Daiana Santos, Isadora Muniz,

Luciana Dall Bello e Maria Victória Siqueira

**A matemática envolvida em acidentes nucleares**

um estudo sobre decaimento radioativo dos piores desastres nucleares da história.

Prof. Luiz Leduino Neto

Resumo

Será discorrido neste trabalho a aplicação e implementação de alguns dos métodos computacionais e matemáticos aprendidos na Unidade Curricular Cálculo Numérico, ministrada pelo professor Luiz Leduíno. Este projeto tem como objetivo modelar e analisar o decaimento radioativo dos piores desastres nucleares da história, ocorridos nas cidades japonesas de Hiroshima e Nagasaki, além daquele considerado mais icônico, na usina de Chernobyl, em Pripyat, na antiga Ucrânia Soviética.

.

Sumário

[**1. Introdução**](#_4xpz4o6s1dlj) **3**

[**2. Fundamentação Teórica**](#_4acetoykn89q) **4**

[2.1 Embasamento histórico](#_afw26ryzu1gk) 4

[2.1.1 Explosões em Hiroshima e Nagasaki](#_yzqk2g90h6v4) 4

[2.1.2 Usina de Chernobyl](#_ebd2phitfc4q) 4

[2.2 Embasamento químico](#_ywvvdv9wtahh) 5

[2.2.1 Césio-137](#_857wbm8exk3u) 5

[2.2.2 Urânio-235](#_w7uuxi6xlujr) 5

[2.2.3 Plutônio-239](#_e2w3bgtxymgs) 6

[2.3 Embasamento matemático](#_xpxtlfdjya69) 6

[2.3.1 Decaimento Radioativo](#_cr3rvaeaqfn0) 6

[**3. Desenvolvimento**](#_rj44ci90f8w6) **7**

[3.1 Análise matemática](#_lyap18mud6pu) 7

[3.1.1 Decaimento radioativo em Chernobyl](#_8o2lenebjwza) 8

[3.1.2 Decaimento radioativo em Hiroshima e Nagasaki](#_fimenmmy7hqf) 9

[3.2 Análise Computacional](#_y88at9mo0if4) 10

[3.2.1 Método de Euler](#_a2t73j38qtkj) 10

[3.2.2 Método de Runge-Kutta de 4ª ordem](#_g0fmmvis3qts) 14

[**4. Resultados**](#_2kvnmfcgxk66) **17**

[4.1 Análise sobre o ocorrido na usina de Chernobyl](#_slj0oenql205) 17

[Análise computacional do Método de Runge-Kutta de 4ª Ordem](#_tptfrfdosxdj) 18

[4.2 Análise sobre o ocorrido em Hiroshima](#_rsrghvxvmm8x) 19

[4.3 Análise sobre o ocorrido em Nagasaki](#_p3u3loo4f1e5) 20

[**5. Conclusões**](#_kkrw7glrqaoi) **23**

[**6. Referências**](#_ii8emhqturv7) **24**

# **1. Introdução**

Em 25 e 26 de abril de 1986, no norte da Ucrânia Soviética, a usina nuclear de Chernobyl fazia um teste de segurança, do qual resultou na explosão radioativa do reator número 4, retratando assim o pior acidente nuclear da história. Até os dias de hoje ainda há a ocorrência da emissão de substâncias radioativas. Além disso, durante a Segunda Guerra Mundial, nos dias 6 e 9 de agosto de 1945, foram lançadas duas bombas nucleares respectivamente, uma em Hiroshima e outra em Nagasaki, situadas no Japão, causando diversas mortes de queimadura nos primeiros meses através do envenenamento radioativo.

Hoje em dia, diferente de Chernobyl, as duas cidades foram novamente habitadas.

Levando em consideração esses eventos, procurou-se uma maneira matemática de modelar o decaimento radioativo, com intuito de, através das análises estimar um tempo em que a substância radioativa tenha sido controlada em torno de Pripyat, cidade da qual Chernobyl está situada, comparando o tempo que foi levado para controlar a radiação nas duas cidades japonesas.

