

**MINISTÉRIO DA DEFESA  
EXÉRCITO BRASILEIRO  
SECRETARIA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA  
(Real Academia de Artilharia, Fortificação e Desenho - 1792)**

**SEÇÃO DE ENGENHARIA NUCLEAR – SE/7**

**RELATÓRIO FINAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA**

**TEMA: SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DE AÇÕES DOBRN PARA  
ANÁLISE DE RISCOS E MODELAGEM DE CONSEQUÊNCIAS**

***SUBPROJETO: MODELAGEM DE CONSEQUÊNCIAS E RISCO  
UTILIZANDO AS EQUAÇÕES BEIR V E VII PARA AÇÕES DOBRN COM USO  
SIMULADO DE FONTES RADIOATIVAS DISPERSAS NO AMBIENTE***

**Cap. EDSON RAMOS DE ANDRADE  
Orientador**

**Maj. RENATO GUEDES GOMES  
Orientador**

**Maj. MARCOS PAULO CAVALIERE DE MEDEIROS  
Orientador**

**Gabriel Moysés Delfino  
Aluno do 3<sup>o</sup> Ano do Curso de Engenharia de Computação**

**RIO DE JANEIRO,  
14 DE AGOSTO DE 2016**

# 1. Resumo

O trabalho em tela propõe o desenvolvimento do arquivo de entrada para simulação computacional em linguagem Monte Carlo N-particle Extended. Foi objeto de estudo um cenário de ações extremistas no qual uma fonte radioativa é deixada no bagageiro de um ônibus. Será apresentado o desenvolvimento do arquivo de entrada, os resultados obtidos após a simulação e a análise dos mesmos.

## 1.1 Justificativa e importância do Subprojeto

No mundo contemporâneo é muito comum se falar em guerras, situações de conflito armado e ameaças extremistas de uma forma geral. Todos esses tópicos se tornaram comuns diante do aumento da violência e poder bélico mundial como um todo.

Diversos conflitos ocorreram ao longo do século XX e grandes foram as descobertas feitas em decorrência disso. Em agosto de 1945 ocorreu então o primeiro teste em região habitada da mais nova descoberta bélica, os bombardeios de Hiroshima e Nagasaki, no Japão. O episódio marcou o fim da 2ª Guerra Mundial, e mais que isso, mostrou para o mundo o quão devastadoras podem ser as armas que utilizam da tecnologia nuclear. Tal conhecimento bélico se difundiu ao longo das décadas e, na atualidade, não é exclusividade das potências mundiais, podendo assim ser utilizado em conflitos contemporâneos, ilustrando o quão sérias podem ser as ameaças assimétricas da atualidade.<sup>[1][2]</sup>

Esses conflitos contemporâneos têm como característica marcante a quase completa anulação do fator distância como certeza de segurança. Eventos que ocorrem do outro lado do planeta são ameaças reais para qualquer parte do mundo. É o caso, por exemplo, dos conflitos que acontecem no Oriente Médio e passaram a afetar países da América Latina: o recrutamento de jovens pelo Estado Islâmico. Esse grupo extremista realiza atentados nas mais diversas localidades do mundo e, agora que possuem membros espalhados pelos mais distantes locais, a expectativa é que atentados surjam também em países de outros continentes.<sup>[12][13]</sup>

Tendo em vista o avanço dos dispositivos explosivos, na elaboração de novas armas, no crescimento de grupos extremistas, no surgimento de ameaças locais e globais e em tantos outros cenários possíveis, percebeu-se a oportunidade de estudar metodologias que possibilitem uma resposta adequada. Nesse contexto, é fundamental o estudo, dentre outros, de ações de Guerras de 4ª geração, que são conflitos nos quais o inimigo pode ser um grupo extremista ou outra organização qualquer, que utilizam material radioativo em suas ações.<sup>[14]</sup>

Uma fonte radioativa colocada em um local de grande circulação de pessoas, por exemplo, pode levar a inúmeras mortes em curto prazo. Ao passar próximo da fonte localizada no passeio público, indivíduos são submetidos a doses de radiação que podem comprometer seriamente a sua saúde, em diferentes níveis de severidade, podendo inclusive evoluir para óbito. Além disso, o manuseio inadequado de uma fonte radioativa também pode afetar a vida de várias pessoas, como aconteceu em Goiânia com o cézio-137, acidente radiológico grave que aconteceu no Brasil em 1987.<sup>[3]</sup>

Estudar as consequências de tal cenário é, portanto, de irrefutável importância. Entretanto, é necessário saber o que fazer em uma situação dessas, quais as atitudes adequadas e quando elas devem ser tomadas. O processo decisório, contudo, requer

conhecimento sobre o assunto: quais as consequências imediatas e futuras, qual a capacidade de emissão radioativa da peça, quantas pessoas seriam afetadas e com quais níveis de gravidade, além de diversas outras informações que só são possíveis com um estudo voltado para análise de risco e modelagem de consequências. Tal estudo é justamente o foco do trabalho em tela, que busca prever com suficiente precisão quais as consequências da exposição a uma fonte radioativa, seja por ato extremista ou por acidente radiológico/nuclear, ou seja, realizar a modelagem de consequências e risco utilizando as equações BEIR V e VII para ações DQBRN com uso simulado de fontes radioativas dispersas no ambiente.

## **1.2 Objetivos do trabalho**

Os objetivos desse projeto estão relacionados à compreensão e aprendizado de todos os conhecimentos necessários para o desenvolvimento do arquivo de entrada para realizar a simulação computacional no MCNPX. Assim sendo, os seguintes objetivos foram tratados:

- 1- Compreender a linguagem de escrita dos arquivos de entrada de simulação computacional em MCNPX
- 2- Desenvolver um arquivo de entrada para o MCNPX com base no cenário proposto para simulação
- 3- Coletar e analisar os resultados obtidos após executar a simulação.

## 2. Introdução ao MCNPX

Estudar o que ocorre em situações de exposição à radiação, como mencionado, é de importância e é o foco do trabalho em tela. Entretanto, é difícil realizar testes práticos, visto que isso resultaria em situações de risco desnecessário. Uma das soluções, então, é realizar simulações, ou seja, gerar por meio de cálculos probabilísticos e determinísticos computacionais diferentes cenários de lançamento de radiação no ambiente, calculando assim, entre outros parâmetros, o nível de doses depositadas. Estas doses calculadas podem, futuramente, ser utilizadas para estimar os efeitos biológicos sobre um indivíduo, ou seja, estimar o dano causado sobre o indivíduo.

A emissão de partículas radioativas e o fenômeno da radiação bem como o seu transporte através do espaço podem ser interpretados como randômicos, ou seja, aleatórios e podem ser estudados de forma probabilística. As interações com os mais diversos materiais também segue essa lógica. Assim sendo, por meio de um código computacional, o *Monte Carlo N-particle extended* (MCNPX), simula-se todo o processo da emissão de radiação, seja ele composto por nêutrons, elétrons ou fótons.<sup>[4] [5]</sup>

## 3. Desenvolvimento

Para gerar o arquivo de entrada é necessário levantar uma série de dados a respeito do contexto que envolverá a simulação. Esses dados são essenciais para a criação do modelo computacional e dizem respeito à geometria do espaço estudado, bem como a todas as dimensões e distâncias; aos materiais que compõem o projeto; à densidade dos materiais e a um desenho esquemático em três dimensões da situação, que pode ser inclusive visualizado por um programa auxiliar: o Moritz.

### 3.1 Geometria

Em relação à geometria foi utilizado como base os dados da carroceria do CAMPIONE INVICTUS 1200, da COMIL, mostrado na Figura 1.



Figura 1

Disponível em < <http://www.comilonibus.com.br/site/veiculos/detalhe/linha-rodoviario/produto-campione-invictus-1200> > acesso em 10. Nov. 2015

A carroceria possui um comprimento de 14000 mm, altura total de 3800 mm e largura de 2600 mm. Além disso, a largura do corredor será de 350 mm, a altura do corredor será de 1900 mm e o revestimento do assoalho será feito com uma placa de aço de 2 mm de espessura, conforme consta nas normas previstas na Resolução ANTT Nº 4130 DE 03/07/2013. A estrutura é feita em aço galvanizado e a capacidade total é de 46 lugares, distribuídos conforme ilustra Figura 2.



Figura 2

Disponível em <<https://vendas.jcaholding.com.br/VendaWeb/poltronas>> acesso em 10. Nov. 2015

Além do ônibus é importante definir a geometria das poltronas, ilustradas pela Figura 3.



Figura 3

Disponível em < <http://www.comilonibus.com.br/site/veiculos/detalhe/linha-rodoviario/produto-campione-invictus-1200> > acesso em 10. Nov. 2015

As dimensões utilizadas para as poltronas serão as previstas na Resolução ANTT Nº 4130 DE 03/07/2013. Assim sendo, a profundidade do assento será de 420 mm, a largura do assento será de 450 mm, a altura do assento em relação ao piso será de 400 mm e a distância entre duas poltronas será de 400 mm.

## 3.2 Materiais

### 3.2.1 Ar

O ar envolve todas as estruturas do modelo computacional. A composição do ar é descrita abaixo.

