

Cálculo da potência térmica de decaimento alfa para os radioisótopos Pu^{238} e Am^{241} com aplicação em geradores termoelétricos de radioisótopos

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma análise a respeito da produção de potência térmica radioativa utilizando os radioisótopos plutônio 238 e amerício 241, com o objetivo de uso em geradores termoelétricos de radioisótopos (RTG). Através da lei do decaimento radioativo foi deduzida a expressão para a potência térmica radioativa em função do tempo, a qual permitiu a dedução de uma equação que calcula o tempo estimado para que o decaimento reduza a potência, permitindo calcular o tempo prático de uso do sistema nuclear. Como exemplo, foram calculados e comparados os valores de atividade, potência inicial e tempo prático para os óxidos de plutônio (PuO_2) e de amerício (Am_2O_3). No caso, o PuO_2 já vem sendo utilizado há décadas pela NASA como combustível de RTG para diversas missões de exploração robótica, como a *Pioneer*, a *Voyager*, a *Galileo*, a *New Horizon*, dentre tantas outras. Enquanto o Am_2O_3 vem sendo considerado como combustível de RTG em diversos estudos recentes, feitos principalmente na *University of Leicester*, Reino Unido. Foi concluído que apesar de possuir maior potência inicial, o PuO_2 possui um decaimento muito mais rápido que o Am_2O_3 , o que propicia algum questionamento sobre a relação custo-benefício entre estes compostos.

PALAVRAS-CHAVE: RTG; Decaimento radioativo; Bateria nuclear; Fonte de potência para sistemas espaciais; Efeito Seebeck.

Ana Paula Rodrigues dos Santos
apaula0017@gmail.com
orcid.org/0000-0001-8778-8918
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.

Lamartine Nogueira Frutuoso
Guimarães
lamar.quima@gmail.com
orcid.org/0000-0002-0302-9162
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.

INTRODUÇÃO

Desde o início da corrida espacial, por volta da década de 50, o interesse e busca da humanidade por meios de alcançar o espaço vem aumentando e isso pode ser visto pelo lançamento de satélites, sondas, espaçonaves de exploração e até mesmo, recentemente, planos para missões de colonização. O fator crítico para que esses objetivos sejam bem-sucedidos é a capacidade de geração de energia elétrica para suprir as necessidades de cada missão.

O uso de energia nuclear é sem dúvida o mais considerado para missões de espaço profundo (ANGELO; BUDEN, 1985; LAUNIUS, 2008; BENNETT, 2006). Devido ao fato de ser uma fonte confiável e durável, a energia nuclear é muito mais vantajosa em relação ao uso de baterias e energia fotovoltaica. Existem vários tipos de tecnologias capazes de gerarem potência através de uma fonte nuclear, seja desde o uso do calor liberado pelo decaimento de um radioisótopo a pequenos reatores de fissão (LAUNIUS, 2008). Para os fins do presente trabalho foi abordada a tecnologia de geradores termoelétricos de radioisótopos (*radioisotope thermoelectric generators* - RTG).

Os chamados sistemas de potência de radioisótopos (*radioisotope power systems* - RPS) são caracterizados por serem sistemas compactos e robustos que fornecem energia de longa duração, em baixa potência, sem depender das condições ambientais que se tornam mais hostis conforme mais profundo no espaço (RADIOISOTOPE POWER SYSTEMS COMMITTEE, 2009). Diferente de reatores nucleares, seu funcionamento básico não consiste em fissão, mas sim, na liberação de energia térmica através do decaimento radioativo natural de um radioisótopo, a qual será absorvida e convertida diretamente em potência elétrica (LAUNIUS, 2008; RADIOISOTOPE POWER SYSTEMS COMMITTEE, 2009).

Os RPS mais utilizados na história da exploração espacial, desde 1961 (LAUNIUS, 2008) até o presente momento, são os RTG. O primeiro dispositivo desse tipo foi construído em 1954 por pesquisadores do *Mound Laboratory*, nos Estados Unidos, com uma capacidade de produção de potência elétrica de apenas 1,8 mW, mas suficiente para demonstrar a sua viabilidade (BENNETT, 2006).

Os dispositivos RTG possuem uma estrutura sem partes móveis, o que é extremamente atrativo pela resistência e robustez que eles apresentam, se tornando fontes muito confiáveis e seguras para o fornecimento de potência elétrica (LAUNIUS, 2008; RADIOISOTOPE POWER SYSTEMS COMMITTEE, 2009). Como a potência gerada por esses dispositivos é limitada, em média até 500 W(elétrica), e a eficiência de conversão é relativamente baixa, em média 6% (ANGELO; BUDEN, 1985; RADIOISOTOPE POWER SYSTEMS COMMITTEE, 2009), esses sistemas são mais adequados ao uso em sondas e *rovers* de exploração, por exemplo.