# 

# **2. Fundamentação Teórica**

## **2.1 Embasamento histórico**

Durante o século 20, a partir de pesquisas, foi possível apreender e refinar o conhecimento sobre energia nuclear, especialmente durante o período da Guerra Fria(1945-1992). Dessa forma, países detentores deste conhecimento passaram a implementar usinas nucleares como forma de gerar energia. O problema é que a manutenção de alto custo e o manejo extremamente cuidadoso dos componentes de cada estação faziam com que a probabilidade de erros fosse alta, porém deveriam ser evitadas a qualquer custo. Concomitantemente, cientistas estavam descobrindo o DNA, logo, as alterações causadas pela exposição de radiação eram quase desconhecidas.

# 

### **2.1.1 Explosões em Hiroshima e Nagasaki**

# 

Próximo ao fim da Segunda Guerra Mundial, no dia 6 de Agosto de 1945, os Estados Unidos bombardearam Hiroshima e quatro dias depois, a cidade de Nagasaki[1]. Em frentes opostas, os Estados Unidos(EUA) e o Japão entravam em conflitos constantes, porém o nível da guerra mudou quando os EUA usaram o poder bélico em forma de bombas nucleares. A devastação foi completa em ambas as cidades do Japão, deixando milhares de mortos e mais pessoas ainda contaminadas devido à intensa exposição à radiação na área. Mesmo após décadas depois, os efeitos perduram na área e nas gerações futuras dos sobreviventes aos ataques. A bomba "Little Boy" (que caiu em Hiroshima) transportava cerca de 9,97 kg de urânio e a "Fat Man" (a bomba de Nagasaki) continha cerca de 6,2 kg de plutônio.

### **2.1.2 Usina de Chernobyl**

Em 25 e 26 de abril de 1986, no norte da Ucrânia Soviética a usina nuclear de Chernobyl fazia um teste de segurança que simulava uma falta de energia da estação, no qual os sistemas de segurança de emergência e de regulagem de energia foram intencionalmente desligados, o que causou múltiplas falhas no projeto do reator 4, resultando em condições de reações descontroladas, culminando em uma explosão, do qual o fogo só foi contido em 4 de maio de 1986. A usina continha diversos materiais radioativos, principalmente o Césio-137 em um montante de 5% de todo o material radioativo de Chernobyl, estimado em 192 toneladas, totalizando 9,6 toneladas.

## **2.2 Embasamento químico**

### **2.2.1 Césio-137**

O Césio-137 é um pó branco de alta luminescência no escuro. Sendo um isótopo altamente radioativo do elemento químico Césio. Para atingir estabilidade, o elemento emite partículas ionizantes com radiações electromagnéticas beta, se transformando no isótopo radioisótopo do elemento químico Bário que por sua vez emite radiação gama, o tornando um elemento estável.

A radiação dissipada pelo Césio -137 é capaz de atravessar materiais, além da pele e tecidos presentes no corpo humano, o que pode causar efeitos devastadores a curto e longo prazo. Isso porque esse elemento químico possui uma forte tendência de se fixar no solo, o que facilita a sua bioacumulação em plantas. Entretanto, sua maior bioacumulação acontece em animais, de modo que o risco de contaminação por esse elemento seja muito mais nocivo do que em vegetais.

Sua aplicação é, de certo modo ampla, podendo ser usado na conservação de alimentos, na medicina sendo usado na radioterapia no tratamento de células cancerígenas e também em usinas nucleares devido ao seu poder de dissipação de energia.

O tempo de meia vida desse elemento é de 30 anos.

## 

### **2.2.2 Urânio-235**

O Urânio-235 é um isótopo do urânio, que compõe cerca de 1% do urânio que é extraído nas minas. Para gerar energia através desse isótopo, é necessário a sua fissão, ou seja, o rompimento dos átomos de U-235. Para isso, basta lançar um nêutron e o núcleo do urânio já é quebrado, liberando uma grande quantidade de energia. Devido a essa característica, o urânio- 235 é utilizado em armas nucleares. Sua aplicação mais notável em bombas atômicas foram as lançadas no desastre de Hiroshima e Nagasaki, ocorrido em 1945, causando uma imensa destruição nestas cidades japonesas. Este elemento enriquecido, também está presente em usinas nucleares, devido também, ao seu alto poder de dissipação de energia com uma pequena quantidade.