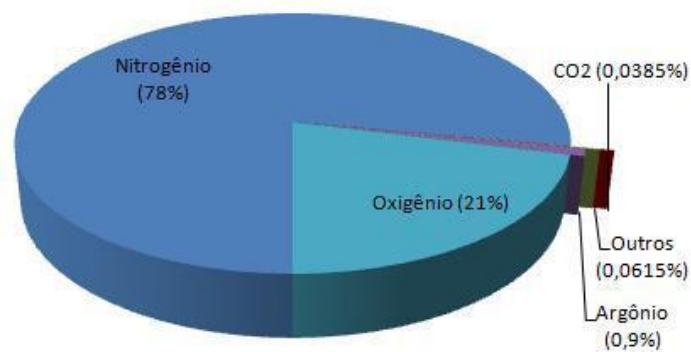
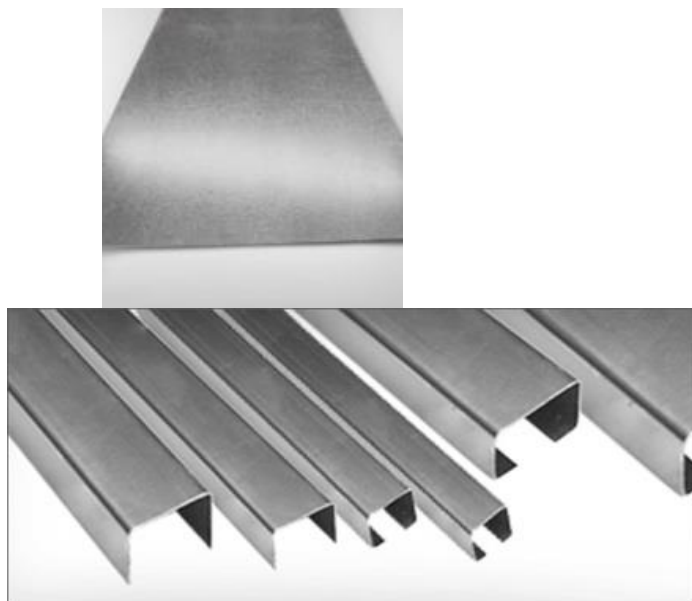


Figura 4

Disponível em < <https://agfdag.wordpress.com/2009/03/10/quanto-co2-ha/>>  
acesso em 27. Fev. 2015

### 3.2.2 Carroceria

Conforme mencionado anteriormente, a carroceria do ônibus modelo (CAMPIONE INVICTUS 1200) é feita basicamente de aço galvanizado. A figura 5 ilustra uma chapa de aço galvanizado.



*Figura 5*

Disponível em <http://catalogodearquitetura.com.br/chapas-de-aco-galvanizadas-ananda-metais.html> acesso em 10. Nov. 2015

O principal objetivo da galvanização é a proteção contra a corrosão. Isso é feito a partir de um revestimento de zinco, que é trocado em caso de corrosão. A troca do material que compõem o revestimento é sempre mais fácil do que a troca do material revestido. Esse processo, contudo, influencia muito pouco nas características internas da chapa de aço ou em sua densidade, visto que compõem apenas a superfície exposta à corrosão. Para efeitos de cálculo de blindagem, portanto, são desprezíveis. Utilizaram-se, então, as características do aço para caracterizar a carroceria do ônibus.

O aço é uma liga metálica formada essencialmente por ferro e carbono, com percentagens deste último variando entre 0,008 e 2,11%. Foi utilizado o aço feito com 0,2% de carbono em peso. O restante, 99,8% foi considerado como Ferro.

Vale ressaltar que algumas carrocerias apresentam uma parcela considerável de Alumínio em sua composição. O uso do Alumínio, que é mais leve que o aço, implica diminuição da massa total do ônibus, o que gera economia de combustível e, conseqüentemente, redução do custo de viagens. Além disso, por ser mais deformável, o uso do alumínio proporciona maior segurança aos passageiros, já que a deformação da carroceria absorve energia e, em um possível acidente seguido de colisão, reduz o impacto da batida sobre os passageiros. Em termos de blindagem, contudo, é mais vantajoso usar a composição apenas do aço, já que as partes da carroceria que possuem alumínio se encontram na frente, traseira e laterais do ônibus e não entre o bagageiro e o corredor do ônibus, região de análise nas simulações.

Para o aço utilizado na simulação, 0,2% de carbono, temos propriedades médias já estabelecidas e normatizadas. A Massa volumétrica prevista é: **7860 kg/m<sup>3</sup>** (ou **7,86 g/cm<sup>3</sup>**).

### **3.2.3 Poltrona**

A poltrona é feita de Poliuretano, que é um polímero que compreende uma cadeia de unidades orgânicas unidas por ligações uretânicas. Um exemplo de espuma de poliuretano é mostrado na Figura 6.

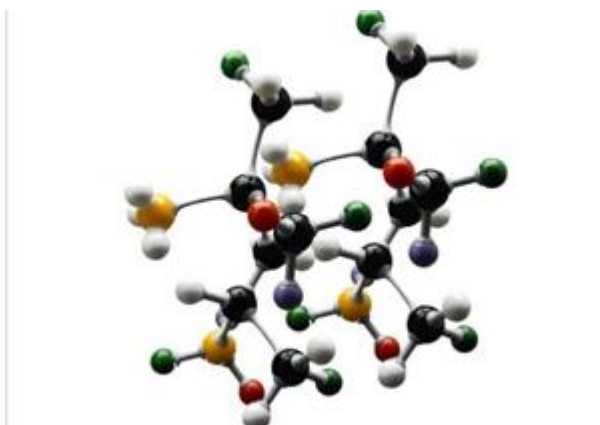




*Figura 6*

*Disponível em <<http://spumacarautomotive.com/mercado.htm>> acesso em 17. Nov. 2015*

Como é possível observar na figura 7, o poliuretano é um material composto de várias moléculas que se repetem (no caso, o uretano). Precisamente, o grupo químico uretano é composto de quatro tipos de átomos (dois de oxigênio, um de nitrogênio, um de carbono e um de hidrogênio).



*Figura 7*

*Disponível em <<http://www.recompur.com.br/duvidas.htm>> acesso em 10. Nov. 2015*

Dentre os poliuretanos, existem os considerados de alta densidade e os considerados de baixa densidade. Como o interesse nas características do poliuretano das poltronas está o seu uso como barreira física, foi utilizado o pior cenário possível, ou seja, aquele cuja blindagem é a menos eficaz e, conseqüentemente, implica sequelas mais nocivas aos passageiros, resultando em um dano maior. A vantagem de se estudar o pior cenário é melhorar o preparo para os cenários mais graves com conseqüências potencialmente mais graves que podem suceder o acidente radiológico/nuclear. Assim sendo, foi utilizada a densidade prevista para os poliuretanos de baixa densidade, **0,92 g/cm<sup>3</sup>**.



## 4. Metodologia e Programação

Para realização da simulação é necessário especificar o desenho esquemático da situação como um todo. Entretanto, a lógica da linguagem MCNPX faz com que seja vantajoso especificar primeiramente quais são os materiais de cada parte da estrutura. Isso acontece porque, ao definir os planos que limitam cada estrutura, é necessário especificar a composição do material. O primeiro passo, então, será a definição dos materiais.

### 4.1 Definição dos materiais

A criação do arquivo de entrada da modelagem computacional seguirá de acordo com a ordem apresentada no relatório acima, definindo então ar, aço e poliuretano. Adotar-se-ão os dados da tabela periódica.

#### 4.1.1 Ar

O código mostra a numeração dada ao material, no caso do ar será 11. Após isso, especificar-se-á cada elemento e sua composição. As porcentagens de Nitrogênio e Oxigênio são enormes, ao passo que a de outros gases é praticamente desprezível. A composição secundária será, então, aproximada para Argônio. Logo:

$$\begin{array}{l} m11 \ 7014 \ -0.780 \ \$ \ ar \\ \quad \quad \quad 8016 \ -0.210 \\ \quad \quad \quad 18040 \ -0.010 \end{array}$$

#### 4.1.2 Aço

Seguindo a mesma linha de raciocínio feita para o material 11 (Ar) e seguindo também as especificações anteriormente definidas, tem-se:

$$\begin{array}{l} m12 \ 26045 \ -0.998 \ \$aço \\ \quad \quad \quad 6012 \ -0.002 \end{array}$$

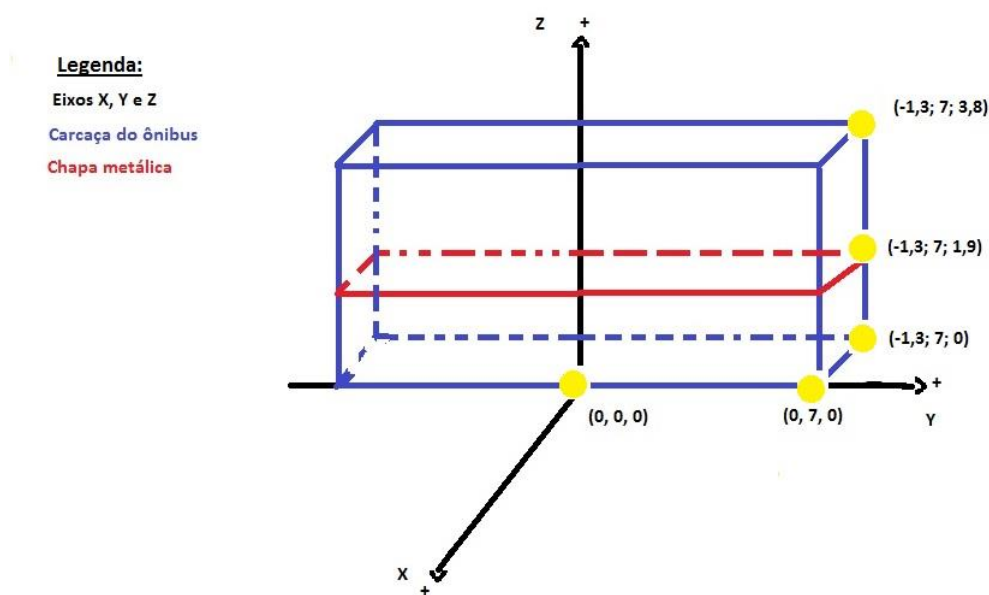
#### 4.1.3 Poliuretano

Seguindo a mesma linha de raciocínio feita para o material 11 (Ar) e para o material 12 (Aço) e seguindo as especificações anteriormente definidas, tem-se:

$$\begin{array}{l} m13 \ 1001 \ 1 \ \$poliuretano \\ \quad \quad \quad 6012 \ 1 \\ \quad \quad \quad 7014 \ 1 \\ \quad \quad \quad 8016 \ 2 \end{array}$$

