

DETERMINAÇÃO DE ESPECTROS DE NÊUTRONS RESULTANTES DA INTERAÇÃO DE PARTÍCULAS DE ALTA ENERGIA INCIDENTES NA ATMOSFERA TERRESTRE UTILIZANDO O CÓDIGO MONTE CARLO GEANT4

BELO, I. B.

Igor Burgo Belo

Coordenação de Radiologia – CEFET-PE

Av. Prof. Luiz Freire, 500 – Cidade Universitária CEP 50740-540 Recife-PE

Departamento de Radioproteção e Dosimetria-DIRAD – CRCN

Av. Prof. Luiz Freire, 01 – Cidade Universitária CEP 50740-540 Recife-PE

E-mail: igor.burgo@gmail.com

PASSOS, R. S.

Robson Silva Passos

Coordenação de Radiologia – CEFET-PE

Coordenação de Segurança do Trabalho – CEFET-PE

Av. Prof. Luiz Freire, 500 – Cidade Universitária CEP 50740-540 Recife-PE

E-mail: robson.passos@hotmail.com

VILELA, E. C.

Eudice Correia Vilela

Departamento de Radioproteção e Dosimetria-DIRAD – CRCN

Av. Prof. Luiz Freire, 01 – Cidade Universitária CEP 50740-540 Recife-PE

E-mail: ecvilela@cnen.gov.br

PAGANINI, S.

Silvia Paganini

Departamento de Física – UFRR

Av. Cap. Ené Garcêz, 2413 – Boa Vista CEP 69304000 Boa Vista-RR

E-mail: silvia.paganini@gmail.com

RESUMO

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP), na sua publicação 60 recomenda a inclusão de tripulações de aeronaves como trabalhadores ocupacionalmente expostos. A partir de 1991 muitos estudos foram iniciados visando caracterizar o nível de exposição dessas tripulações com mais precisão, tanto do ponto de vista experimental como teórico. No Brasil poucos trabalhos têm sido desenvolvidos neste sentido e estes são realizados no grupo que é formado por pesquisadores do CRCN/UFRR/CEFETPE.

A avaliação de dose a que estes trabalhadores estão expostos não seria bem determinada se não se considerar a componente neutrônica a que todos eles estão submetidos. Estes nêutrons são resultantes da interação de partículas carregadas de origem solar e galáctica com os componentes da atmosfera terrestre, e correspondem em média a 50% da radiação presente na região onde a tripulação das aeronaves exerce suas atividades.

Nêutrons são partículas que possuem grande massa e não interagem com a matéria por meio da força colombiana, que predomina nos processos de transferência de energia da radiação para a matéria. Por isso são bastante penetrantes possuindo um alto poder de ionização. A Agência Internacional para Pesquisas de Câncer (IARC) tem concluído que há evidências suficientes que nêutrons são cancerígenos para o ser humano.

O espectro em energia dos nêutrons nestas situações pode variar desde alguns eV até cerca de 1 GeV. A determinação destes espectros possibilita calcular os coeficientes de conversão de fluência à dose efetiva para tripulação aérea, irradiando um modelo antropomórfico baseado em elementos de volume (voxels).

O objetivo deste trabalho é determinar espectros de nêutrons de alta energia, ou seja, de energias superiores a 20 MeV, o que viabilizará a determinação, de modo teórico, da dose efetiva recebida por tripulações brasileiras.

Para atingir o objetivo deste trabalho será utilizado o código Monte Carlo GEANT4 que possibilita a realização do transporte de nêutrons nesta faixa de energia.