O seu tempo de meia vida é de 703.8 milhões de anos.

### **2.2.3 Plutônio-239**

O Plutônio-239 é um isótopo radioativo derivado do plutônio, do qual é utilizado como combustível nuclear no desenvolvimento de armas nucleares. Sua presença no meio ambiente é altamente tóxica e perigosa. Nos seres humanos, o maior perigo é a incorporação de partículas contendo o radionuclídeo através dos pulmões. Uma característica a ser destacada do plutônio é sua utilização como fonte de energia, cujo um grama do elemento é equivalente a 100 g de urânio e uma tonelada de óleo, tendo então grande importância em processos de reprocessamento de combustível nuclear.

Tem como tempo de meia vida de 24 mil anos.

## **2.3 Embasamento matemático**

As equações diferenciais ordinárias(EDOs) são equações em que o cálculo diferencial é aplicado para resolver a equação-problema. Assim, há soluções gerais, em que um coeficiente é parte da solução e representa uma variedade de resultados possíveis. Porém há também as soluções particulares, as quais ocorrem quando no enunciado há um valor inicial a ser substituído, sendo esse um problema de valor inicial(PVI). Devido a complexidade de uma vasta gama de equações que se encaixam nesse tipo, foram desenvolvidos métodos para resolução, como, por exemplo, o Método dos Coeficientes Indeterminados e o Métodos das Equações Separáveis. Para definir qual método pode ser aplicado de forma adequada e mais otimizada é preciso obter um conhecimento dos padrões de EDOs, podendo classificá-las em lineares, homogêneas e separáveis.

### **2.3.1 Decaimento Radioativo**

Existem diversos tipos de decaimento radioativo. O mais simples é a emissão de raios gama que representam uma transição nuclear de um estado excitado para um estado de baixa energia. Outros modos de decaimento: emissão de partículas alfa, beta, prótons e nêutrons.

O decaimento radioativo parte de uma equação diferencial de primeiro grau, em que N(0) = 0, valor o qual obedece a seguinte equação:

no qual é a constante de desintegração, o sinal negativo diz respeito ao número total de núcleos que diminui com o tempo.

# **3. Desenvolvimento**

Fatos experimentais mostram que materiais radioativos desintegram a uma taxa proporcional à quantidade presente do material. Se Q(t) é a quantidade presente de um certo material radioativo no instante t, então a taxa de variação de Q(t) com respeito ao tempo t, aqui denotada por dQ/dt, é dada por:

## **3.1 Análise matemática**

Uma equação diferencial ordinária de primeira ordem de variáveis separáveis possui o formato: , para deixar a equação no formato de variáveis separáveis deve fazer a divisão de Q(t) dos dois lados da igualdade ficando:

em t = 0

Então, o decaimento radioativo é dado por:

, sendo Q dado em gramas.

### **3.1.1 Decaimento radioativo em Chernobyl**

Sabendo que o césio-137 tem a meia-vida de 30 anos, a constante k tem o valor:

½

½ =

ln (½) =

ln ½ =

k =

Conforme Bezerra, Juliana [3] professora de história, todo o material radioativo em Chernobyl foi estimado em 192 toneladas e o Césio-137 equivale a 5% do montante total, ou seja, havia 9,6 toneladas de Césio-137 em 1986. Para calcular o decaimento radioativo em Chernobyl deve utilizar a fórmula:

### **3.1.2 Decaimento radioativo em Hiroshima e Nagasaki**

Sabendo que o Urânio-235 tem meia-vida de 704 milhões de anos, a constante k tem o valor:

½

½ =

ln (½) =

ln ½ =

k =

Conforme Xavier *et al*, a bomba atômica denominada “Little Boy”, da qual foi detonada em Hiroshima pesava 4,3 t e possuía uma potência equivalente a 12,5 mil t de TNT, provido de uma bala de 2,26 Kg de 235U, disparada em um alvo de 7,71 Kg de 235U. Somando o valor total de urânio presente na bomba, 9,97 Kg, é possível calcular o decaimento de acordo com a fórmula a seguir:

Já a bomba “Fat Man”, detonada em Nagasaki três dias após o ocorrido em Hiroshima continha como combustível nuclear 6,2 Kg plutônio-239, que possui meia-vida de 24 mil anos. Para o cálculo da constante k, tem-se como procedimento o mesmo realizado anteriormente, encontrando a seguinte fórmula de decaimento:

## **3.2 Análise Computacional**

### **3.2.1 Método de Euler**

O método de Euler é um procedimento numérico de primeira ordem para solucionar equações diferenciais ordinárias com um valor inicial dado. É um método simples tendo como formato a equação:



⇒ condição inicial

sendo h o passo fixo dentro do intervalo.

**Modelagem para cálculo de decaimento radioativo em Chernobyl**

Para a modelagem de decaimento radioativo tem-se a seguinte equação diferencial:

Levando em consideração os dados encontrados sobre o acidente na usina de Chernobyl, considera-se o PVI como , do qual é o conteúdo inicial de combustível nuclear para funcionamento do reator.

Seguindo o método de Euler, a equação de iteração é a seguinte:

Tendo como base o valor de k calculado na seção 3.1.1, a equação para aproximação para o decaimento de Césio-137 é:

Para auxílio nos cálculos do método, foi utilizada da programação em linguagem Python, apresentada a seguir:

import numpy as np

def f(u):

return -2.31\*10\*\*(-2)\*u

#tamanho e num. de passos

h = 0.1

u0 = 9.6\*10\*\*6

t0 = 0

#iteracoes

while(u0 > 0.001):

t = t0 + h

u = u0 + h\*f(u0)

u0 = u

t0 = t

#imprime

print(t, u0)

Já para os cálculos dos decaimentos dos combustíveis nucleares das bombas de Hiroshima e Nagasaki, o mesmo procedimento será realizado, tendo os seguintes valores iniciais para cada acontecimento:

**PVI edo de decaimento radioativo de Urânio-235 (Bomba de Hiroshima):**

Valor da constante k encontrada: k =

Equação para aproximação para o decaimento de Urânio-235:

O programa para cálculo do método é o seguinte:

import numpy as np

def f(u):

return -9.84\*10\*\*(-10)\*u

#tamanho e num. de passos

h = 1

u0 = 9.97\*10\*\*3

t0 = 0

#iteracoes

while(u0 > 0.001):

t = t0 + h

u = u0 + h\*f(u0)

u0 = u

t0 = t

#imprime

print(t, u0)

**PVI edo de decaimento radioativo de Plutônio-239 (Bomba de Nagasaki):**

Valor da constante k encontrada : k =

Equação para aproximação para o decaimento de Plutônio-239 :

Da mesma forma realizada nos cálculos anteriores, o programa de auxílio é o seguinte:

import numpy as np

def f(u):

return -2.88\*10\*\*(-5)\*u

#tamanho e num. de passos

h = 0.1

u0 = 6.2\*10\*\*3

t0 = 0

#iteracoes

while(u0 > 0.001):

t = t0 + h

u = u0 + h\*f(u0)

u0 = u

t0 = t

#imprime

print(t, u0)

### **3.2.2 Método de Runge-Kutta de 4ª ordem**

Na situação de **Chernobyl**, a quantidade de material radioativo foi consideravelmente maior que nos outros casos, atingindo a ordem de toneladas. Dessa forma, tivemos que analisar Q(t) como toneladas para que os dados ficassem mais melhores para serem analisados. Para isso, a constante K tem valor 0.0231 e h = 10, devido o alto valor de Q(t) neste caso.