## 4.2 Programação da estrutura do ônibus

Para realização da simulação é necessário especificar o desenho esquemático da situação como um todo. Iniciando a escrita do arquivo de entrada, então, o passo inicial foi a definição da carroceria do ônibus e da chapa de aço entre o bagageiro e os assentos, conforme as medidas coletadas anteriormente. A lógica geométrica da escrita do código foi feita com a fonte radioativa no centro do ônibus, sendo este o ponto de coordenadas (0, 0, 0). Um esboço simples do desenho é mostrado na Figura 8, mostrando apenas um dos lados do ônibus visto que o desenho é simétrico e dessa maneira facilita-se a visualização. As coordenadas estão em metros e de acordo com o que foi especificado anteriormente:



Autoria: Gabriel Delfino

Figura 8  
Desenho do ônibus

### 4.2.1 Bloco de superfícies

Primeiramente definiu-se a carcaça do ônibus, fazendo os seis planos que contém cada uma das seis faces do paralelepípedo que representa a sua estrutura mais externa, representada em azul na Figura 8. Esse será o limite de análise do problema, ou seja, somente será de interesse o que estiver na interseção desses seis planos. Segue a linha de código:

```
21 py 700  
22 py -700  
23 pz 0  
24 pz 380  
25 px 130  
26 px -130
```

Nessa etapa foram definidos os dois planos que compõem a chapa de aço entre o bagageiro e os assentos. A espessura da placa foi definida em 2 mm. Segue a linha de código:

```
27 pz 190  
28 pz 191
```

#### 4.2.2 Bloco de células

Definiu-se cada uma das células, ou seja, agrupou-se as superfícies anteriormente definidas para formar corpos, que são limitados pelas interseções de cada superfície. Seguem abaixo as linhas de código que seguem o formato nome da célula, material de que é feita, densidade do material, interseção dos planos e importância:

```
10 100 -1 -29 imp:p=1 $ esfera de tecido equivalente  
1 12 -7.86 (22 -21 26 -25 27 -28) imp:p=1 $placa de metal  
200 11 -0.00125 (22 -21 23 -24 26 -25) #10 #1 imp:p=1 $ ar no formato da  
carroceria
```

#### 4.3 Visualização 3D do código

Utilizando um programa auxiliar chamado Motriz, é possível visualizar as superfícies e células definidas no código. Isso é muito útil para verificar se o código foi escrito de maneira correta, auxiliando na correta definição dos planos escritos. As figuras 9, 10, 11 e 12 são exemplos dessa modelagem 3D, ilustrando uma célula de tecido equivalente, a placa metálica de separação entre corredor e bagageiro e a carroceria do ônibus, respectivamente.

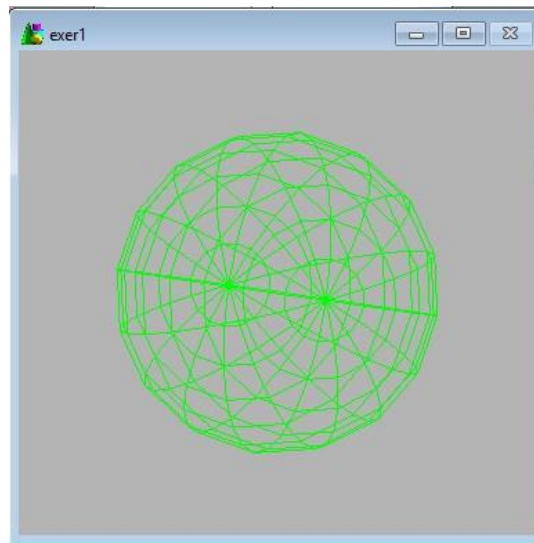
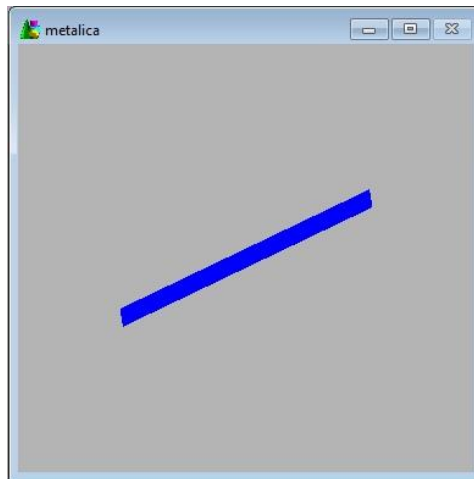
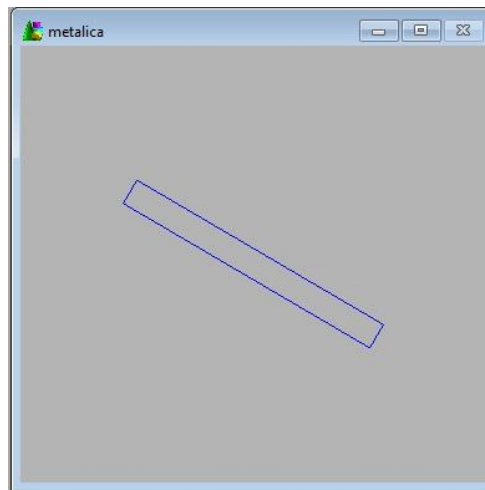


Figura 9

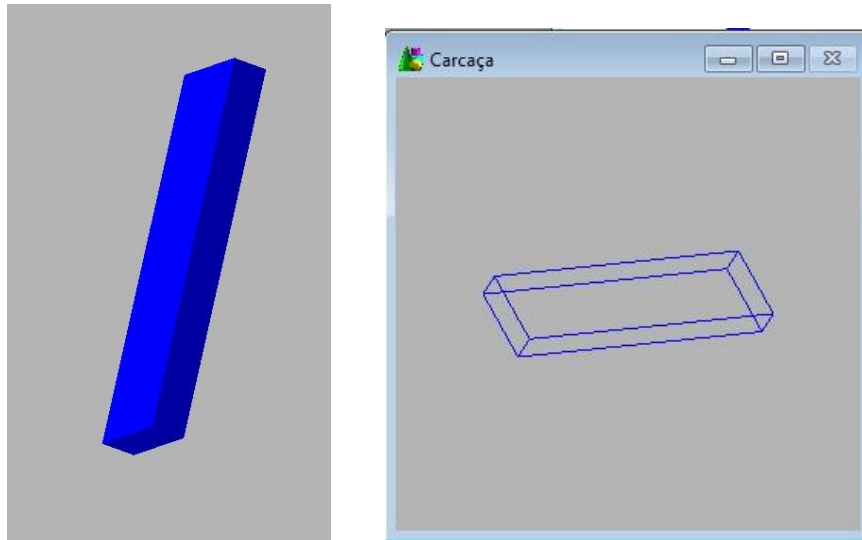
*Esfera de tecido equivalente*



*Figura 10*  
*Placa Metálica*



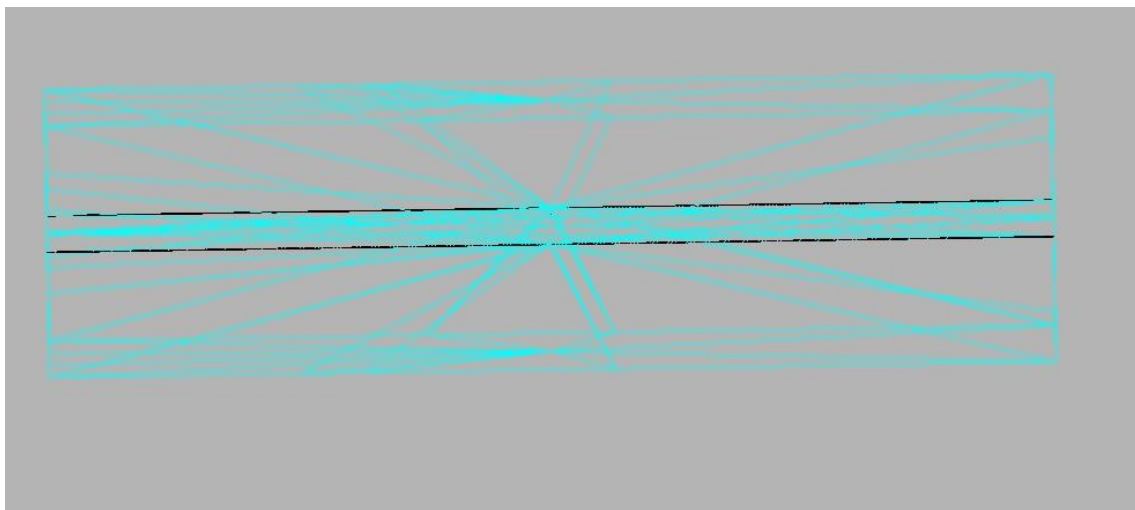
*Figura 11*  
*Placa Metálica*



*Figura 12*

### *Carroceria*

A figura 13 mostra o ônibus completo, com a carroceria em azul claro e a placa metálica destacada em preto. Vale ressaltar que a esfera de tecido equivalente está representada, mas, por ter dimensões desprezíveis quando comparadas com o ônibus, não aparece.