PALAVRAS-CHAVE: nêutron, espectro, geant4, dosimetria.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Raios Cósmicos

Raios Cósmicos são compostos de partículas relativísticas que viajam no espaço com energias que podem variar desde alguns GeV até 100 EeV (10^{20} eV). Essas partículas são basicamente prótons, núcleos, elétrons, fótons e neutrinos e suas respectivas antipartículas. Uma partícula constituinte dos raios cósmicos que entre na atmosfera da Terra interage com núcleos atômicos ali presentes, gerando uma cascata de partículas conhecida como chuva atmosférica. (GUIDI, 2000)

Basicamente, existem dois tipos de raios cósmicos que chegam à vizinhança da Terra : os Raios Cósmicos Solares (RCS) e os Raios Cósmicos Galácticos (RCG), sendo que estes possuem origens diferentes e processos semelhantes de formação. (BRUM, 2004)

1.1.1. Raios cósmicos solares: Os Raios Cósmicos Solares são de origem solar e sua ocorrência é devida principalmente às explosões solares intensas, quando são liberadas grandes quantidades de energia abrangendo uma extensa faixa do espectro eletromagnético, além da ejeção de partículas energéticas, principalmente elétrons e prótons. Os prótons que atravessam a distância Sol-Terra entre 1 e 3 horas, durante um evento de próton solar (por exemplo), se precipitam em maior quantidade entre as alturas de 60 a 90km. (BRUM, 2004)

1.1.2. Raios cósmicos galácticos: Estes Raios Cósmicos consistem de partículas nucleares energéticas (em torno de 100 GeV) encontradas no espaço interplanetário, que chegam ao topo da atmosfera terrestre vindo de todas as direções. A radiação cósmica galáctica que chega até nosso sistema planetário, até certo ponto, é divergida para longe das vizinhanças do Sol pelo campo magnético interplanetário. Durante o máximo solar, o campo magnético do Sol está mais intenso e este, por sua vez, é “congelado” no plasma expelido nos “flares” solares e nos ventos solares que se propagam no meio interplanetário e, conseqüentemente, aumentam a intensidade do campo magnético interplanetário. Este campo magnético, por sua vez, bloqueia os raios cósmicos menos energéticos, deixando chegar até as vizinhanças da Terra apenas as partículas mais energéticas, diminuindo assim o fluxo de partículas que incidem na superfície da Terra durante o período de máximo solar. No período de mínimo solar acontece um fenômeno contrário, ou seja, neste período o campo magnético interplanetário está menos intenso facilitando a passagem dos raios cósmicos menos energéticos e, desta forma, aumentando a incidência de partículas na superfície terrestre. (BRUM., 2004)

1.2 A Penetração de Partículas na Atmosfera

O transporte de partículas através da magnetosfera dá-se por difusão (radial e angular). Em geral, os prótons solares penetram na atmosfera pela região da Calota Polar de Absorção (PCA). Os eventos PCA estão associados com tempestades geomagnéticas. Estes eventos podem durar de 1 a 6 dias e podem penetrar a atmosfera até altitudes de 30 km ou menos, produzindo considerável aumento da ionização. Em eventos extensos, o efeito pode mesmo se estender em direção ao equador. O fator que interfere na penetração dos (Raios Cósmicos Galácticos) GCR na atmosfera é a rigidez geomagnética de corte⁴. Este valor varia em função da latitude geomagnética, da altitude (ou seja, da densidade atmosférica) e da direção de incidência das partículas. O valor da rigidez de corte é máximo na região do equador geomagnético e mínimo nas regiões polares. Como os “flares” solares são mais freqüentes no período de máximo de manchas solares, os eventos PCA também são mais comuns nesta fase, introduzindo portanto uma freqüência de ocorrência de 11 anos em seu ciclo. Durante os “flares”, ocorre um aumento da incidência de radiações e partículas e isto causa distúrbios na ionosfera.

Já os eventos de prótons solares são mais freqüentes durante os anos de mínima atividade solar, provavelmente porque as estruturas da espiral do Campo Magnético Interplanetário (IMF) são mais favoráveis quando o Sol está menos ativo. Para os elétrons, a situação é mais complexa porque aparecem efeitos magnetosféricos restritos a altitudes acima de 80 km. Entretanto, raios-X secundários de “bremsstrahlung” (radiação de freamento) produzidos por estes elétrons relativísticos que podem alcançar a baixa atmosfera. (ALMEIDA, 2001).