O código em Python utilizado para obter os dados é:

from math import sqrt

from math import exp

def RungeKutta4(f,y,x,h):

k1 = h\*f(x,y)

k2 = lambda k1: h\*f(x + h/2, y + k1/2)

k3 = lambda k2: h\*f(x + h/2, y + k2(k1)/2)

k4 = lambda k3: h\*f(x+h,y + k3(k2))

return y + (k1+2\*k2(k1)+2\*k3(k2)+k4(k3))/6

f = lambda x,y : -k \* y # Obtem se essa função isolando y' na EDO

k = 0.0231

y0,x0,h,t = 96, 0, 10., 250 # Parâmetros iniciais dados para a resolução do problema

# RUNGE-KUTTA 4a Ordem

print ('\n\n\t\t\t\tRunge-Kutta 4 Ordem\n\n')

while x0 <= 1000:

yn = RungeKutta4(f,y0,x0,h)

print("y(%2.2f)\t= %4.6f" % (x0,y0))

y0 = yn

x0 += h

No caso de **Hiroshima**, foram analisados os dados para quilos de material radioativo ao longo dos anos. Dessa forma, para h = 1.000.000, ou seja, a contagem foi feita a cada um 1 milhão de anos para que os dados ficassem mais legíveis. A repetição das iterações até que a quantidade de material radioativo fosse menor ou igual a zero foi realizada para que pudéssemos observar a partir de quantos anos esse valor fosse baixo.

O código utilizado para realizar esse cálculo é:

from math import sqrt

from math import exp

def RungeKutta4(f,y,x,h):

k1 = h\*f(x,y)

k2 = lambda k1: h\*f(x + h/2, y + k1/2)

k3 = lambda k2: h\*f(x + h/2, y + k2(k1)/2)

k4 = lambda k3: h\*f(x+h,y + k3(k2))

return y + (k1+2\*k2(k1)+2\*k3(k2)+k4(k3))/6

f = lambda x,y : -k \* y # Obtem se essa função isolando y' na EDO

k = 0.000000984

y0,x0,h,t = 9970, 0, 1000000., 250 # Parâmetros iniciais dados para a resolução do problema

# RUNGE-KUTTA 4a Ordem

print ('\n\n\t\t\t\tRunge-Kutta 4 Ordem\n\n')

while x0 <= 25000000:

yn = RungeKutta4(f,y0,x0,h)

print("y(%2.2f)\t= %4.6f" % (x0,y0))

y0 = yn

x0 += h

De modo similar, fizemos os cálculos para o caso de **Nagasaki** também, utilizando desta vez quilos de material radioativo com a constante k = . Foi utilizado um valor menor de h, pois não seria necessário um valor tão grande para esta análise, logo, o valor utilizado foi de h = 10000.

Sendo assim, o código em Python utilizado foi:

from math import sqrt

from math import exp

def RungeKutta4(f,y,x,h):

k1 = h\*f(x,y)

k2 = lambda k1: h\*f(x + h/2, y + k1/2)

k3 = lambda k2: h\*f(x + h/2, y + k2(k1)/2)

k4 = lambda k3: h\*f(x+h,y + k3(k2))

return y + (k1+2\*k2(k1)+2\*k3(k2)+k4(k3))/6

f = lambda x,y : -k \* y # Obtem se essa função isolando y' na EDO

k = 0.000000984

y0,x0,h,t = 9970, 0, 1000000., 250 # Parâmetros iniciais dados para a resolução do problema

# RUNGE-KUTTA 4a Ordem

print ('\n\n\t\t\t\tRunge-Kutta 4 Ordem\n\n')

while x0 <= 25000000:

yn = RungeKutta4(f,y0,x0,h)

print("y(%2.2f)\t= %4.6f" % (x0,y0))

y0 = yn

x0 += h

# **4. Resultados**

Neste projeto, o objetivo foi obter e comparar estimativas sobre os maiores acontecimentos radioativos da história utilizando conceitos de cálculo numérico para fazer a análise matemática e computacional, quais os resultados serão mostrados abaixo.