*Figura 13*

### *Ônibus*

#### 4.4 Programação da poltrona

A figura 14 mostra um desenho esquemático de como será a poltrona, com um boneco palito representando o passageiro:

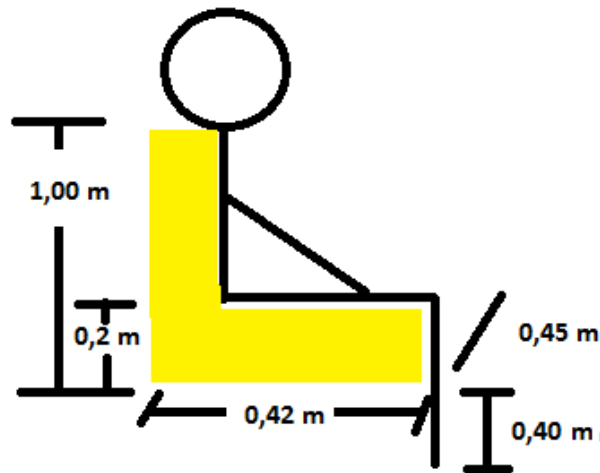


Figura 14  
Poltrona

Seguindo a mesma linha de raciocínio adotada anteriormente, a escrita do código foi feita da seguinte maneira:

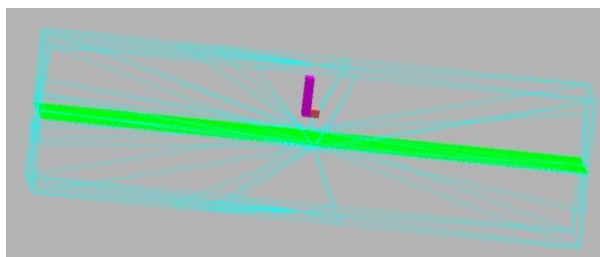
*c Bloco de células*

```
501 13 -0.92 (32 -33 35 -36 30 -37) $ encosto poltrona 0  
601 13 -0.92 (33 -34 35 -36 30 -31) $ assento da poltrona 1
```

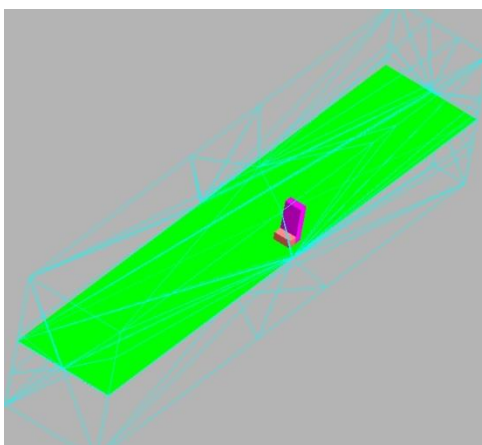
*c Bloco de superfícies*

```
30 pz 231  
31 pz 251  
32 py -20  
33 py 0  
34 py 22  
35 px -129  
36 px -84  
37 pz 331
```

As figuras 15 e 16 mostram os desenhos 3D obtidos por meio da leitura do código pelo programa auxiliar à linguagem MCNPX, o Motriz. Elas mostram o assento desenhado com a placa de metal desenhada de maneira sólida e a carcaça do ônibus por traços, apenas como referência espacial:



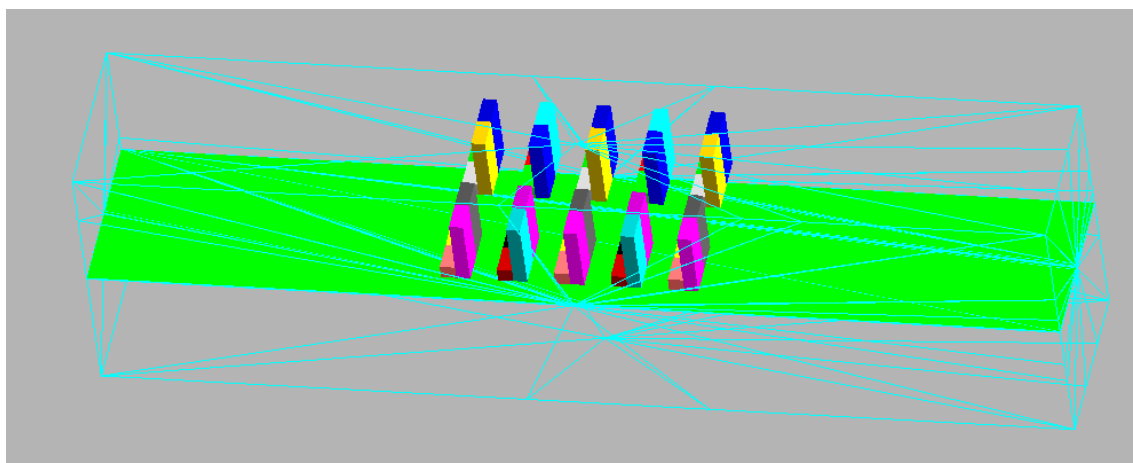
*Figura 15*  
*Poltrona 2*



*Figura 16*  
*Poltrona 3*

#### **4.5 Replicação das cadeiras**

Utilizando a função LIKE, é possível replicar as estruturas e, dessa forma, criar cópias que são deslocadas em determinados eixos. Isso reduz o trabalho de programação e o trabalho de execução do código, sendo extremamente vantajoso. Fazendo essa replicação 19 vezes, consegue-se 20 cadeiras de ônibus, que receberam posteriormente 20 células receptoras de radiação. Foram feitas apenas 20 cadeiras uma vez que essa é a limitação de análise do programa. A escolha dos 20 assentos foi feita de acordo com a proximidade destes e da fonte radioativa, ilustrando assim o pior caso possível. Como a fonte está no centro do ônibus, os assentos foram assim determinados:





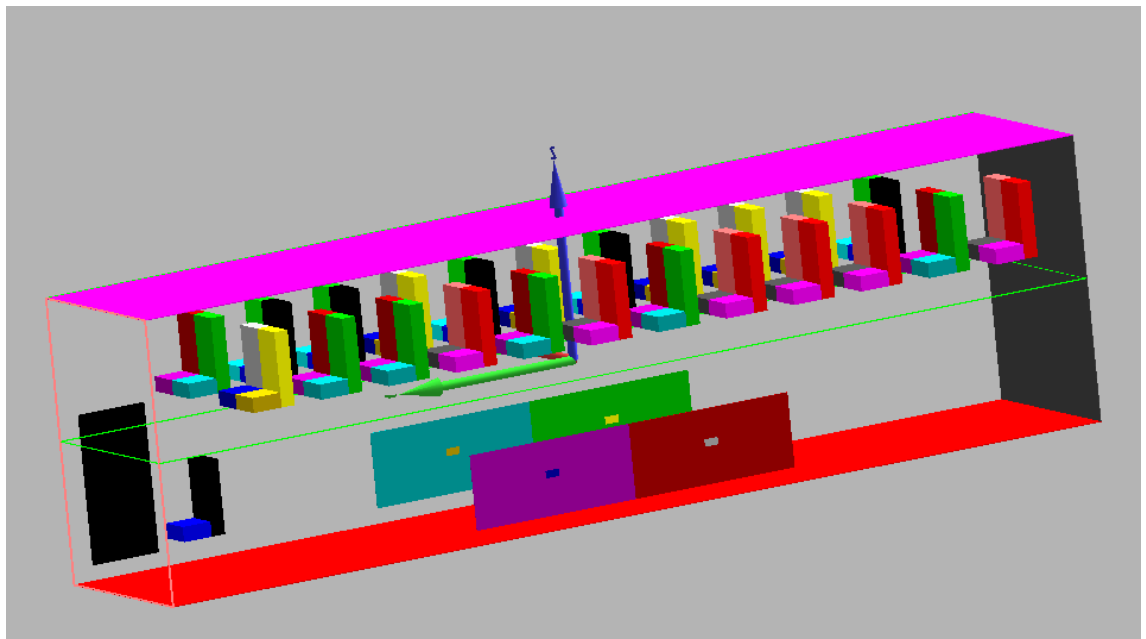
*Figura 17*  
*Ônibus com poltronas*

Exemplo de utilização da função LIKE:

```
...  
504 LIKE 501 BUT TRCL=(213 0 0)  
604 LIKE 601 BUT TRCL=(213 0 0)  
505 LIKE 501 BUT TRCL=(0 82 0)  
605 LIKE 601 BUT TRCL=(0 82 0)  
506 LIKE 501 BUT TRCL=(45 82 0)
```

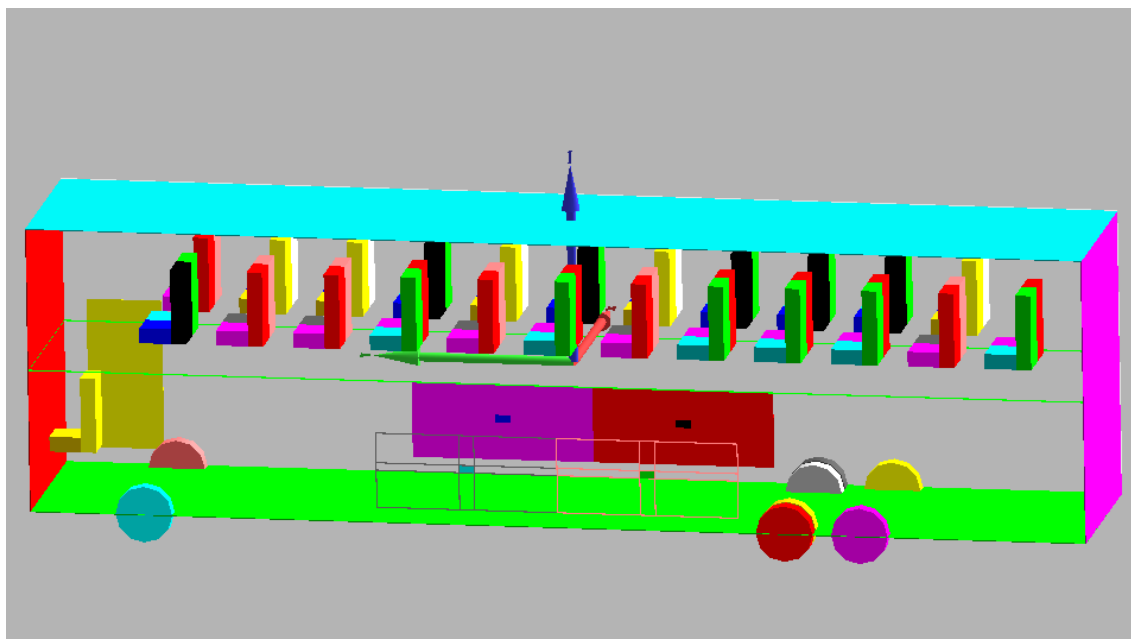
#### **4.6 Finalização das poltronas e acréscimo de detalhes finais**

Finalizando o ônibus, então, foi acrescentado o restante das cadeiras necessárias, além da poltrona do motorista. Apenas por motivos estéticos, foi acrescentada uma porta e bagageiros.

