSRZnrc* é possível obter arquivos de saída com a dose e *KERMA* de determinadas regiões da geometria de interesse. O *FLURZnrc* é um código que têm arquivos de saída em fluência de diferentes partículas. O *CAVRZnrc* é um código de usuário que se destina a estudos de câmaras de ionização, com ele é possível obter arquivos de saída para fatores de correção para atenuação na parede da câmara e espalhamento e o *SPRRZnrc* têm arquivos de saída para o espectro de *Spencer-ATTIX* e razão de *stopping power* em dois meios arbitrários [2].

O *EGSnrc* contém em seu pacote o *PEGS4* (do inglês: *Preprocessor of EGS4*) que é uma interface onde o usuário pode criar bibliotecas de *stopping power* e seções de choque para qualquer elemento, composição ou mistura para uma determinada faixa de energia [3].

O *EGSnrc* contém em seu pacote uma biblioteca chamada *521ICRU* que contém dados de poderes de frenamento e seção de choque do *ICRU 37* [4]. Esta biblioteca foi utilizada neste trabalho.

O pacote do *EGSnrc* também contém um visualizador gráfico, chamado *Prewiew RZ*, onde é possível visualizar a geometria de interesse.

Para fótons, o *EGSnrc* armazena os parâmetros iniciais tais como a energia e ângulo em uma matriz que retém as características das partículas a serem processadas. Se a energia for menor que a energia mínima a ser considerada, denominada de energia de corte, o fóton é descartado, a história é terminada e uma nova história tem início. Se a energia do fóton for maior que a energia de corte escolhe-se, com base na seção de choque do meio, a distância da nova interação e o fóton é transportado. Se o fóton ultrapassar a região de interesse ele é descartado, caso contrário é escolhido através de seções de choque o tipo de interação ao qual o fóton será submetido. Esse processo é repetido até que o número total de histórias seja realizado.

Dependendo do tipo de interação a que o fóton for submetido, ele poderá criar elétrons ou pósitrons em sua trajetória; e estes podem perder energia através de processos de colisão ou aniquilação em vôo. O transporte de elétrons é governado por perdas contínuas de energia entre interações discretas de partículas carregadas.

Os parâmetros dos elétrons produzidos são armazenados em uma matriz e são recuperados se a energia do elétron for menor que a energia de corte, o elétron é descartado e a história terminada. A transferência de energia ao meio é contabilizada e se não houver mais nenhum elétron armazenado uma nova história tem início. Caso contrário, através de

seções de choque contabiliza-se a transferência de energia e a distância da nova interação do elétron até que esta seja menor que a energia de corte.

O acoplamento das equações diferenciais que descrevem a trajetória de elétrons e fótons é complicado, de modo a permitir um tratamento analítico. A técnica de Monte Carlo é capaz de levar em consideração todos esses aspectos no intervalo de energia de interesse. Geralmente, a simulação do transporte da radiação por Monte Carlo tem quatro importantes componentes: informações das seções de choque para a simulação do processo físico, o algoritmo de transporte da radiação, especificação da geometria e análise estatística.

O código de Monte Carlo é construído através do arranjo experimental das medidas e do cálculo de distribuição de probabilidade; por exemplo, aquelas que descrevem o processo de espalhamento fundamental e de perda de energia.

A simulação por Monte Carlo do transporte de radiação descreve o processo físico real: as partículas em um meio têm uma determinada trajetória que depende da interação com o meio. Essa é governada através da distribuição de probabilidade (seção de choque total) para o local da interação para aquela energia e determinado ângulo. Este processo é continuado até a partícula ser completamente absorvida pelo meio, deixar a região de interesse, ou ainda, ser descartada por um limite de energia. Este processo completo é chamado de história. Deste modo, grandezas de interesse podem ser calculadas a partir de um número significativo de histórias. As grandezas estimadas por Monte Carlo têm uma incerteza estatística que depende do número de histórias da partícula.