## **4.1 Análise sobre o ocorrido na usina de Chernobyl**

* **Análise Matemática**

Na seção 3.1.1 foi feito o cálculo da quantidade de Césio-137 através do tempo, sendo a fórmula:

Como o decaimento radioativo é exponencial, ele nunca chegará a zero, assim, para estimar quando Chernobyl poderá voltar a ter vida, foi considerado Q(t) = 0,001 ficando:

* **Análise computacional do Método de Euler**

Na seção 3.1.2 foi realizada a modelagem do problema seguindo o método de Euler, obtendo a seguinte equação de iteração:

Partindo do valor inicial do problema, as aproximações para a solução com o valor de são:

.

### Análise computacional do Método de Runge-Kutta de 4ª Ordem

Para a análise dos resultados para o acidente de Chernobyl pode-se notar que o número de anos para o decaimento radioativo é muito menor do que em relação ao tempo para habitação novamente do terreno atingido. Isso ocorre por conta da meia vida dos compósitos químicos envolvidos para Chernobyl e para Hiroshima/Nagasaki, porque no primeiro caso a meia-vida é de aproximadamente 30 anos e no segundo caso a meia-vida é de milhares de anos.

Ainda que em Chernobyl a quantidade de reativos químicos seja muito maior(na ordem de toneladas), a constante K é muito maior também, logo tudo converge para que o tempo seja menor em comparação com os outros casos.

| **t(anos)** | **0** | **10** | ***...*** | **820** | **1000** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Q(t) (toneladas)** | 9.6 | 7.6199495 | *...* | 0.000001 | 0.000000 |

## **4.2 Análise sobre o ocorrido em Hiroshima**

* **Análise matemática**

Já o cálculo feito para a quantidade de Urânio-235 em função do tempo foi modelada seguindo a fórmula:

Tendo como base os mesmos valores utilizados na análise de Hiroshima:

### 

* **Análise computacional do Método de Euler**

Seguindo a modelagem já realizada, a equação de iteração é:

Partindo do valor inicial do problema, as aproximações para a solução com o valor de são:

.

.

* **Análise computacional do Método de Runge-Kutta**

Aplicando o Método de Runge-Kutta de 4ª Ordem, podemos observar após sucessivas iterações que após 24 milhões de anos a quantidade de material radioativo é aproximadamente zero, o que tornaria a região totalmente habitável novamente. Pode-se notar que a maior diferença é no primeiro milhão de ano, depois o número tende a se estabilizar próximo ao eixo x.

| **t(milhões de anos)** | **0** | **1** | **...** | **24** | **25** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Q(t) (quilos)** | 9970.0 | 2742.910127 | ... | 0.327210 | 0.090021 |

## **4.3 Análise sobre o ocorrido em Nagasaki**

* **Análise matemática**

Para os cálculos da quantidade de Plutônio-239, tem-se a seguinte equação:

Seguindo os mesmo valores de anteriormente, encontra-se o seguinte tempo de decaimento:

* **Análise computacional do Método de Euler**

De acordo com os mesmos procedimentos realizados nas análise feitas acima, a equação modelada é:

Partindo do valor inicial do problema, as aproximações para a solução com o valor de são:

.

* **Análise computacional do Método de Runge-Kutta de 4ª Ordem**

A partir da análise dos dados apresentados na tabela abaixo, podemos notar que ao colocar h = 10000 já seria o suficiente para que a quantidade de material radioativo já chegasse a próximo de zero. Pode-se notar que o valor da constante K influenciou diretamente neste caso, pois a diferença de tempo para o caso de Hiroshima e Nagasaki foi grande, ainda que a quantidade inicial tenha sido apenas ⅓ a menos para Nagasaki.

| **t(milhões de anos)** | **0** | **0.1** | **...** | **0.8** | **0.81** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Q(t) (quilos)** | 6200.0 | 4648.619523 | ... | 0.000001 | 0.000000 |

# 

# **5. Conclusões**

Mesmo que na análise feita Hiroshima e Nagasaki tenha resultado em muitos anos para evacuação total dos materiais radioativos, as duas cidades já foram novamente habitadas, porém Chernobyl segue ainda a estimativa de cerca de 1 mil anos como dita nos resultados.