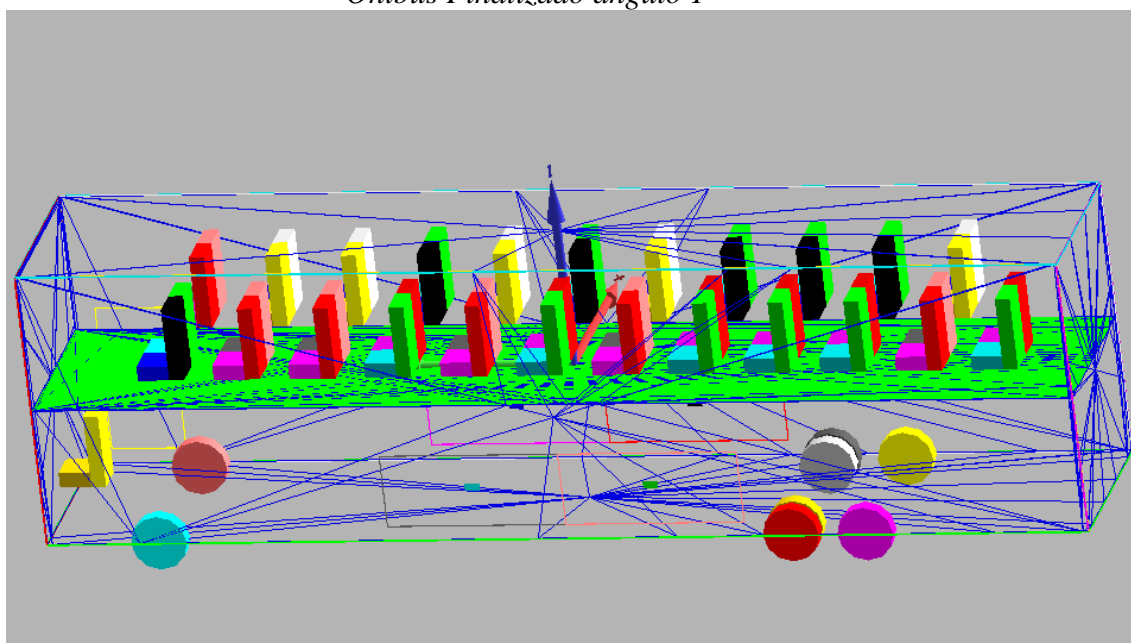


*Figura 18*  
*Ônibus com todas as poltronas*

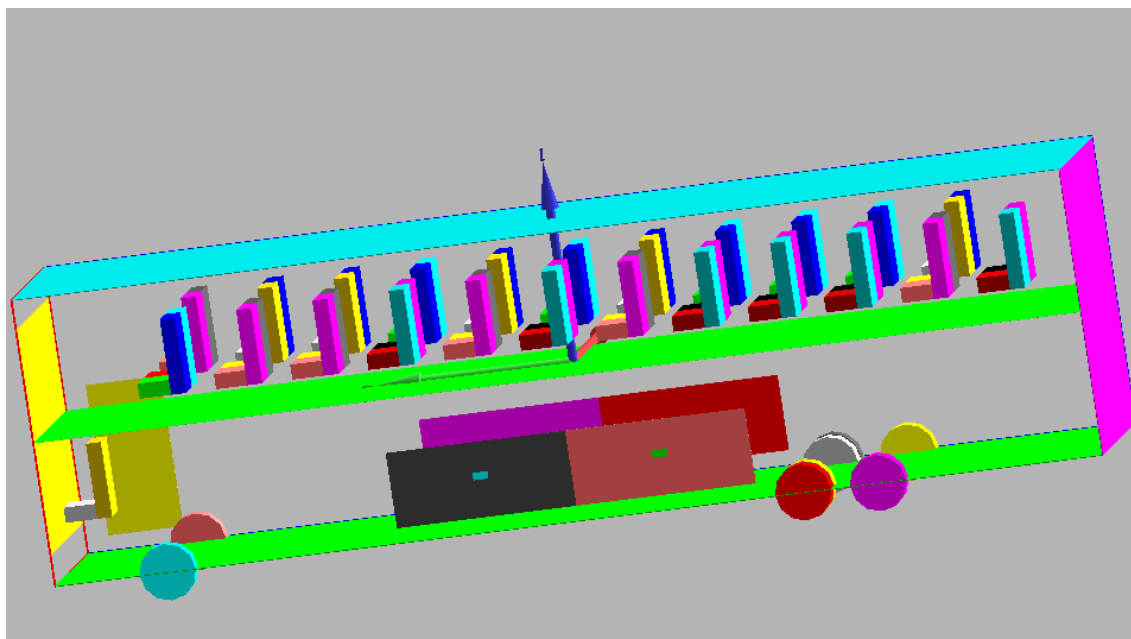
O próximo passo foi acrescentar os diversos pneus que compõem o ônibus e criar uma janela frontal. Esses detalhes, assim como a porta e o bagageiro, não influenciam no cálculo das doses, mas melhoram o aspecto visual do ônibus modelado e auxiliam no desenvolvimento de uma simulação com maior fidedignidade. As figuras 19 a 22 mostram diferentes ângulos do ônibus finalizado.



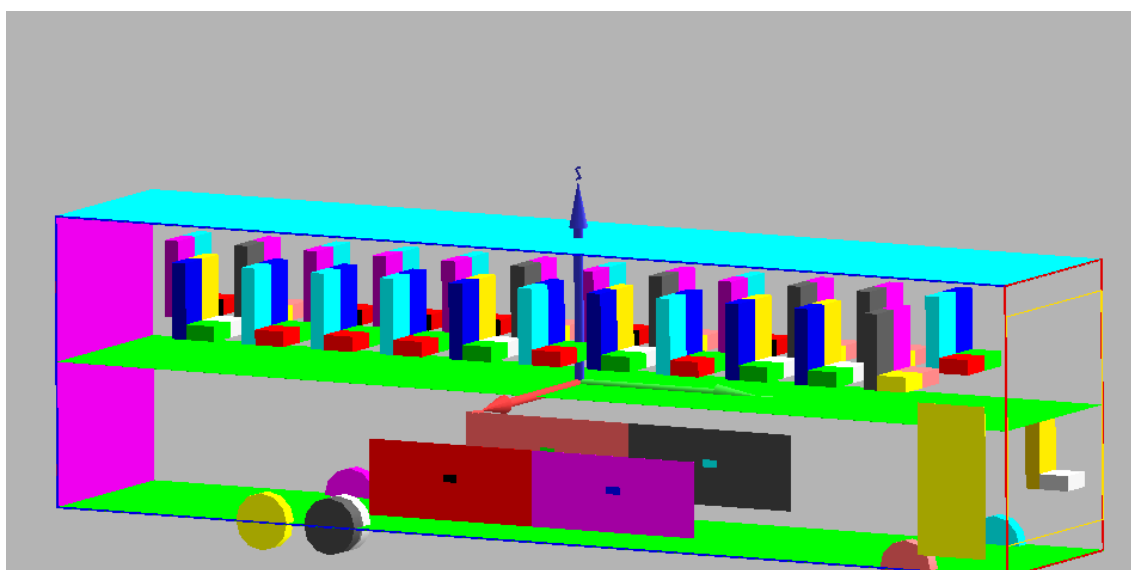
*Figura 19*  
*Ônibus Finalizado ângulo 1*



*Figura 20*  
*Ônibus Finalizado ângulo 2*



*Figura 21*  
*Ônibus Finalizado ângulo 3*



*Figura 22*  
*Ônibus Finalizado ângulo 4*

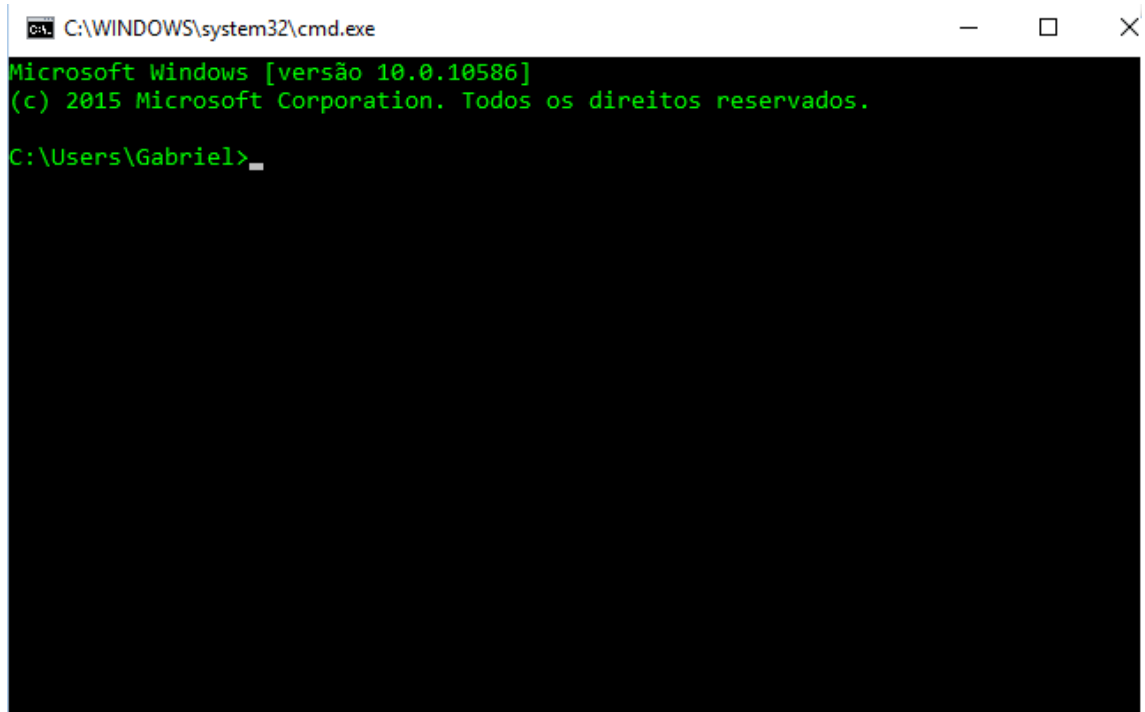
#### **4.7 Inclusão dos detectores de radiação**