1.3 Interação dos Raios Cósmicos com a Atmosfera

Os raios cósmicos ao incidirem sobre a atmosfera terrestre são denominados de partículas primárias (ou radiação cósmica primária) e uma vez interagindo com os núcleos atmosféricos passam a ser denominadas de radiação cósmica secundária onde a energia liberada neste processo é responsável por uma parcela considerável da ionização da baixa ionosfera. (BRUM, 2004)

Raios cósmicos primários são aqueles que atingem a Terra proveniente do espaço. A radiação cósmica primária atinge a alta atmosfera e interage com seus átomos. Na colisão, além do núcleo atingido geralmente desintegrar-se em seus nucleons constituintes (prótons e nêutrons), é produzida uma grande quantidade de partículas secundárias — píons, káons, híperons, anti-prótons, elétrons etc.. A partícula primária, que retém a maior parte de sua energia após a colisão, bem como as partículas produzidas, interagem com novos núcleos, formando uma cascata de partículas radioativas, que decaem de diversas maneiras formando raios gama, elétrons, múons e neutrinos. Os raios cósmicos secundários são compostos destas partículas produzidas na atmosfera.

Os componentes primários dos raios cósmicos são basicamente formados por prótons (83%), partículas alfa (13%) e um pequeno resíduo formado por elétrons (3%) e por núcleos desprovidos de grande número atômico (1%), estes últimos possuindo um número atômico inferior a dois (Jursa, 1985) além de uma parcela reduzida de partículas com número atômico aproximadamente igual a 90. (BRUM, 2004)

Os raios cósmicos primários ao adentrarem na atmosfera sofrem as primeiras interações com o meio. Estas colisões podem ser de dois tipos: com a estrutura eletrônica do átomo e com o núcleo do mesmo. As colisões do primeiro tipo geralmente liberam um elétron da estrutura atômica da matéria com a qual interagiu pelo mecanismo conhecido como ionização. O segundo tipo de colisão supõe um próton de energia relativística adentrando em um meio mais denso o qual propicia aproximadamente 6000 colisões por metro percorrido em condições normais de pressão, ou seja, este próton realiza 30 colisões ionizantes por 0,01m de ar, e alguns dos elétrons liberados destas interações possuem energia suficiente para produzir novas ionizações. Portanto, 30 ionizações primárias podem produzir outras 30 ionizações secundárias.

Quando um raio cósmico primário choca-se diretamente com o núcleo de um átomo atmosférico, dependendo da energia da partícula primária, do tamanho do núcleo, etc... pode ocorrer uma variedade de processos. Estes processos podem ser divididos em processos de absorção e de colisões (elásticas e inelásticas). Em processos de colisão elástica a quantidade de movimento e a energia cinética total se conservam (semelhante a colisões de bolas de bilhar). Já nos processos de dispersão inelástica uma fração da energia dos raios cósmica incidentes é absorvida pelo núcleo que por sua vez é excitado. Esta energia em excesso é posteriormente emitida em forma de raios γ , partículas α , nêutrons (n), prótons (p), mésons π nêutrons (π^0), mésons π carregados (π^+ e π^-), anti-prótons e anti-nêutrons ($\bar{\alpha}$ e $\bar{\gamma}$), mésons pesados (K) e hyperons (Y).

Os mésons π neutros decaem rapidamente devido a uma interação nuclear energética no topo da atmosfera dando origem a um par de raios gama de alta energia (γ), que por sua vez transformam-se (Processo de Produção de Par) em elétrons positivos (pósitrons) e elétrons negativos de alta energia (e^+ e e^- , respectivamente). Estes elétrons de alta energia são desviados de sua trajetória pelo campo elétrico do núcleo atômico resultando em outro elétron e um outro raio gama, agora com uma energia um pouco menor (radiação de freamento). Os processos de Produção de Par e de Bremsstrahlung continuam sem interrupção na parte inferior da atmosfera, originando a chamada Cascata Eletromagnética.