O funcionamento geral de uma unidade de RTG consiste na liberação de calor por decaimento de um material radioativo. Este calor é, em parte, transferido para um grande conjunto de termopares, os quais são pequenos

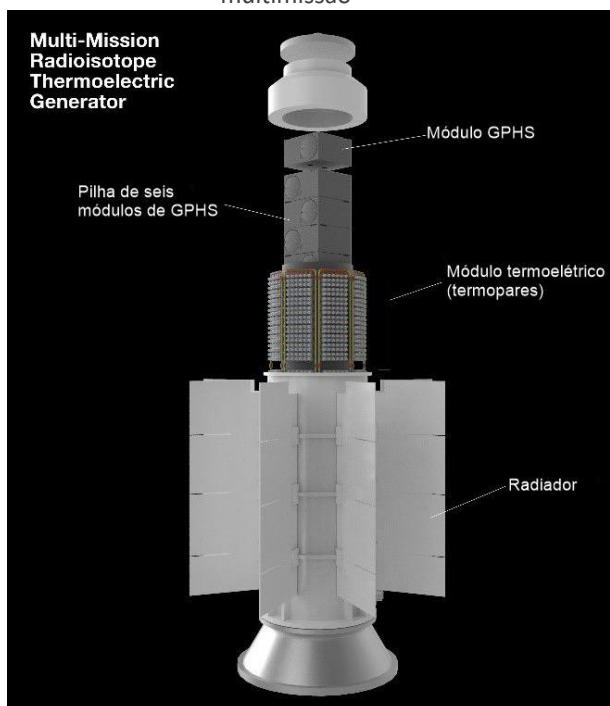
pares de junções de dois materiais semicondutores, que irão produzir uma corrente elétrica. Além disso, os termopares são conectados por um circuito fechado que alimenta com corrente elétrica o sistema de gerenciamento de energia da sonda ou *rover* (LAUNIUS, 2008; RADIOISOTOPE POWER SYSTEMS COMMITTEE, 2009).

Essa conversão termoelétrica ocorre devido ao fenômeno físico conhecido como Efeito Seebeck. Este estabelece que devido à diferença de temperatura existente entre duas extremidades de junção de dois materiais condutores, neste caso uma fonte térmica de radioisótopos e o ambiente espacial (lado frio), os elétrons nos materiais fluem do lado mais quente para o mais frio, produzindo corrente elétrica (ANGELO; BUDEN, 1985).

Como exemplo da estrutura básica de um RTG, na **Figura 1** é apresentado um esquema de um gerador termoelétrico de radioisótopos multimissão (*multi-mission radioisotope thermoelectric generator* - MMRTG). Atualmente, o MMRTG é o dispositivo utilizado nas missões americanas (RADIOISOTOPE POWER SYSTEMS COMMITTEE, 2009). Sua estrutura é composta de radiadores externamente, para dissipação do calor residual, e em seu interior estão os termopares envoltos ao módulo de fonte de calor de uso geral (*general purpose heat source* - GPHS) (NASA, Power Systems). São os módulos do GPHS que contêm as pastilhas do material nuclear encapsuladas em um invólucro protetor de irídio, como mostrado na **Figura 2**. Estes são ainda encapsulados em camadas aninhadas de material à base de carbono (NASA, Thermal Systems).

O plutônio 238 (Pu^{238}) é o material radioativo amplamente usado como combustível nos RTG americanos. É relevante mencionar que os Estados Unidos, que até o momento lideram a exploração científica no espaço profundo, usam como combustível de RTG apenas o plutônio 238. Como o Pu^{238} é um elemento radioativo que emite partículas alfa, e ainda considerando sua toxidez e o fato de ser pirofórico, deve-se reduzir a possibilidade de contato direto com o material. Isso faz com que para segurança e facilidade de manuseio, no uso de RTG, ele seja empregado, não em sua forma metálica de Pu^{238} puro, mas na forma de pequenas pastilhas de óxido cerâmico, PuO_2 (RADIOISOTOPE POWER SYSTEMS COMMITTEE, 2009; RANKIN *et al.*, 2000).

Figura 1 - Estrutura de um dispositivo gerador termoelétrico de radioisótopos multimissão



Fonte: Adaptado de (NASA, Power systems).

Figura 2 - Pastilha de combustível de Pu^{238} em seu revestimento protetor de irídio



Fonte: (NASA, Thermal systems).

A preferência por esse elemento está no fato de que ele possui uma meia vida longa (aproximadamente 88 anos) o que faz com que gere calor por tempo suficiente para uso em missões de longa duração, como as sondas *Pioneer 10* (51 anos) (ANDERSON *et al.*, 2002), *Voyagers* (até o momento 46 anos) (BENNETT, 2006; BENNETT, 2002) e *Mars Science Laboratory: Curiosity Rover* (até o momento 11 anos) (WELCH; LIMONADI; MANNING, 2013). Além do mais, o Pu^{238} possui alta potência específica (calor por massa) e alta densidade de potência (calor por volume) e tem uma forma química não corrosiva, insolúvel em água,

quimicamente estável e demonstra boas propriedades de engenharia em altas temperaturas (RADIOISOTOPE POWER SYSTEMS COMMITTEE, 2009).