Foram acrescentados vinte detectores por arquivo de entrada, pois esse é o limite de análise da simulação. Para obter-se o pior caso possível, foram escolhidos os pontos mais próximos à fonte radioativa e, neles, foram posicionados os detectores de modo que esses ficassem o mais próximo possível da fonte. Segue um trecho do código responsável pela inclusão dos detectores:

f5:p -84 0 282 0 -39 0 282 0 39 0 282 0 84 0 282 0 &  
-84 102 282 0 -39 102 282 0 39 102 282 0 84 102 282 0 &  
-84 204 282 0 -39 204 282 0 39 204 282 0 84 204 282 0 &  
-84 306 282 0 -39 306 282 0 39 306 282 0 84 306 282 0 &  
-84 408 282 0 -39 408 282 0 39 408 282 0 84 408 282 0

## 5 Execução do arquivo de entrada

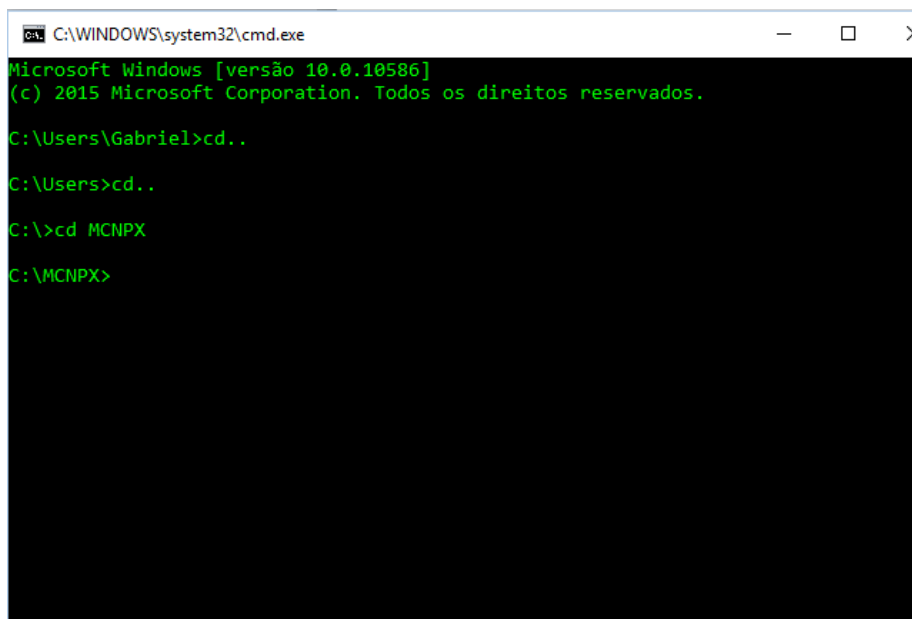
Para se executar o arquivo de entrada, foi utilizado o prompt de comando do Windows.

A screenshot of a Windows Command Prompt window. The title bar at the top reads "C:\WINDOWS\system32\cmd.exe". The window has standard Windows window controls (minimize, maximize, close) on the right. The command prompt displays the following text in green: "Microsoft Windows [versão 10.0.10586]", "(c) 2015 Microsoft Corporation. Todos os direitos reservados.", and "C:\Users\Gabriel>". The cursor is positioned at the end of the last line.

```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
Microsoft Windows [versão 10.0.10586]
(c) 2015 Microsoft Corporation. Todos os direitos reservados.
C:\Users\Gabriel>
```

*Figura 23*  
*Prompt de comando do Windows*

Navegou-se até a pasta do MCNPX.

A screenshot of a Windows Command Prompt window, similar to the one in Figure 23. The title bar reads "C:\WINDOWS\system32\cmd.exe". The command prompt displays the following text in green: "Microsoft Windows [versão 10.0.10586]", "(c) 2015 Microsoft Corporation. Todos os direitos reservados.", "C:\Users\Gabriel>cd..", "C:\Users>cd..", "C:\>cd MCNPX", and "C:\MCNPX>". The cursor is at the end of the last line.

```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
Microsoft Windows [versão 10.0.10586]
(c) 2015 Microsoft Corporation. Todos os direitos reservados.
C:\Users\Gabriel>cd..
C:\Users>cd..
C:\>cd MCNPX
C:\MCNPX>
```

*Figura 24*  
*Prompt de comando do Windows*

Executou-se o arquivo de entrada e obtendo os resultados.

```
C:\MCNPX>mcnp n= ver19
mcnp ver=2.5.0 ld=Mon Mar 21 08:00:00 MST 2005 07/14/16 12:18:44

*****
*
*      Copyright Notice for MCNPX
*
* This program was prepared by the Regents of the
* University of California at Los Alamos National
* Laboratory (the University) under contract number
* W-7405-ENG-36 with the U.S. Department of Energy
* (DOE). The University has certain rights in the
* program pursuant to the contract and the program
* should not be copied or distributed outside your
* organization. All rights in the program are
* reserved by the DOE and the University. Neither
* the U.S. Government nor the University makes any
* warranty, express or implied, or assumes any
* liability or responsibility for the use of this
* software.
*
*****

imcn is done
warning. material 2 has been set to a conductor.
dump 1 on file ver19r nps = 0 coll = 0
ctm = 0.00 nrn = 0

xact is done
dynamic storage = 0 words, 0 bytes. cp0 = 0.01
run terminated when 1000000 particle histories were done.
warning. 2 of 2 tallies did not pass all 10 statistical checks.
warning. 2 of 2 tallies were all zeros.
dump 2 on file ver19r nps = 1000000 coll = 473289
ctm = 0.13 nrn = 10291636

mcrun is done

C:\MCNPX>
```

*Figura 25*  
*Prompt de comando do Windows*

Versão do MCNPX utilizada: mcnp version 2.5.0 Mon Mar 21 08:00:00 MST  
2005

## 6 Resultados e discussões

Após rodar o arquivo de entrada, foi gerado um arquivo de saída, onde constam os resultados obtidos com a simulação. Busca-se no arquivo pela energia recebida em cada um dos detectores, ou seja, a quantidade de energia que passa por cada assento. A análise foi feita para cada um dos detectores de modo a completar a tabela mostrada a seguir.

### 6.1 Doses registradas por detector

#### Coluna 1

Fileiras	x	y	Z	Dose E-06
1	-84	0	282	3,86429
2	-84	102	282	3,18649
3	-84	204	282	2,38917
4	-84	306	282	1,68543
5	-84	408	282	1,185220
6	-84	-102	282	3,180160
7	-84	-204	282	2,388750
8	-84	-306	282	1,684740
9	-84	-408	282	1,186470
10	-84	-510	282	0,851304
11	-84	-612	282	0,625289

#### Coluna 2

Fileiras	x	y	z	Dose E-06
1	-39	0	282	3,83043
2	-39	102	282	3,35574
3	-39	204	282	2,47825



<b>4</b>	-39	306	282	1,72684
<b>5</b>	-39	408	282	1,20457
<b>6</b>	-39	-102	282	3,35175
<b>7</b>	-39	-204	282	2,24803
<b>8</b>	-39	-306	282	1,72664
<b>9</b>	-39	-408	282	1,20503
<b>10</b>	-39	-510	282	0,86074
<b>11</b>	-39	-612	282	0,63144

Coluna 3

Fileiras	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>z</b>	<b>Dose E-06</b>
<b>1</b>	39	0	282	3,79039
<b>2</b>	39	102	282	3,35079
<b>3</b>	39	204	282	2,47873
<b>4</b>	39	306	282	1,72659
<b>5</b>	39	408	282	1,20568
<b>6</b>	39	-102	282	3,34553
<b>7</b>	39	-204	282	2,47756
<b>8</b>	39	-306	282	1,72670
<b>9</b>	39	-408	282	1,20454
<b>10</b>	39	-510	282	0,86115
<b>11</b>	39	-612	282	0,63173

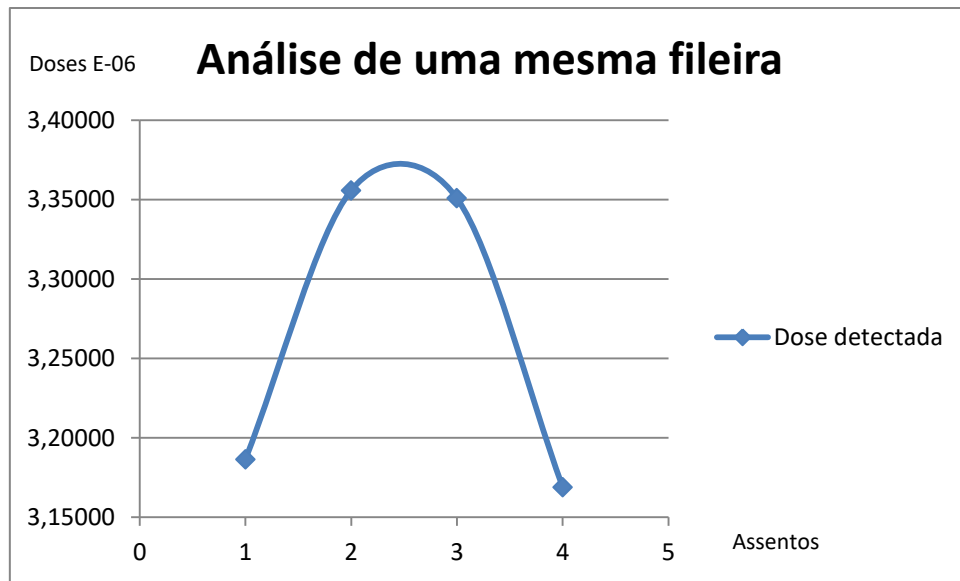
#### Coluna 4

Fileiras	x	y	z	Dose E-06
1	84	0	282	3,56019
2	84	102	282	3,16899
3	84	204	282	2,38712
4	84	306	282	1,68452
5	84	408	282	1,23179
6	84	-102	282	3,16809
7	84	-204	282	2,38715
8	84	-306	282	1,68374
9	84	-408	282	1,18549
10	84	-510	282	0,84991
11	84	-612	282	0,62526