Os mésons π carregados decaem para mésons μ (μ^+ e μ^-) e neutrinos (ν). Os mésons μ originados nesta interação decaem para elétrons e neutrinos, deste modo a maioria das partículas carregadas que chegam à superfície da Terra são elétrons, pósitrons e mésons μ (Rossi, 1964).

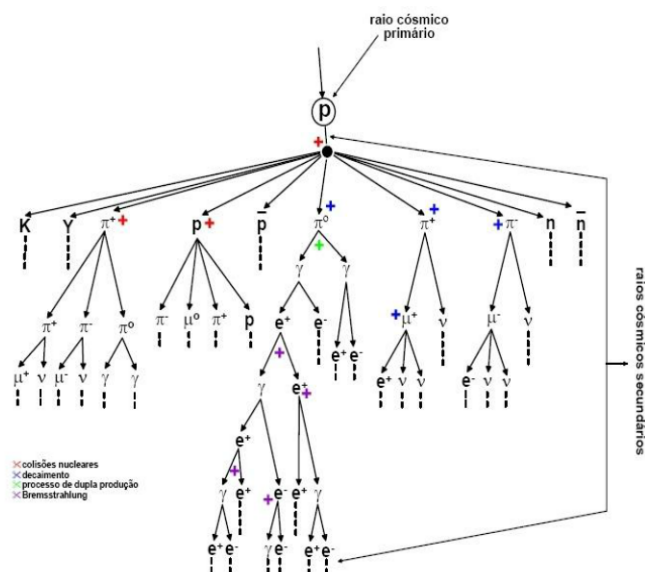


FIGURA 1: Representação das reações envolvidas na interação das partículas dos raios cósmicos primários com a atmosfera terrestre dando origem aos raios cósmicos secundários. (BRUM, 2004)

1.4 Chuveiro Atmosférico

O fluxo de raios cósmicos decresce muito rapidamente com a energia. Para energias abaixo de 10^{13} eV, pode-se detectar os raios cósmicos primários através de medidas diretas, em experimentos onde os detectores são colocados em satélites ou em balões. Para energias superiores a 10^{13} eV o baixo fluxo torna as medidas diretas inviáveis, e os raios cósmicos só podem ser estudados através dos chuveiros atmosféricos produzidos quando colidem com átomos da atmosfera. (GUIDI, 2000)

Quando uma partícula de alta energia interage com um núcleo presente no topo da atmosfera forma-se uma cascata de partículas, ou chuveiro atmosférico, cujo número de partículas pode superar 10^6 . Se a partícula primária possuir energia superior a 10^{13} eV, o chuveiro atmosférico pode atingir a superfície, cobrindo uma área de vários quilômetros quadrados. (GUIDI, 2000)

1.5 Introdução ao GEANT4

O Geant4 foi desenvolvido por um comitê internacional, envolvendo países da Europa, o Japão, Canadá e os Estados Unidos. Este Framework é desenvolvido em C++ e explora técnicas avançadas de Engenharia de software.

O Toolkit Geant4 é um pacote de software livre composto de ferramentas que podem ser utilizadas para simular a passagem de partículas através da matéria. Todos os aspectos para simulação foram incluídos neste ambiente de programação:

- a geometria do sistema;
- os materiais envolvidos;
- as partículas fundamentais de interesse;
- a geração de eventos;
- a trajetória das partículas através dos materiais e dos campos eletromagnéticos;

- os processos da física envolvidos nas interações;
- o armazenamento dos eventos;
- a visualização da trajetória das partículas e
- a captação e a análise de dados da simulação em níveis diferentes de detalhe e de refinamento. O ambiente de programação supracitado é utilizado por várias instituições de pesquisa e ensino em todo o mundo, para aplicações tanto na área médica como na astrofísica e outras áreas.

O GEANT4 é formado em categorias que são usadas intrinsecamente e fornecem a estrutura do toolkit.