Entretanto, o Pu^{238} é um elemento que não ocorre naturalmente na Terra, sua produção é decorrente da irradiação do radionuclídeo netúnio 237, processo realizado em reatores nucleares. Durante o período da guerra fria, o Pu^{238} americano era produzido nos reatores do *Savannah River Laboratory* e *Hanford Site* (GRAY, 1999). Essa produção cessou após a década de 80 (RADIOISOTOPE POWER SYSTEMS COMMITTEE, 2009; HOWE *et al.*, 2013) em função de rearranjos no sistema de produção de radioisótopos americano. Acordos Internacionais transferiram a produção de Pu^{238} para a Rússia. Na primeira década do século XXI esta fonte também começou a escassear (RADIOISOTOPE POWER SYSTEMS COMMITTEE, 2009; GRAY, 1999; HOWE *et al.*, 2013). As estimativas são de que a demanda de Pu^{238} para missões espaciais nos próximos anos não será atingida devido à falta de material, o qual possui uma produção que demanda tempo, alto custo e possui baixa produção de kg/ano (RADIOISOTOPE POWER SYSTEMS COMMITTEE, 2009; RANKIN *et al.*, 2000; HOWE *et al.*, 2013). Assim, outras possibilidades de radioisótopos voltaram a serem estudadas.

A Agência Espacial Europeia (*European Space Agency* - ESA), por exemplo, vem desenvolvendo estudos que visam a utilização do amerício 241 (Am^{241}) na forma cerâmica Am_2O_3 em RPS, não no modo RTG, mas em unidades de aquecimento de radioisótopos (*radioisotope heater units* - RHU), as quais até o momento também utilizam como fonte térmica o Pu^{238} (AMBROSI *et al.*, 2019; AMBROSI *et al.*, 2013; AMBROSI *et al.*, 2021).

Os RHU são dispositivos de tamanho reduzido, com cerca de 5 cm de comprimento que, diferentemente dos RTG, apenas liberam potência térmica a partir do decaimento do radioisótopo (BENNETT, 2006; AMBROSI *et al.*, 2019). Separadamente aos RTG, eles são amplamente usados para manter o aquecimento dos instrumentos no interior de sondas, o que evita o uso de aquecedores elétricos, os quais além de necessitar de energia elétrica, podem causar interferências eletromagnéticas nos sistemas a bordo (AMBROSI *et al.*, 2019).

Os fatores que fazem o Am^{241} ser considerado para essa aplicação são de que ele é um radioisótopo com uma meia vida bem longa, de aproximadamente 432 anos, sendo capaz de dissipar energia térmica por um longo período. Ademais, há grande disponibilidade de Am^{241} , já que ele é um dos produtos gerados em reatores nucleares do tipo adotado na Inglaterra desde os anos 60 (AMBROSI *et al.*, 2013; AMBROSI *et al.*, 2021; MIKHALEV; CHERNOV; KOROBENNIKOV, 2020). Por muito tempo esse material foi apenas considerado um rejeito, mas agora a atenção está em aproveitar a produção do Am^{241} e sua consequente conversão para pastilhas de Am_2O_3 , trabalho desenvolvido principalmente pelo *National-Nuclear-Laboratory* no Reino Unido (AMBROSI *et al.*, 2021).

Tendo em vista esses dois radioisótopos introduzidos, o presente trabalho objetiva realizar o cálculo e posterior análise da potência térmica inicial que esses

elementos, em forma metálica e de óxido, são capazes de gerar. Em seguida desenvolver o cálculo de tempo necessário para que o decaimento produza uma redução de potência específica, permitindo obter o tempo prático de uso do sistema nuclear, com base na saída elétrica que é fornecida.

DEFINIÇÃO DA POTÊNCIA

O funcionamento de RTG depende diretamente da desintegração espontânea do núcleo radioativo, acompanhada da emissão de partículas energéticas, tais como as partículas alfa (α), beta (β) e raios gama (γ).

A taxa de variação no número de átomos de um radionuclídeo devido ao decaimento radioativo é expressa pela relação

$$\frac{dN}{dt} = -N\lambda, \quad (1)$$

onde N é o número de átomos, t é o tempo e λ é a constante de decaimento característica do material (ANGELO; BUDEN, 1985; DUDERSTADT; HAMILTON, 1976).

A **Equação 1** é reescrita como

$$\frac{dN(t)}{N(t)} = -\lambda dt. \quad (2)$$

Integrando no tempo de zero (0) até t ,

$$\int_{N_0}^{N(t)} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt' \quad (3)$$

obtem-se,

$$\ln\left(\frac{N(t)}{N_0}\right) = -\lambda t. \quad (4)$$

Escrevendo a **Equação 4** na forma exponencial, chega-se na expressão que indica o número de átomos em um determinado instante de tempo, t ,

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (5)$$

onde N_0 é o número de átomos no instante $t = 0$.

É importante considerar neste momento a situação do decaimento quando metade da massa inicial decaiu, ou seja,

$$N\left(t = T_{\frac{1}{2}}\right) = \frac{N_0}{2}. \quad (6)$$

Nesta situação, simplificando N_0 tem-se

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}}. \quad (7)$$

Aplicando-se a função logaritmo neperiano e após alguma álgebra chega-se à

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{\frac{1}{2}}}, \quad (8)$$

com $T_{\frac{1}{2}}$ sendo o tempo de meia vida do elemento, ou seja, o tempo necessário para que ele decaia em metade da sua massa original.