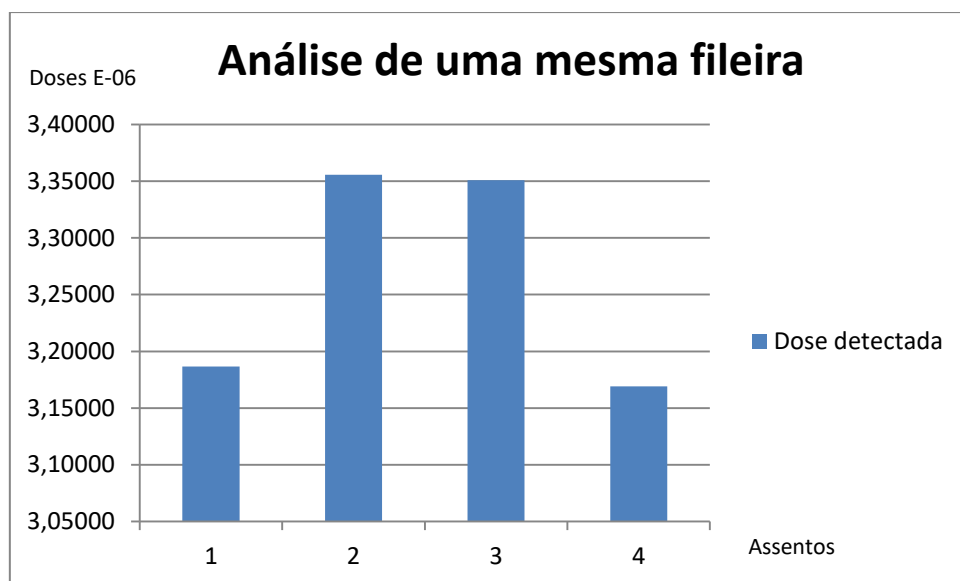
### **6.2 Analisando doses em uma mesma fileira**

Analisando os dados da segunda fileira, é possível observar que quanto mais próximo se está da fonte, maior é a energia detectada. Tendo a fonte sido colocado exatamente no centro do ônibus, percebe-se uma simetria com relação às doses recebidas:

Poltrona	Eixo X	Dose E-06
1	-84	3,18649
2	-39	3,35574
3	39	3,35079
4	84	3,16899



Os detectores que ficaram nos assentos dos corredores receberam uma dose muito similar entre si, tendo sido essas superiores as doses recebidas pelos detectores localizados nos assentos próximos às janelas. A simetria fica ainda mais clara no seguinte gráfico:



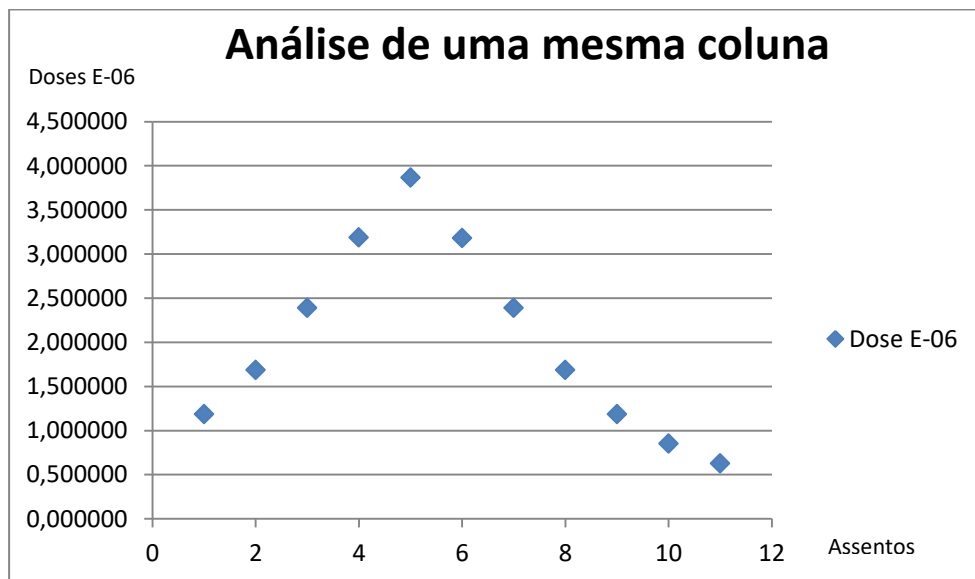
Assentos 1, 2, 3 e 4, mostrados no eixo das abscissas, são os assentos da esquerda para a direita. A fonte estaria localizada entre os assentos 2 e 3.

O resultado está dentro do esperado, uma vez que se esperava que maior fosse a dose recebida quanto mais próximo se estivesse fonte.

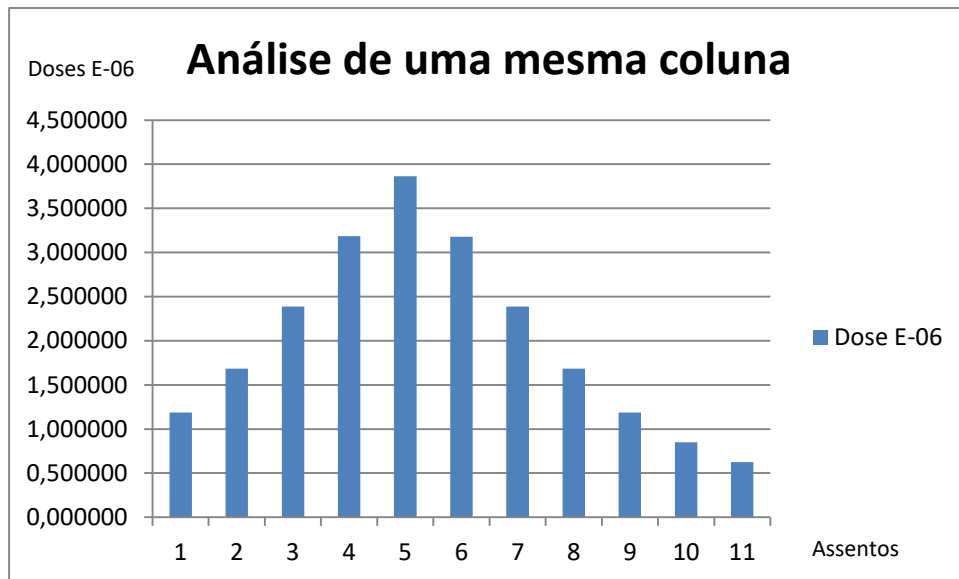
### 6.3 Analisando doses em uma mesma coluna

Analisando os dados da segunda coluna, é possível observar novamente que quanto mais próximo se está da fonte, maior é a energia detectada. Tendo a fonte sido colocado exatamente no centro do ônibus, percebe-se uma simetria com relação às doses recebidas nas poltronas igualmente distantes da fonte:

Poltrona	Eixo y	Dose E-06
1	408	1,185220
2	306	1,68543
3	204	2,38917
4	102	3,18649
5	0	3,86429
6	-102	3,180160
7	-204	2,388750
8	-306	1,684740
9	-408	1,186470
10	-510	0,851304
11	-612	0,625289



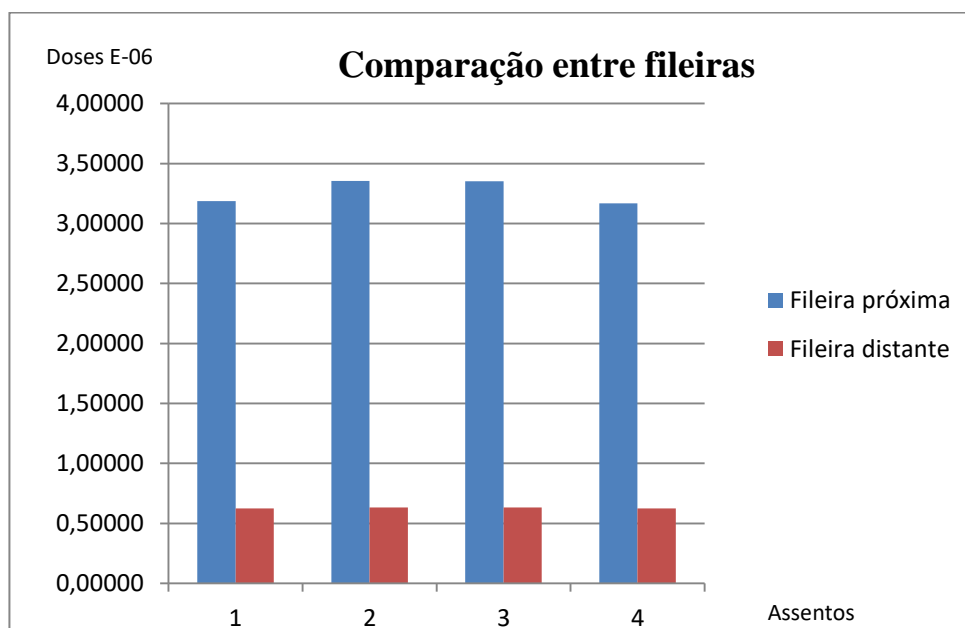
Os detectores que ficaram nos assentos a uma mesma distância do meio do ônibus receberam uma dose muito similar entre si. Vale ressaltar que o fundo do ônibus possui mais assentos que o início, dado que na frente há o espaço do motorista e, por isso, existem poltronas ainda mais distantes da fonte na extremidade traseira. As doses dos assentos mais próximos ao centro foram muito superiores às doses recebidas pelos detectores localizados nas extremidades do ônibus. A simetria fica ainda mais clara no seguinte gráfico:



O resultado está dentro do esperado, uma vez que se esperava que maior fosse a dose recebida quanto mais próximo se estivesse fonte, ou seja mais elevado na quinta fileira e menos elevado na décima primeira.