A história da partícula começa pela sua criação, com energia e coordenadas de posição definidas de acordo com a distribuição específica da fonte. O tipo da interação e as partículas resultantes são determinados pela seção de choque do meio. Se a energia for menor que a energia mínima a ser considerada, denominada de energia de corte, a partícula é descartada, sua história é terminada e uma nova história tem início. Se a energia da partícula for maior que a energia de corte, o código determina, com base na seção de choque do meio, a distância da nova interação e esta é transportada. Se a partícula ultrapassar a região de interesse, ela é descartada. Em caso contrário, é escolhido, através de seções de choque, o tipo de interação à qual a partícula será submetida.

Os parâmetros das partículas produzidas são armazenados em uma matriz e são recuperados, se a energia destas for menor que a energia de corte, se o elétron for descartado e se a história terminar. Então, a transferência de energia ao meio é contabilizada e, se não houver mais nenhuma partícula armazenada, uma nova história tem início. Caso contrário, através das seções de choque, contabiliza-se a transferência de energia e a distância da nova interação da partícula, até que esta seja menor que a energia de corte. Esse processo é repetido até que o número total de histórias seja alcançado.[1].

## 2 | TRANSPORTE DE FÓTONS

Os fótons interagem com a matéria através de quatro processos básicos: Interação Compton, Interação Rayleigh, Interação Fotoelétrica e Produção de Pares. Dependendo do meio considerado e da energia do fóton, um tipo de interação pode predominar.

Dependendo do tipo de interação a que o fóton for submetido, ele poderá criar elétrons ou pósitrons em sua trajetória; e estes podem perder energia através de processos de colisão ou aniquilação em vôo.

Os fótons também podem interagir de outras maneiras não significantes no intervalo de energia em que a radioterapia se aplica.

## 3 | TRANSPORTE DE ELÉTRONS

Partículas carregadas perdem sua energia de modo distinto das partículas não carregadas (raios-X, gama ou nêutrons). Um fóton ou nêutron incidindo na matéria pode atravessá-la sem interagir, e conseqüentemente sem perder energia. Ou pode interagir e perder sua energia em uma ou poucas colisões. Uma partícula carregada, por outro lado, interage com um ou mais elétrons ou com o núcleo de todo átomo ou molécula que encontra. A maioria destas interações transfere, individualmente, uma pequena fração da energia da partícula incidente. A probabilidade de uma partícula carregada passar pela matéria sem interagir é desprezível. Uma partícula carregada de 1 MeV colide tipicamente  $10^5$  vezes antes de perder toda a sua energia. A energia transferida de cada partícula carregada para o meio, em cada interação individual, é geralmente pequena. O poder de frenamento é o parâmetro utilizado para descrever a perda gradual de energia quando um elétron penetra em um meio absorvedor. Duas classes de poderes de frenamento são conhecidas: o poder de frenamento colisional que resulta da interação com os elétrons orbitais e o poder de frenamento radiativo que resulta da interação com o núcleo.

Quando um elétron atravessa um meio, seja gasoso ou sólido, este pode interagir através de três modos diferentes, que dependem do tamanho do parâmetro de impacto  $b$  comparado com o raio do átomo clássico  $a$ . Esses três modos são:

- Interação da força coulombiana da partícula carregada com o campo nuclear externo para  $b \ll a$  (colisão radiativa).
- Interação da força coulombiana da partícula carregada com o elétron orbital para  $b \approx a$  colisão (colisão dura).
- Interação da força coulombiana da partícula carregada com o elétron orbital para  $b \gg a$  (colisão suave).

Geralmente, as partículas carregadas sofrem um grande número de interações. Em cada interação sua trajetória é alterada (espalhamento elástico ou inelástico) e pode perder energia cinética que será transferida para o meio ou para os fótons (perda radiativa).



As colisões radiativas, suaves e duras são ilustradas esquematicamente na Figura 1.