A atividade do radionuclídeo corresponde ao valor das desintegrações que ocorrem por unidade de tempo, justamente (ANGELO; BUDEN, 1985; DUDERSTADT; HAMILTON, 1976)

$$A(t) = N\lambda \left[\frac{\text{átomos}}{\text{tempo}} \right]. \quad (9)$$

Logo, ao multiplicar a **Equação 5** por λ , é obtida a atividade em função do tempo, $A(t)$,

$$\begin{aligned} \lambda N(t) &= \lambda N_0 e^{-\lambda t} \\ A(t) &= A_0 e^{-\lambda t}, \end{aligned} \quad (10)$$

sendo que A_0 é a atividade inicial no instante $t = 0$.

Cada desintegração libera uma energia, E , característica de cada decaimento, o qual no caso do Pu^{238} é a emissão de uma partícula α . Assim reescreve-se a **Equação 10** como sendo

$$A(t)E = A_0 E e^{-\lambda t}, \quad (11)$$

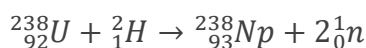
onde define-se o produto ($A.E$) como a quantidade que expressa a potência térmica, P . Portanto, a partir do desenvolvimento das **Equações 5, 10 e 11**, a equação de decaimento radioativo, que expressa o valor da potência em função do tempo, é deduzida,

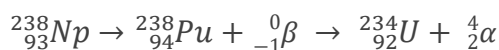
$$P(t) = P_0 e^{-\lambda t} \quad (12)$$

sendo que P_0 é a potência inicial do elemento radioativo. Quando se tratando de RTG, é comum que a potência inicial capaz de ser gerada a partir da criação do radioisótopo combustível seja nomeada potência de início de vida (*beginning of life* - BOL).

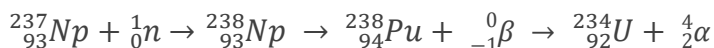
PLUTÔNIO 238

Com uma meia vida de $T_{\frac{1}{2}} = 87,7$ anos, o Pu^{238} é um metal actínideo e foi o primeiro isótopo do plutônio a ser descoberto (CLARK *et al.*, 2006). Como não é um elemento que ocorre naturalmente, sua primeira produção ocorreu através do bombardeamento de um isótopo do urânio, o urânio 238, com deutérios acelerados em um ciclotron. Isso fez com que fosse criado o netúnio 238 (Np^{238}) e dois nêutrons livres. Após 2,1 dias, o Np^{238} decai por um decaimento beta em Pu^{238} (PERIODIC TABLE OF ELEMENTS, 2023)





O caminho de irradiação mostrado acima não é o caminho usado atualmente para a produção do Pu^{238} . O método moderno para produção desse radioisótopo compreende na irradiação por nêutrons de amostras de alguns quilogramas de netúnio 237 (Np^{237}) pelo período de até um ano (HOWE *et al.*, 2013). O que ocorre é que o Np^{237} absorve um nêutron criando Np^{238} , o qual decai em Pu^{238} ,



A seção de choque de fissão do Np^{238} é grande para nêutrons rápidos e pequena para nêutrons térmicos. Isso faz com que, quando a irradiação do Np^{237} ocorre em um reator térmico, o Np^{238} não fissione visto que os nêutrons rápidos são escassos no ambiente desse tipo de reator. Enquanto em reatores rápidos, o Np^{238} possui uma grande probabilidade de fissão, fazendo com que em torno de 85% do total desse elemento seja destruído antes de decair, limitando a produção de plutônio em grande quantidade (HOWE *et al.*, 2013).

Plutônio metálico

A massa molar, M , para 1 mol de Pu^{238} é 238,04956 g/mol. Pela contante de Avogadro, sabe-se que em 1 mol existem $6,023 \cdot 10^{23}$ átomos. Assim, a população, expressa em unidade de átomo por grama, em 1 mol de Pu^{238} , é dada por

$$N_{\text{Pu}^{238}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23}}{238,04956} \left[\frac{\text{átomo}}{\text{grama}} \right]. \quad (13)$$

Substituindo a **Equação 8** em **9**, a atividade inicial pode ser escrita em função do tempo de meia vida,

$$A_0 = \frac{\ln(2)}{T_{\frac{1}{2}}} N \left[\frac{\text{desintegração}}{\text{s. grama}} \right]. \quad (14)$$

Utilizando os valores característicos do Pu^{238} é obtido que sua atividade inicial é $A_{\text{Pu}^{238}} = 6,34110225 \cdot 10^{11}$ desintegrações por segundo grama.

É conhecido que o decaimento do Pu^{238} ocorre por um decaimento que libera uma partícula α de energia igual a 5,5932 MeV. Logo, a energia E , em joules, liberada corresponde a $E_{\text{Pu}^{238}} = 8,94912 \cdot 10^{-13}$ J.