- global** – Esta categoria cobre o sistema de unidades, de constantes, de numerais e da manipulação dos números aleatórios.
- materials e particles** – Estas duas categorias executam as facilidades necessárias para descrever as propriedades físicas das partículas e dos materiais para a simulação de interações da partícula-matéria.
- geometry** – Este classe oferece a habilidade de descrever uma estrutura geométrica e de propagar eficientemente partículas através dele.
- track** – Acima desta classe residem as categorias requeridas para descrever a trajetória das partículas e os processos físicos a que elas se submetem.
- processes** – É a categoria, que contem as execuções dos modelos de interações físicas: interações eletromagnéticas dos leptons, dos fótons, hadrons e dos íons, e interações hadrônicas.
- tracking** – Esta é a categoria que controla a contribuição, evolução do estado de uma track e fornece a informação aos volumes sensíveis.
- event** – Classe de controle dos eventos que estão ocorrendo no decorrer da simulação.
- run** – Essa classe controla um conjunto de eventos que compartilham de uma execução comum no detector.
- readout** – Categoria que permite a manipulação dos eventos ocorridos anteriormente.

Finalmente todas as categorias se conectam com facilidade fornecendo um potencial de visualização e de interação com o usuário final.

2. METODOLOGIA

Inicialmente houve a necessidade do aprendizado básico da linguagem de programação C++ e da plataforma GEANT4 ambos necessários para realização do trabalho.

No laboratório de Dosimetria Numérica do CRCN, foi desenvolvido um software, baseado na plataforma GEANT4, que fornece o espectro de qualquer tipo de partícula de origem cósmica, num volume de ar pré-definido à altitude de 10 km. Cumprida a primeira etapa, foi iniciada a geração de dados nas faixas de energia de interesse. Por enquanto no laboratório de dosimetria numérica do CRCN está sendo examinado o espectro dos nêutrons gerados dentro do intervalo energético de $80 \text{ MeV} < E < 120 \text{ MeV}$, que é a capacidade de processamento do software.

Na figura 2 pode-se observar a simulação de um chuvaire atmosférico extenso típico, obtido com o programa gráfico OpenGL que pertence aos pacotes de software suportados pelo sistema GEANT4. Um cilindro de raio de 10km, visível na cor amarela, representa a atmosfera ao longo do seu comprimento de 40km, abrangendo o intervalo de 50km até 10km de altitude.

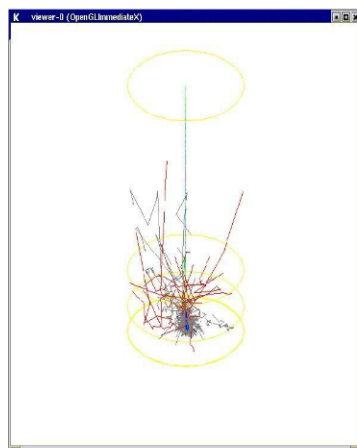


FIGURA 2: Simulação gráfica de um chuvaire atmosférico extenso gerado por um próton de 100 GeV utilizando o programa GEANT4.

Na figura, um próton (em azul) de energia 100 GeV incide verticalmente no topo da atmosfera que interagindo com os átomos de Oxigênio e Nitrogênio (na relativa composição de 78% e 22%, respectivamente) gera um chuvaire de partículas: em vermelho são evidenciados os nêutrons, em cinza as outras partículas neutras, em azul as partículas carregadas positivamente e em verde aquelas negativas. O número total de partículas secundárias gerada neste evento é de 156 com 3 nêutrons down. No caso de nêutrons usualmente se distingue entre partículas com direção (para cima) up e (para baixo) down. A razão relativa das duas componentes varia em relação às altitudes e energia e pode ser objeto de pesquisa futura.

Após a geração dos dados no laboratório de dosimetria numérica do CRCN, foram realizadas as análises dos dados e determinação do espectro de nêutrons.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o desenvolvimento deste trabalho, fez-se necessário o aprendizado do sistema operacional LINUX e de programação em C++ visto que o GEANT4, toolkit utilizado para simular o chuvaire atmosférico funciona neste sistema operacional e é todo estruturado na linguagem C++.