#### 6.4 Comparando uma fileira próxima a fonte com uma fileira distante

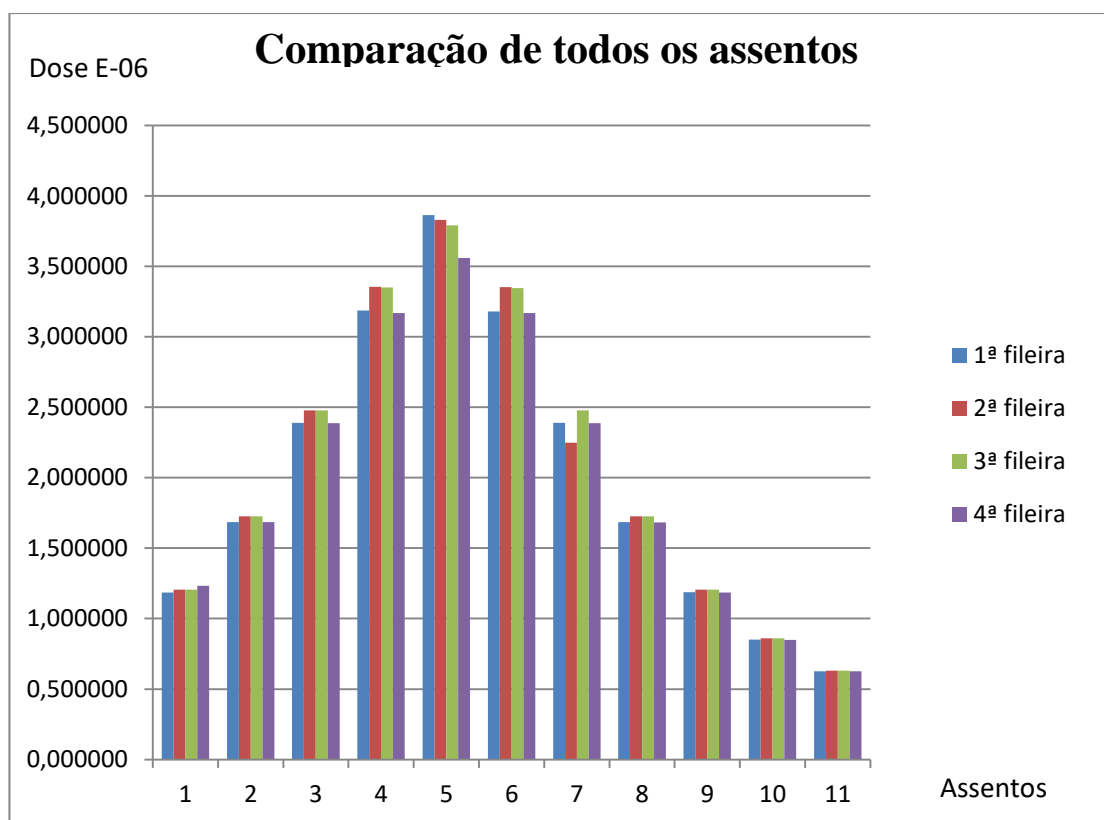
Nessa comparação é possível observar que as doses registradas em uma mesma fileira variam muito pouco em comparação às fileiras mais distantes. O gráfico a seguir mostra em azul as doses registradas em uma fileira próxima à fonte radioativa e em vermelho as doses registradas em uma fileira no final do ônibus:



O resultado está dentro do esperado, novamente comprovando que quanto mais longe se está da fonte maior a dose registrada. Destaca-se o fato da geometria do ônibus ter um comprimento muito maior do que a largura (14 e 2,6 metros, respectivamente) e, por isso, uma diferença de dose registrada tão acentuada é apresentada no gráfico anterior.

## 6.5 Comparando todos os assentos

Nessa comparação é possível observar novamente o padrão seguido pela dose detectada em cada assento, algo previsto e ditado pela distância que se está da fonte. O gráfico a seguir mostra todos os assentos, sendo que cada cor representa uma das colunas de detectores:



Conforme já analisado anteriormente, em uma mesma fileira se observa pouca variação ao passo que, em fileiras distantes, tal diferença é mais acentuada. Vale ressaltar que nas fileiras mais distantes a diferença é mínima entre os assentos que estão lado a lado, o que vale já que a distância deles até a fonte é similar.

## 6.6 Análise do erro previsto para a simulação

O erro previsto para a simulação depende do número de histórias gerado, ou seja, para quantas partículas emitidas de forma aleatória se calculou o percurso desde a fonte até seu destino final. Para que a simulação seja coerente, então, é necessário gerar um grande número de histórias. O valor total das simulações, contando todos os arquivos de entrada, foi próximo a 750 milhões de histórias.

O tempo computacional gasto realizado para simulação de cada arquivo de entrada foi de 300 minutos, demandando um total de 15 horas para simulação completa dos três arquivos.

O erro relativo final estimado para os tallies foi de 0,0043, um valor muito baixo, que atende às expectativas e é suficiente para garantir confiabilidade nos valores gerados pela simulação.



## **7 Conclusão**

A simulação comprova conhecimentos prévios, como o fato de se receber uma dose maior quanto mais próximo se está da fonte. Além disso, percebe-se uma elevada quantidade de dose recebida nos assentos, mostrando que, de fato, a placa de metal que separa o bagageiro dos passageiros não é uma boa barreira contra as partículas emitidas pela fonte radioativa, algo também já previsto.

Mais importante que isso, contudo, é a possibilidade de se utilizar os resultados obtidos para prever as consequências geradas em uma possível exposição desse tipo, estimando quais seriam as implicações na saúde dos passageiros, o que é feito a partir de estatísticas sobre exposições passadas e conhecimentos complementares.

## **Agradecimentos**

Agradeço aos Professores Renato Guedes e Marcos Paulo Vasconcelos por toda a ajuda prestada durante o projeto. A facilidade de comunicação, disponibilidade de tempo e lucidez na passagem de orientações e na tirada de dúvidas durante todo o ano foram fundamentais para a conclusão da pesquisa. Agradeço também ao Professor Edson Andrade pelo apoio durante toda a iniciação, destacando o seu imenso auxílio durante a confecção dos relatórios. Sua paciência na passagem de orientações com recomendações precisas, claras, objetivas e extremamente relevantes foram fundamentais para a melhoria do trabalho final e apresentação satisfatória dos resultados obtidos.

## Referências

- [1] Segunda Guerra Mundial – Disponível em  
< <http://www.sohistoria.com.br/ef2/segundaguerra/>> acesso em 17. Nov. 2015
- [2] Hiroshima e Nagasaki, bombas e terror – Disponível em  
< <http://www.historiadomundo.com.br/idade-contemporanea/hiroshima-e-nagasaki-bombas-e-terror.htm>> acesso em 17. Nov. 2015
- [3] Acidente radioativo de Goiânia – Disponível em  
< <http://www.brasilecola.com/fisica/o-acidente-radioativo-goiania.htm>> acesso em 17. Nov. 2015
- [4] X-5 Monte Carlo Team. **MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. Volume I: Overview and Theory**, 2003.
- [5] ATTIX, F. H. **Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry**. John Wiley & Sons, Inc. New York. 1986.
- [6] CAMPIONE INVICTUS 1200 – Disponível em <  
<http://www.comilonibus.com.br/site/veiculos/detalhe/linha-rodoviario/produto-campione-invictus-1200>> acesso em 10. Nov. 2015
- [7] Resolução ANTT Nº 4130 DE 03/07/2013 – Disponível em  
<<https://www legisweb.com.br/legislacao/?id=256114>> acesso em 10. Nov. 2015
- [8] Chapas de Aço Galvanizado – Disponível em  
<<http://catalogodearquitetura.com.br/chapas-de-aco-galvanizadas-ananda-metais.html>>  
acesso em 10. Nov. 2015
- [9] O Poliuretano – Disponível em <<http://www.plastiprene.com.br/o-poliuretano/>> acesso em 17. Nov. 2015
- [10] Tabela de densidade dos materiais - Disponível em  
<<http://www.euroaktion.com.br/Tabela%20de%20Densidade%20dos%20Materiais.pdf>  
> acesso em 10. Nov. 2015
- [11] Poliuretano – Disponível em <<http://www.recompur.com.br/duvidas.htm>>  
acesso em 10. Nov. 2015
- [12] 'A tática do Estado Islâmico para me recrutar - e como eu resisti' – Disponível em  
<[http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2015/08/150824\\_ei\\_tatica\\_radical\\_fd](http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2015/08/150824_ei_tatica_radical_fd)>  
acesso em 14. Mar. 2016

[13] Estado Islâmico já tenta recrutar jovens no Brasil, mas esquerdas impedem que o país aprove uma Lei Antiterror! Acordem, senhores congressistas!' – Disponível em <<http://veja.abril.com.br/blog/reinaldo/geral/estado-islamico-ja-tenta-recrutar-jovens-no-brasil-mas-esquerdas-impedem-que-o-pais-aprove-uma-lei-antiterror-acordem-senhores-congressistas/>> acesso em 14. Mar. 2016

[14] O que é guerra de 4ª geração? – Disponível em <<http://www.reservaer.com.br/est-militares/guerra-de-quatro-geracoes.html>> acesso em 14. Mar. 2016