Com os valores de $A_{\text{Pu}^{238}}$ e $E_{\text{Pu}^{238}}$, pela definição da **Equação 12**, encontra-se a potência inicial para o plutônio 238 na forma metálica, ou seja, pura

$$P_{0\text{Pu}^{238}} \cong 0,567 \text{ W/g}. \quad (15)$$

Óxido de plutônio

Agora será exposto o processo análogo ao do plutônio metálico, para calcular a potência do plutônio 238 em sua forma de dióxido, PuO_2 , que é a forma como esse radioisótopo é utilizado como combustível para RPS.

A massa molar do oxigênio é 15,999 g/mol. Ou seja, a massa molar para 1 mol de PuO_2 é 270,04756 g/mol, o que faz com que sua população, seja

$$N_{PuO_2} = \frac{6,023 \cdot 10^{23}}{270,04756} \left[\frac{\text{átomo}}{\text{grama}} \right]. \quad (16)$$

Como o plutônio é o único átomo que se desintegra nessa molécula, o tempo de meia vida considerado e a energia liberada na desintegração são os mesmos valores apresentados para o plutônio metálico. Assim, a atividade do PuO_2 é $A_{PuO_2} = 5,589743329 \cdot 10^{11}$ desintegrações por segundo grama. Um valor inferior ao do Pu metálico.

Portanto, com os valores de A_{PuO_2} e E_{PuO_2} , encontra-se a potência inicial para o dióxido de plutônio

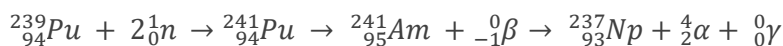
$$P_{0PuO_2} \cong 0,50 \text{ W/g}. \quad (17)$$

Ou seja, um valor 11,8 % menor que o do plutônio metálico. Relembrando que, apesar da potência inicial do PuO_2 ser menor, ele é a forma preferencialmente escolhida para o combustível devido à maior segurança que oferece durante o manuseio para encapsulamento, uma vez que o Pu^{238} é extremamente tóxico e pirofórico em sua forma metálica.

AMERÍCIO 241

O amerício, assim como o plutônio, também é um elemento radioativo que não ocorre naturalmente na Terra. Ele foi o quarto elemento transurânico a ser descoberto. Seu isótopo, o amerício 241, com meia vida de $T_{\frac{1}{2}} = 432,2$ anos, antes de ser considerado para o uso em RPS, possui um histórico de aplicabilidade na medicina e na indústria como fonte portátil de raios gama e partícula alfa. Além disso, ele é usado como fonte de ionização em certos detectores de fumaça (PERIODIC TABLE OF ELEMENTS, 2023).

A produção de Am^{241} ocorre quando dois nêutrons são absorvidos pelo radioisótopo Pu^{239} (produto da reação do U^{238}), reação que libera fóton e gera o Pu^{241} , o qual após 14,35 anos decai por um decaimento beta em Am^{241}



Esta é até hoje a rota moderna para produção do Am^{241} .

Amerício metálico

Um mol de Am^{241} possui massa molar de 241,05683 g/mol. Logo, a sua população expressa em átomo por grama, é de

$$N_{Am^{241}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23}}{241,05683} \left[\frac{\text{átomo}}{\text{grama}} \right]. \quad (18)$$

Considerando o tempo de meia vida do amerício, pela **Equação 14**, a atividade inicial do radioisótopo é encontrada como sendo $A_{Am^{241}} = 1,270654460200 \cdot 10^{11}$ desintegrações por segundo grama.

O Am^{241} é conhecido por sofrer decaimento do tipo α , com energia aproximada de 5,486 MeV, além de irradiar como subproduto pequenas quantidades de raios γ de 0,0595409 MeV. Para a aplicação de interesse deste trabalho, a irradiação γ não tem consequência significativa e apenas a energia do decaimento α é considerada. Isso, devido ao fato de que o raio γ é uma onda eletromagnética que interage pouco por colisão, quando comparado à partícula α , a qual possui massa, dimensão muito maior e energia com duas ordens de grandeza a mais. Ou seja, existe uma baixa probabilidade do raio γ depositar dentro da pastilha com o elemento radioisótopo e contribuir com a potência térmica dissipada. Portanto, a energia liberada na desintegração é

$$E_{Am^{241}} = E_{\alpha} = 8,789541 \cdot 10^{-13} \text{ J}.$$

Com os valores da atividade e energia, encontra-se que a potência inicial para o amerício metálico, ou seja, puro, é

$$P_{0_{Am^{241}}} \cong 0,112 \text{ W/g}. \quad (19)$$

Óxido de amerício

O Am^{241} em sua forma cerâmica, Am_2O_3 , vem sendo estudado (AMBROSI *et al.*, 2013; AMBROSI *et al.*, 2021; MIKHALEV; CHERNOV; KOROBEINIKOV, 2020) para ser usado como fonte de calor (através de seu decaimento) em RPS, como possível alternativa para o uso do plutônio.

Conforme dados já apresentados, as massas molares, do Am^{241} e do O são respectivamente 241,05683 e 15,999 g/mol. Então, a massa de 1 mol de trióxido de diamerício é de 530,11066 g/mol.