A instalação deste toolkit (GEANT4) mostrou-se de extrema complexidade no decorrer deste projeto. Um dos resultados obtidos foi à criação de um manual de instalação interativo e inteligente. Foi montado neste projeto também um pacote que reduz o tempo de instalação que era de aproximadamente uma hora e meia para um computador com as seguintes especificações: Processador Seprom 2200+ (velocidade nominal ~1.7GHz), 1Gb de memória Ram, HD de 7200rpm para apenas 5 minutos.

3.1 Construção do Software de Instalação para o GEANT4

O código GEANT4 para ser utilizado precisa ser instalado e acoplado a várias bibliotecas, o que torna sua instalação complicada e demorada.

O Software criado, consiste em agrupar o código fonte compilado, todas as bibliotecas compiladas e todos os executáveis gerados na instalação, em pastas. Um *Shell Script* foi criado com o intuito de navegar pelas pastas criadas e redistribuir todas as bibliotecas para seus locais adequados. Este “software” é interativo e permite a participação do usuário na sua instalação.

A figura a seguir mostra como é constituído este software de instalação. Nele possui um manual de instalação caso o usuário tenha alguma dúvida e possui o instalador (configure.sh) além das pastas compactadas.



FIGURA 3: Constituição do software de Instalação.

Como foi comentado o pacote de instalação aqui apresentado é interativo e requer a participação do usuário, como pode ser mostrado na figura abaixo.

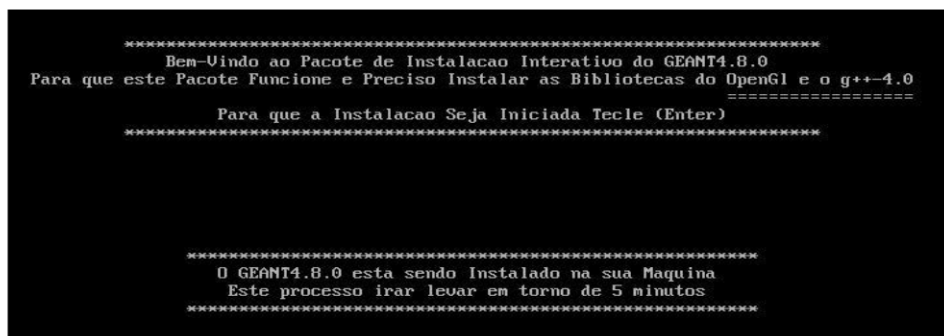


FIGURA 4:

Página de entrada do “software” de instalação desenvolvido.

O software desenvolvido se mostrou bastante eficiente, não havendo qualquer perda de tempo de simulação, ao contrário houve um ganho de tempo razoável no que se diz respeito à instalação. Este software foi testado em diversas máquinas de configurações diferentes comprovando sua eficácia e aplicabilidade.

A figura 6 é um dos resultados obtidos neste projeto, que é a representação gráfica da produção de nêutrons, a partir da interação de prótons primários com os núcleos da atmosfera Terrestre.

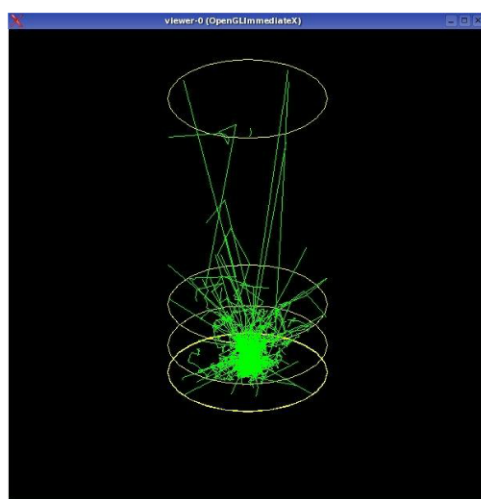


FIGURA 5: Simulação gráfica da produção de Nêutrons, a partir da interação de prótons primários na atmosfera terrestre.