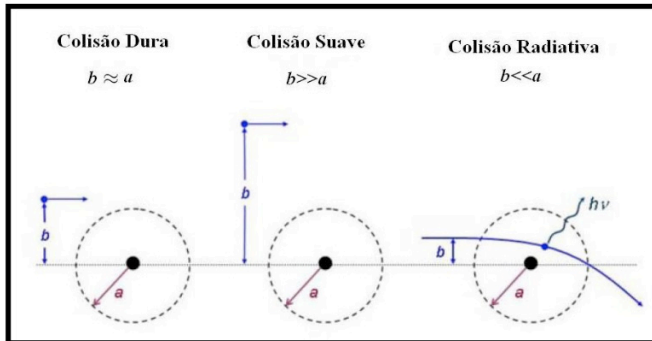


Figura 1: Três diferentes tipos de colisão de uma partícula carregada com um átomo em função dos tamanhos relativos do parâmetro de impacto  $b$  e do raio atômico  $a$ .

A taxa de energia perdida por unidade de distância percorrida por uma partícula carregada em um meio é chamada de poder de frenamento linear ( $dE/dx$ ). O poder de frenamento linear é, tipicamente, dado em unidade de  $\text{MeV.cm}^2/\text{g}$ .

O poder de frenamento total  $S_{tot}$  para uma partícula carregada através de um meio absorvedor é a soma do poder de frenamento radiativo com o colisional.

Teoricamente, as interações dos elétrons podem ser simuladas da mesma maneira que as dos fótons. Contudo, elétrons interagem milhões de vezes mais que fótons, consumindo muito mais tempo de simulação. O tempo computacional requerido para este lento processo de transporte de evento por evento seria impraticável. Por este motivo, a simulação por Monte Carlo destas partículas torna-se mais complexa. Este problema é considerado no EGSnrc utilizando a técnica de história condensada descrito por BERGER [5]. Neste método, um grande número de interações individuais são condensadas em um único passo. Todo o efeito deste passo é modelado através das distribuições da teoria do espalhamento múltiplo.

A técnica da história condensada é uma aproximação razoável considerando que em muitos casos uma única interação causa uma pequena mudança da direção e energia do elétron. Mais detalhes podem ser encontrados; no trabalho de KAWRAKOW e BIELAJEW [6].

#### 4 | CÓDIGO PEGS4 (PREPROCESSOR OF EGS4)

O EGSnrc contém em seu pacote o PEGS4 (do inglês: *Preprocessor of EGS4*) que é uma interface onde o usuário pode criar bibliotecas de *stopping power* e seções de choque para qualquer elemento, composição ou mistura para uma determinada faixa

de energia [3].

O EGSnrc contém em seu pacote duas bibliotecas chamadas 521ICRU e 700ICRU, que contêm dados de poderes de frenamento e seção de choque do ICRU 37 [7]. Estas bibliotecas foram utilizadas neste trabalho.

## 5 | ENERGIA DE CORTE

Há uma variedade de parâmetros de transporte no EGSnrc que devem ser especificados para cada simulação. Um deles é a energia de corte. Se a energia da partícula atingir um valor abaixo da energia de corte a simulação por Monte Carlo do transporte da partícula pára e sua respectiva energia é depositada localmente. Há uma energia de corte para elétrons e outra para fótons.

## 6 | CÓDIGO BEAMNRC

BEAMnrc [30] é um código computacional utilizado para modelar qualquer fonte de radioterapia, em geral cabeçotes de aceleradores lineares clínicos com feixes de fótons ou elétrons, incluindo raios-X de baixa energia e unidades de cobalto. Este foi desenvolvido como parte do projeto OMEGA (do inglês, *Ottawa Madison Electron Gamma Algorithm*) para o desenvolvimento de planejamento de tratamento em três dimensões baseado em simulação de Monte Carlo.

O BEAMnrc foi extensivamente comparado contra distribuições de dose medidas para uma variedade de aceleradores e um bom resultado foi obtido para o PDP no eixo central assim como curvas de perfis de dose do campo de irradiação.