Com isso, a população em 1 mol de Am_2O_3 , expressa em átomo por grama, é de

$$N_{Am_2O_3} = \frac{6,023 \cdot 10^{23}}{530,11066} \left[\frac{\text{átomo}}{\text{grama}} \right]. \quad (20)$$

Analogamente aos métodos anteriores, encontra-se a atividade da molécula do óxido de amerício, $A_{Am_2O_3} = 5,77803816 \cdot 10^{10}$ desintegrações por segundo grama.

Como o átomo de amerício é o único da molécula que sofre desintegração, a energia liberada na desintegração é a mesma avaliada para o amerício metálico. Dessa forma, a potência inicial para o Am_2O_3 é,

$$P_{0_{Am_2O_3}} \cong 0,051 \text{ W/g}, \quad (21)$$

valor que representa quase a metade da potência térmica inicial do amerício puro.

TEMPO PRÁTICO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

Em um RTG o fornecimento de potência elétrica depende diretamente da geração de potência térmica pelo decaimento do radioisótopo combustível. Como já exposto na seção Definição de Potência, o decaimento natural segue uma equação que fornece que a potência gerada diminui com o tempo, e essa redução está diretamente relacionada com o tempo de meia vida do elemento. Sendo assim, é necessário levar em consideração que existe um tempo prático para que o RTG ainda consiga fornecer energia suficiente para o funcionamento dos sistemas que ele abastece.

Para calcular o tempo prático (τ) de uso de um radioisótopo para geração de energia, consideramos a **Equação 12**, onde agora

$$P(\tau) = P_0 e^{-\lambda\tau} . \quad (22)$$

Realizando o logaritmo em ambos os lados da equação anterior,

$$\ln(P(\tau)) = \ln(P_0) - \lambda\tau \quad (23)$$

obtem-se a expressão para o tempo prático

$$\tau = \frac{\ln(P_0) - \ln(P(\tau))}{\lambda} . \quad (24)$$

A metodologia considerada para o cálculo do tempo prático τ é estabelecer uma potência mínima, $P(\tau)$, para funcionamento do sistema que se deseja obter quando o tempo τ for atingido, e com o valor da potência inicial produzida, P_0 , já conhecido.

Como exemplo, serão calculados os valores de τ para o PuO_2 e o Am_2O_3 , devido ao fato de que eles são considerados para serem usados em RTG durante missões espaciais.

Algumas considerações para simplificação dos cálculos, são feitas:

- Tendo em vista os satélites, sondas e veículos espaciais para exploração que utilizaram sistemas de potência de radioisótopos e a massa de combustível, no caso, PuO_2 utilizado, foi considerado para fins de comparação, que a massa de combustível, m , é 14 kg por unidade de RTG. Isso, baseado nas quantidades que abasteceram sondas e rovers já lançados, como por exemplo: *Cassini* – 32,7 kg (LAUNIUS, 2008); *Mars Rover Curiosity* – 4,8 kg (NASA SCIENCE, Mars Curiosity Rover); *Galileo* – 9,7 kg (LAUNIUS, 2008).

- A potência elétrica obtida a partir da potência térmica é calculada considerando a conversão pelo efeito Seebeck com eficiência de 5,5%. Esse valor foi assumido com base nos dados de RTG já utilizados em missões espaciais, considerando o melhor valor médio (ANGELO; BUDEN, 1985).

- A potência térmica final foi considerada como 200 W(térmica), correspondendo a 11 W(elétrica), ou seja, o tempo de uso é considerado como o tempo até a produção de potência elétrica quase cessar.

Para o PuO_2 foi obtido que a potência térmica inicial é de aproximadamente 0,50 W/g. Considerando um total de 14 kg, a potência inicial total do sistema será de 7000 W(térmica) ou 385 W(elétrica). Com esses valores aplicados na **Equação 24**, é obtido que o tempo prático de uso até a produção de energia elétrica cair para 11 W(elétrica) é aproximadamente $\tau_{PuO_2} = 449$ anos.

Da mesma forma, para o Am_2O_3 a potência térmica inicial é de aproximadamente 0,051 W/g. Para um total de 14 kg, esse valor fornece uma potência inicial total de 714 W(térmica) ou 39,3 W(elétrica). Assim, é encontrado que o tempo prático de uso até a produção de energia elétrica cair para 11 W(elétrica) no caso desse isótopo, é aproximadamente $\tau_{Am_2O_3} = 793$ anos, um tempo muito superior ao encontrado para o PuO_2 .

Para comparação, os cálculos do tempo prático para o PuO_2 e o Am_2O_3 levam em consideração uma potência elétrica final bem reduzida de 11 W(elétrica). Mas certamente sistemas que vão para o espaço necessitam de uma potência mínima maior para funcionarem, por possuírem vários subsistemas, como todos os computadores, transmissores e receptores de rádio, dispositivos de armazenamento de dados, instrumentos científicos, entre outros (NASA SCIENCE, Basics of Spaceflight), e conforme a potência gerada vai caindo esses instrumentos vão sendo desligados aos poucos. A demanda elétrica atual desses sistemas está entre 0,3 e 2,5 kW(elétrica) (NASA SCIENCE, Basics of Spaceflight).