O espectro de nêutrons gerados a partir do software desenvolvido, se demonstrou significativo dentro do propósito do presente trabalho. No decorrer do trabalho obtiveram-se histórias suficientes para uma melhoria significativa da resolução do espectro energético de nêutrons dentro do intervalo de energia aqui investigado ($80 \text{ MeV} < E < 120 \text{ MeV}$), atingindo um percentual de erro menor que 2%.

Este percentual, entretanto ainda não é satisfatório para trabalhos que envolvem processos aleatórios. Deve-se, portanto, ainda continuar as simulações até atingir-se um valor percentual de erro menor do que 1%.

Na figura 6 representamos a sub-rotina desenvolvida para a escolha aleatória da energia dos prótons primários que poderão vir a produzir nêutrons.

```
### Run 0 start.  
Libera memória: EspectroClass::alocaMemória x.  
Libera memória: EspectroClass::alocaMemória y.  
815.687 0.0137685  
evento 0  
691.15119 0.02153539  
evento 1  
246.07311 0.35004734  
evento 2  
256.86641 0.31173837  
evento 3  
566.48044 0.03684688  
evento 4  
number of event = 5  
82errore=1  
97errore=1  
---> RunAction: Gravou espectro Igor.dat  
nenhum comentário  
  
Espectro Igor.dat referente a: nenhum comentário  
Total de contagens neutrons: 2  
Graphics systems deleted.  
Visualization Manager deleting...  
numero totale particelle=2807
```

FIGURA 6 : Escolha aleatória da energia do próton primário.

O programa utilizado neste trabalho gera dois arquivos de saída, o primeiro é mostrado na Figura 8, onde são feitas as escolhas aleatórias dos prótons primários que irão penetrar na atmosfera terrestre. Depois da geração de todos os prótons de forma aleatória, e da execução da simulação das interações de todos eles com a atmosfera, o programa grava um espectro de nêutrons contemplando uma faixa de energia que varia entre 80 MeV < E < 120 MeV. No caso da Figura 8 observa-se que foram geradas 2807 partículas, dentre elas, dois nêutrons que é o objeto de estudo deste trabalho.

3.2 Espectro de Nêutrons Gerados na Interação da Radiação Cósmica com a Atmosfera Terrestre.

A figura abaixo representa o espectro de Nêutrons gerado no presente trabalho. Neste trabalho foram gerados aproximadamente 150 mil nêutrons, o que proporcionou um erro relativo menor do que 2% no espectro em questão.

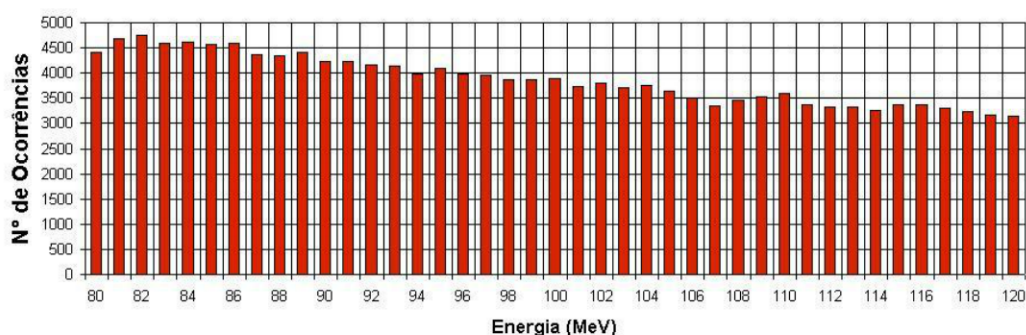


FIGURA 7 : Representação gráfica do espectro de Nêutrons

Pode ser observado nesse espectro um suave aumento de contagens em 82 MeV, com um posterior decrescimento discreto do número de contagens em relação a energia em MeV. Mesmo com uma quantidade de eventos que proporcionou um erro menor do que 2%, se faz necessário aumentar ainda mais a quantidade de nêutrons gerados para poder se observar melhor o comportamento desse gráfico.