A simulação de um acelerador linear clínico a partir do BEAMnrc é possível através de uma série de módulos componentes (CMs, do inglês: *component modules*) existentes como opção de construção de geometria no código. Cada módulo componente existente representa um componente do acelerador linear utilizado para tratamento. Cada módulo componente opera independentemente dos outros. Cada um está contido entre dois planos que são perpendiculares ao eixo z e que não podem se sobrepor. A independência dos CMs permite que cada um seja testado individualmente. A dose pode ser registrada em certo número de regiões arbitrárias. Os módulos componentes que foram utilizados neste trabalho para o acelerador linear Varian Clinac 2300 C/D são descritos no capítulo Materiais e Métodos.

O BEAMnrc também contém um visualizador gráfico, chamado *Preview*, onde é possível visualizar cada módulo componente individualmente assim como todos os módulos componentes necessários à criação de um cabeçote de acelerador linear.

O BEAMnrc contém 14 rotinas de fontes que podem ser utilizadas. Em geral as partículas incidentes que compõem as fontes se movem na direção do eixo z. Conceitualmente, algumas se originam fora da região de modelagem do acelerador e são

transportadas pelo vácuo do acelerador, onde tem início o plano do acelerador.

Uma das principais características do BEAMnrc é que o arquivo de espaço de fase pode ser utilizado como fonte entre quaisquer dois CMs no acelerador. No arquivo de espaço de fase ficam armazenadas as informações de cada partícula que cruzou o plano de contagem. Informações sobre ângulo, energia, posição, carga e direção.

O BEAMnrc tem três importantes arquivos de saída: A listagem de saída, o arquivo de espaço de fase e o arquivo gráfico. O arquivo de listagem de saída é sempre criado durante a simulação. Ele contém toda a informação de dados de entrada para a simulação do acelerador, uma especificação exata do modelo do acelerador utilizado e os parâmetros geométricos para cada módulo componente. O arquivo de espaço de fase é opcional. Ele contém informações individuais de cada partícula cruzando o plano de contagem. Este arquivo pode ser reutilizado pelo BEAMnrc ou analisado, utilizando o programa BEAMDP ou mesmo sendo utilizado como fonte no DOSXYZnrc. Outro importante arquivo de saída opcional é o arquivo gráfico com uma representação simples para ser utilizada no EGS\_Windows. O usuário pode solicitar o arquivo de saída de uma história completa, que contém cada passo ao longo da trajetória da partícula, que poderá ser executado no EGS\_Windows, gerando uma imagem em três dimensões.

Para estimar a incerteza estatística do resultado obtido com Monte Carlo, o BEAMnrc utiliza o método de história por história. A incerteza de cada quantidade contada  $x$  é definida na equação 1:

$$s^2_{(x)} = \frac{1}{N-1} \left( \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N} - \left( \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \right)^2 \right) \quad (1)$$

onde  $x_i$  é a quantidade contada na  $i$ -ésima história independente e  $N$  é o número de histórias independentes [8].

## 7 | CÓDIGO BEAMDP

BEAMDP (do inglês: *BEAM Data Processor*) é um programa interativo utilizado para analisar parâmetros de feixes clínicos de elétrons ou fótons contidos nos arquivos de espaço de fase gerados pelo BEAMnrc. Todos os gráficos de parâmetros tais como: distribuição espectral, fluência *versus* posição, distribuição de energia média e outros são gerados pelo programa BEAMDP [9].

## 8 | CÓDIGO DOSXYZNRC

O DOSXYZnrc é um código de usuário do EGSnrc para calcular dose absorvida da radiação em um *voxel*<sup>1</sup> retangular baseado em um simulador geométrico. Este simula

<sup>1</sup> **Voxel**: aglutinação de *volume* e *element*, ou seja, elemento de volume. Representa um valor em uma matriz em três dimensões. É análogo ao pixel, o qual representa uma inforação em duas dimensões. *Voxels* são frequentemente

o transporte da partícula em um volume Cartesiano e armazena a energia depositada em todos os *voxels* designados. As dimensões dos *voxels* são independentes em todas as três direções. O material e a densidade de cada *voxel* podem ser especificados individualmente. Para a análise estatística, o método história por história é adotado na contagem de quantidades de interesse (por exemplo, energia depositada).