Vemos pelos cálculos das seções anteriores que o tempo de decaimento é muito maior para o Am_2O_3 , devido à significativa longa meia vida do Am^{241} , um valor mais que quatro vezes a do Pu^{238} . Porém, a mesma quantidade de PuO_2 gera 9,8 vezes mais potência elétrica que o Am_2O_3 . Usando os números obtidos para τ_{PuO_2} e $\tau_{Am_2O_3}$, tem-se que para ser possível que o Am^{241} gere inicialmente 385 W(elétrica), como o plutônio, seriam necessários aproximadamente 137 kg de Am_2O_3 , uma quantidade muito maior do que os 14 kg estipulados inicialmente.

Assumindo que os sistemas de uma determinada sonda para exploração necessitem de 300 W(elétrica) para funcionar plenamente e que ela possua uma potência inicial de 385 W(elétrica), 14 kg de PuO_2 daria um tempo prático (pela **Equação 24**) de 31 anos. Enquanto 137 kg de Am_2O_3 forneceria um tempo prático de 155 anos.

Refletindo o que esse tempo de duração significa, pode ser citado, por exemplo, que a *Voyager 1* alcançou o espaço interestelar cerca de 35 anos após seu lançamento (AMBROSI *et al.*, 2013). Caso esse fosse o objetivo da situação criada nessa discussão, seria necessário recorrer ao uso do Am^{241} em grande quantidade ou a uma quantidade maior de Pu^{238} , sendo que ambas as condições possuem seus desafios. Isso porque o Pu^{238} está cada vez mais escasso, o que compromete o seu uso em grande quantidade. Enquanto o Am^{241} está sendo

visto como um elemento alternativo para o uso na exploração espacial principalmente pela ESA, que com laboratórios parceiros vem procurando formas de extraí-lo do combustível usado armazenado e prepará-lo para o uso como fonte térmica, em escala industrial (AMBROSI *et al.*, 2013; AMBROSI *et al.*, 2021).

CONCLUSÕES

Apesar de serem uma tecnologia usada há mais de 60 anos, os RTG foram e ainda são cruciais para a exploração espacial, sendo fontes duráveis e de alta confiabilidade para fazer com que sondas e *rovers* consigam ter energia suficiente para explorar regiões cada vez mais distantes da Terra. O atual aprimoramento desses sistemas também vem com o desafio de otimizar e encontrar novas opções de radioisótopos para combustível. Isso porque a fonte primária utilizada, o Pu^{238} , não conseguirá atender a demanda atual. Dessa questão, surgem novas fontes que passam a ser consideradas, como o Am^{241} .

Neste trabalho foram deduzidas expressões que permitem o cálculo da potência térmica em relação ao tempo, uma equação no formato da lei de decaimento. Também foi construída uma metodologia para que seja estimado o tempo prático de uso de uma fonte de decaimento para produção de potência elétrica. Como exemplo para aplicação dessas análises foram considerados os elementos Pu^{238} e Am^{241} e seus respectivos óxidos PuO_2 e o Am_2O_3 .

Ao final, conclui-se que em relação à potência inicial, o Pu^{238} possui um valor 10 vezes maior que o Am^{241} . Além de que ambas as formas em óxido desses radioisótopos possuem uma potência inicial menor do que seu componente radioativo puro. Isso ocorre devido ao aumento da massa molecular, com a diminuição da população e conseqüentemente diminuição da atividade.

Com os cálculos feitos para o tempo prático de uso das fontes estudadas neste trabalho, foi possível observar que apesar da potência térmica gerada pelo Am_2O_3 ser menor, ele demora muito mais tempo para ir reduzindo seu valor inicial. Ou seja, é uma fonte mais durável que o PuO_2 . Porém, para que a potência fornecida seja comparável à do plutônio é necessário utilizar uma massa 10 vezes maior, o que resulta em outras inconveniências, visto que o peso está diretamente relacionado ao custo e dificuldade de lançamento de sistemas ao espaço.

A baixa produção de Pu^{238} e sua evidente importância como melhor fonte para geração de potência elétrica em RTG, comparado ao Am^{241} , traz a inevitabilidade desse isótopo ser usado apenas com esse propósito. Colocar Am^{241} para produção de energia elétrica é duvidável, considerando que seria necessário levar para missões uma quantidade muito maior dessa fonte de combustível. Assim, é importante avaliar se o seu melhor uso seria como fonte térmica, em RHU, para suprir a potência térmica necessária para aquecer os equipamentos e estruturas das sondas e outros pequenos veículos de exploração, garantindo o funcionamento ideal nas baixas temperaturas do ambiente espacial.