Esse espectro foi gerado através de simulações com o ambiente de programação GEANT4. Foi montado um modelo computacional que simula a interação de prótons de alta energia com a atmosfera terrestre, desencadeando um chuveiro de partículas secundárias (Chuveiro atmosférico). Os nêutrons que são levados em consideração nesse espectro, são aqueles obtidos a uma altitude de 10km da atmosfera, devido ao interesse já mencionado de calcular a dose a qual os tripulantes de aeronaves comerciais estão expostos.

4. CONCLUSÃO

No presente trabalho foi criado um “software” que tem como finalidade diminuir o tempo de instalação do Toolkit GEANT4, que era de aproximadamente 2 horas, para apenas 5 minutos. Este “software” desenvolvido se mostrou bastante eficiente e atendeu todos os propósitos pelos quais ele foi construído (diminuição do tempo de instalação e praticidade, sem afetar o desempenho do toolkit).

Foi construído um espectro com aproximadamente 150 mil nêutrons, atingindo um erro relativo de aproximadamente 2%. Este percentual, entretanto ainda não é satisfatório para trabalhos que envolvem processos aleatórios. Portanto faz-se necessário continuar obtendo-se dados até se atingir um valor percentual menor do que 1%.

5. PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

A obtenção do espectro de Nêutrons atmosférico, possibilitará no futuro o cálculo de dose as quais os Pilotos de Aeronaves Comerciais, estão expostos. Isso pode ser feito inserindo-se o espectro montado no presente trabalho em um programa que acopla um fantoma humano (MAX) em um ambiente de Programação computacional, que suporte aplicações com nêutrons de alta energia.

A figura 8 mostra uma imagem gerada por um programa estruturado na plataforma GEANT4 (Programa produzido no Laboratório de Dosimetria Numérica do CRCN), que poderá ser utilizado para o cálculo de fluência nos diferentes órgãos de interesse. Fluência esta que pode ser utilizada no cálculo da dose efetiva, a partir de coeficientes de conversão encontrados na literatura.

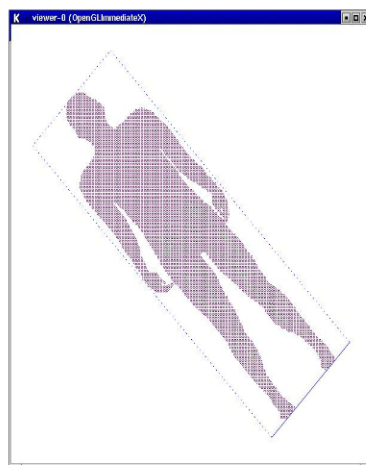


FIGURA 8: Representação do Fantoma humano (MAX), acoplado ao GEANT4.

Com o valor das doses as quais os pilotos de avião estão expostos, poderão ser tomadas medidas visando manter essas doses abaixo dos limites recomendados, que é de 20mSv ao ano. Inserindo assim o Brasil entre os países que respeitam a proposta da ICRP 60 na sua publicação de 1999, que insere os pilotos de avião como profissionais ocupacionalmente expostos à radiação ionizante.

A construção de um dosímetro para medição física desta dose.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLKOFER, O. GRIEDER, P., 1984. **Cosmic Rays on Earth, Physics Data, Fachinformationszentrum Energie – Physik – Mathematik GMBH Karlsruhe.**

ALMEIDA, A. C. A., **Estudo das Correlações entre a Atividade Solar e Processos Atmosféricos**, 2001.

BARTLETT, D.T. **Radiation Protection Aspects of the Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew. Radiation Protection Dosimetry**, 2004, Vol. 109(4): 349-355.

BRUM, C.G.M., **Variabilidade da absorção de Ruído Cósmico via Riômetro e Modelagem Numérica dos Processos Associados**, 2004.

GUIDI, A. , **Detectores RPC para experimentos de raios cósmicos**, 2000.

ICRP 60 – **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection 60**, Pergamon Press, Oxford, 1991.

J. CHEN et. al., **Estimated Neutron Dose to Embryo and Foetus During Commercial Flight. Radiation Protection Dosimetry**, 2005.

TAUHATA et. al., **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**, 2002, Vol. 4, Rio de Janeiro.239p.