O código DOSXYZnrc é apresentado para o usuário em interface gráfica onde permite que dados de entrada sejam criados e executados graficamente.

A geometria do DOSXYZnrc é um volume retangular com o plano X-Y na página, o plano X para a direita e Y para a esquerda e o plano Z entrando na página. As dimensões dos *voxels* são completamente variáveis em todas as direções. Cada *voxel* pode ter diferentes materiais e/ou variadas densidades (para a utilização com a tomografia computadorizada). O código permite diferentes tipos de fontes, tais como fonte pontual monoenergética com feixe divergente ou paralelo, além de ter a opção de utilizar o arquivo de espaço de fase gerado previamente por uma simulação de um acelerador linear pelo BEAMnrc. Esta última foi utilizada como rotina de fonte no presente trabalho.

Neste código há também a possibilidade de utilizar uma tomografia computadorizada (CT, do inglês, *computed tomography*) como geometria de cálculo para a dose absorvida. No entanto, para isso há a necessidade de conversão da CT para uma matriz que represente os materiais e densidades presentes na tomografia no volume Cartesiano do código. Para esta conversão é necessário o programa *ctcreate*.

O *ctcreate* é um programa independente, mas que auxilia o DOSXYZnrc a converter a informação obtida na imagem de CT em dados necessários para executar a simulação no DOSXYZnrc. Até o presente momento ele suporta apenas arquivos de CT dos sistemas de planejamento do CADPLAN da *Varian Medical Systems*, Pinnacle da *Philips Healthcare* e formatos de arquivos DICOM<sup>2</sup>, além de um formato desenvolvido pela Associação Americana de Físicos Médicos (AAPM, do inglês: *American Association of Physicists in Medicine*) [10].

## REFERÊNCIAS

[1] KAWRAKOW, I., ROGERS, D. W. O., *The EGSnrc Code System: Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport*, Technical Report PIRS-701, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada, 2000.

[2] KAWRAKOW, I., ROGERS, D. W. O., SEUNTJENS, J.P., WALTERS, B.R.B., HING, M.E., *NRC User Codes for EGSnrc*, Technical Report PIRS-702, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada, 2003.

[3] KAWRAKOW, I., ROGERS, B. R. B., HING, M. E., *EGSnrcMP: The Multi-Platform Environment for EGSnrc*, Technical Report PIRS-877, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada, 2003.

---

utilizados em visualizações de análises médicas. Alguns mostradores volumétricos utilizam *voxels* para descrever sua resolução.

[4] ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements), Report 37, *Stopping Powers for Electrons and Positrons*, ICRU Publications, Washington DC, 1984.

[5] KAWRAKOW, I., ROGERS, D. W. O., WALTERS, B., *BEAMnrc Users Manual*, Technical Report PIRS-509, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada, 2004.

[6] BERGER, M.J., 1963, "Monte Carlo Calculation of the penetration and diffusion of fast charged particles", in Academic Press, *Methods in Computational Physics*, pp 135-215, New York.

[7] KAWRAKOW, I., BIELAJEW, F., 1998, "On the condensed history technique for electron transport", *Nuclear instruments and Methods*, 143B-253.

[8] ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements), Report 37, *Stopping Powers for Electrons and Positrons*, ICRU Publications, Washington DC, 1984.

[9] SEGO, Z., 2006, *Multiple-source models for the beams from an Elekta SL25 clinical accelerator*, Master Dissertation, University of Carleton, Ottawa, Canada.

[10] MA, C.M., ROGERS, D. W. O., *BEAMDP as a General-Purpose Utility*, Technical Report, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada, 2006.

[11] KAWRAKOW, I., ROGERS, D. W. O., WALTERS, B., *DOSXYZnrc Users Manual*, Technical Report PIRS-794, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada, 2005.