Há algumas explicações do porquê Hiroshima e Nagasaki já foram novamente habitadas e Chernobyl não, como, as bombas que caíram em Hiroshima e Nagasaki foram detonadas no ar, centenas de metros acima da superfície da Terra, assim os depósitos radioativos se dispersaram na nuvem criada pela explosão. Já em Chernobyl, no entanto, o reator quatro se fundiu na superfície, produzindo uma ativação de nêutrons que fizeram com que a terra se tornasse radioativa. Outro ponto que reforça a situação de Chernobyl é que além de conter como combustível nuclear o Césio-137 (que foi o elemento principal utilizado nos cálculos), obtinha também uma grande quantidade de Urânio (valor mil vezes maior que o contido na bomba de Hiroshima), elemento que possui alto valor de meia-vida, contribuindo ainda mais para que a cidade de Pripyat fique por bons anos sem habitação.

Outra explicação é que uma bomba atômica está baseada na ideia de liberar a maior energia possível da reação de uma fissão nuclear no menor tempo possível, a ideia é criar o maior dano e devastação possível para anular as forças inimigas, assim, os isótopos radioativos que se criam em uma explosão atômica têm um período de vida relativamente curto. Mas, como um reator nuclear está desenhado para produzir energia em um processo de reação lento, isso resulta na criação de materiais de resíduos nucleares que possuem uma vida mais longa. Ou seja, a radiação inicial de um acidente nuclear pode ser muito mais baixa que a de uma bomba, mas seu tempo de vida será muito mais longo.

Há diversos fatores que influenciam nas contas, com isso, não foi possível fazer uma estimativa precisa somente com os conteúdos passados na disciplina, mas já nos permitiu uma boa análise dos eventos.

# **6. Referências**

**[1] Imagens fortes dos horrores de Hiroshima e Nagasaki são alerta sobre importância da paz**. <<https://www.nationalgeographicbrasil.com/historia/2017/08/galeria-hiroshima-nagasaki-arma-nuclear-bomba-atomica-segunda-guerra-japao-estados-unidos>>. Acesso em 4 de Novembro de 2019.

**[2]** **Decaimento Radioativo**. <<http://www.uel.br/projetos/matessencial/superior/edo/edoaplic.htm#edo0401>>. Acesso em 22 Nov 2019.

**[3]** Bezerra, Juliana. **Acidente de Chernobyl**. <<https://www.todamateria.com.br/acidente-de-chernobyl/>>. Acesso em 22 Nov 2019.

**[4]** Nascimento, Toni. Chernobyl - **causas, como ocorreu e curiosidades sobre o acidente nuclear.** <<https://segredosdomundo.r7.com/chernobyl/>>. Acesso em 22 Nov 2019.

**[5]** CASTILHO, SUGUIMOTO. **Chernobyl - A catástrofe.** Revista da Universidade Vale do Rio Verde, Três Corações, v. 12, n. 2, p. 316-322, ago./dez. 2014. Available from <<http://periodicos.unincor.br/index.php/revistaunincor/article/view/1506/pdf_209>>. Acesso on 22 Nov 2019.

**[6]** XAVIER, Allan Moreira et al . **Marcos da história da radioatividade e tendências atuais**.Quím. Nova, São Paulo , v. 30, n. 1, p. 83-91, Feb. 2007 . Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S0100-40422007000100019&lng=en&nrm=iso>. access on 24 Nov. 2019. http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422007000100019.

**[7]** EMICO, OKUNO. **As bombas atômicas podem dizimar a humanidade - Hiroshima e Nagasaki, há 70 anos**. Estud. av., São Paulo , v. 29, n. 84, p. 209-218, Aug. 2015 . Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S0103-40142015000200209&lng=en&nrm=iso>. access on 24 Nov. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142015000200014>.

**[8]** FIGUEIRA, Rubens C. L. et al . **Níveis de Pu-238 e Pu- 239+240 em amostras de sedimento marinho da costa sul do Brasil.** Rev. Bras. Oceanogr., São Paulo , v. 51, n. unico, p. 55-62, 2003 . Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S1413-77392003000100006&lng=en&nrm=iso>. access on 26 Nov. 2019. http://dx.doi.org/10.1590/S1413-77392003000100006.