**A**

Alcalóides 3

Anti-inflamatórias 4

Antioxidantes 1, 2, 4

Armadilhas 114, 115, 116

Átomos excitados 120

AVA (Ambiente Virtual de Aprendizagem) 38, 39, 40, 45, 46

**B**

Banda de condução 114

Banda de valência 113, 114

*Bio-climatic zone* 75

*Biodiversity* 75, 87

*BlackBoard* 44

Buraco 114

**C**

Cadastros urbanos 49, 50, 59

Código de Monte Carlo 119, 120

Colisões inelásticas 120

Compostos fenólicos 2, 3

Concreto armado 88, 89, 90, 103, 104

CONFEA (Conselho Federal de Engenharia e Agronomia) 50, 51, 52, 57, 60

**D**

Desalinhamento angular 108

Desalinhamento paralelo 108

Desbalanceamento 105, 106, 107, 110

Desvanecimento 115, 116

Diagnose 7, 8, 9

Difração de Raios X (DRX) 135, 136, 138, 139, 141

Discente 38

Dosimetria 112, 113, 115, 118, 119

**E**

*Ecosystems* 75, 85

Eficiência energética 62, 63, 64, 65, 66, 74

EGSnrc (*Electron Gamma Shower of National Research Council Canada*) 120, 121, 124, 125, 126, 127

Eixos de rotação 109

Elétrons 112, 113, 114, 115, 116, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126

Emissão de luz 113, 114, 116

## F

*Feedback* 45

Ferramentas 5, 8, 16, 106, 129, 130, 132, 133, 134

Fitopatógenos 8, 9, 28

Fitoquímicos 3, 4

Flavonóides 1, 3, 4

Forças centrífugas 107

Fóton 120, 121, 123

Frenamento 120, 121, 123, 124, 125

Fungos 7, 9, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 30, 31, 32

## G

Georreferenciamento 49, 50, 56, 58, 59, 60

*Google for Education* 44

*Guamá River* 78

## H

*Hazard* 76

## I

Indústria 4.0 106

## L

Lajes maciças 88, 89, 90, 93, 95, 96, 98, 99, 101, 102, 103, 104

Lajes nervuradas 88, 89, 96, 101, 103, 104

Lâmpada fluorescente 70

Logística reversa 136

## M

Máquinas rotativas 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111

MEC (Ministério da Educação) 36, 37, 48

Meio ambiente 29, 31, 107



Micrografias 142

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 135, 139

MOODLE 44

Multifinalitário 50, 51, 52, 57, 58, 60, 61

## N

Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Pentóxido de nióbio) 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144

NEAD (Núcleo de Educação a Distância) 37, 42

## O

Ontologia 129, 130, 131, 132, 133

*Orchidaceae* 7, 8, 10, 12, 14, 15, 17, 23, 25, 30, 32, 33, 34

Orquídeas 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 27, 28, 30, 31, 32, 33

Orquidicultura 11

OWL (*Ontology Web Language*) 129, 130, 132, 133

## P

*Pará River* 78

Plano diretor 50

Plantas medicinais 1, 2, 3, 4

Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) 136, 144

## R

Reciclagem 135, 136, 144

Resíduos 135, 136, 144, 146

*Resource Description Framework* (RDF) 130

Reutilização 135

Rotor 105, 106, 107, 110, 111

## S

Sistemas energéticos 62, 63

Sustentabilidade 63, 144

## T

Taninos 3

Termoluminescente 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118

TQS (*Software Definitivo para Engenharia de Estruturas*) 88, 89, 91, 92, 93, 94,

95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 103

Tutor 35, 36, 38, 39, 40, 42, 45, 46, 47, 48

## U

UAB (Universidade Aberta do Brasil) 36, 37, 38, 39, 42, 46, 48

UEM (Universidade Estadual de Maringá) 1, 35, 36, 38, 40, 41, 42, 47, 105

## V

Vibrações mecânicas 109

Vidro 135, 136, 137, 139, 140, 143, 144

Vitrocerâmicas 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144

## W

*Water* 76, 77, 84, 85, 86

*Web Semântica* 129, 130, 131, 132, 133

# CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA E ENGENHARIAS:

Conhecimento e informação

-  [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)
-  [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

# CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA E ENGENHARIAS:

Conhecimento e informação

-  [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)
-  [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)