Pu^{238} and Am^{241} radioisotope thermal power alpha decay calculation for application in radioisotope thermoelectric generators

ABSTRACT

This paper introduces an analysis regarding the thermal power produced by the radioisotopes plutonium 238 and americium 241, for application in radioisotope thermoelectric generators (RTG) devices. The expression that gives the radioactive thermal power as function of time was deduced based on the radioactive decay law. It also allowed further estimation of the practical useful time for the nuclear system. As examples, the activity values, initial power, and practical useful time for plutonium (PuO_2) and americium (Am_2O_3) oxides were calculated and compared. The PuO_2 has already been used for decades by NASA's RTG fuel for several robotic exploration missions, such as Pioneer, Voyager, Galileo, New Horizon, among many others. As for Am_2O_3 , it has been considered as an RTG fuel in several recent studies carried out at the University of Leicester, UK. It was concluded that despite having greater power at the beginning of life, PuO_2 has a much faster decay than Am_2O_3 , which raises some questions about the cost-benefit relationship between the long-term applicability of these two compounds.

KEYWORDS: RTG; Radioactive decay; Nuclear battery; Space systems power source; Seebeck effect.

Cálculo de potencia térmica de desintegración alfa de los radioisótopos Pu^{238} y Am^{241} destinados a su uso en generadores termoeléctricos de radioisótopos

RESUMEN

El presente trabajo presenta un análisis sobre la producción de energía térmica radiactiva utilizando los radioisótopos plutonio 238 y americio 241, con el objetivo de utilizarlo en generadores termoeléctricos de radioisótopos (RTG). A través de la ley de desintegración radiactiva se dedujo la expresión de la potencia térmica radiactiva en función del tiempo, lo que permitió deducir una ecuación que calcula el tiempo estimado para que la desintegración reduzca la potencia, permitiendo calcular el tiempo práctico de uso del sistema. por calcular nuclear. A modo de ejemplo, se calcularon y compararon los valores de actividad, potencia inicial y tiempo práctico de los óxidos de plutonio (PuO_2) y americio (Am_2O_3). En este caso, el PuO_2 ya ha sido utilizado durante décadas por la NASA como combustible RTG para varias misiones de exploración robótica, como *Pioneer*, *Voyager*, *Galileo*, *New Horizon*, entre muchas otras. Mientras que el Am_2O_3 ha sido considerado como combustible RTG en varios estudios recientes, realizados principalmente en la *University of Leicester*, Reino Unido. Se concluyó que, a pesar de tener mayor potencia inicial, PuO_2 tiene una desintegración mucho más rápida que Am_2O_3 , lo que plantea algunas dudas sobre la relación costo-beneficio entre estos compuestos.

PALABRAS CLAVE: RTG; Desintegración radioactiva; Batería nuclear; Fuente de energía para sistemas espaciales, Efecto Seebeck.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Processo nº 88887.827680/2023-00.

REFERÊNCIAS

AMBROSI, R. M. *et al.* Development and Testing of an Americium-241 Radioisotope Thermoelectric Generator. **Proceedings of Nuclear and Emerging Technologies for Space**, Albuquerque, 2013.

AMBROSI, R. M. *et al.* European radioisotope thermoelectric generators (RTGs) and radioisotope heater units (RHUs) for space science and exploration. **Space Science Reviews** v. 215, 2019. Doi: 10.1007/s11214-019-0623-9.

AMBROSI, R. M. *et al.* A Concept Study on Advanced Radioisotope Solid Solutions and Mixed-Oxide Fuel Forms for Future Space Nuclear Power Systems. **Nuclear Technology**, v. 207, p. 773-781, 2021. Doi: 10.1080/00295450.2021.1888616.

ANDERSON, J. D. Study of the anomalous acceleration of Pioneer 10 and 11. **Physical Review D**, v. 65, p. 082004, 2002. Doi: 10.1103/PhysRevD.65.082004.

ANGELO, J. A; BUDEN, D. **Space Nuclear Power**. Orbit Book Company, 1ª Ed., 1985.

Basics of Spaceflight, Chapter 13: Onboard Systems. **NASA Science**. Disponível em: <https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/chapter11-3/>. Acesso em: 7 nov. 2023.

BENNETT, G. L. Space Nuclear Power. **Encyclopedia of Physical Science and Technology**, v. 15, p. 537-553, 2002.

BENNETT, G. L. Space nuclear power: opening the final frontier. **American Institute of Aeronautics and Astronautics**, 4th International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC), San Diego, 2006.

CLARK, D. L. *et al.* **Plutonium**. In: The Chemistry of the Actinide and Transactinide Elements, edited by MORSS, L. R; EDELSTEIN, N. M; FUGER, J. Springer, 2006, 3ªed, v.1, p. (813- 1264). ISBN: 10 1-4020-3598-5.

DUDERSTADT, J. J; HAMILTON, L. J. **Nuclear reactor analysis**. John Wiley and Sons Inc, 1976. ISBN: 0-471- 22363-8.

GRAY, L. W. From separations to reconstitution-A short history of plutonium in the US and Russia. **Lawrence Livermore National Laboratory**, Livermore, 1999.

HOWE, S. D. *et al.* Economical production of Pu-238. **Proceedings of Nuclear and Emerging Technologies for Space**, Albuquerque, 2013.

LANIUS, R. D. Powering Space Exploration: U.S. Space Nuclear Power, Public Perceptions, and Outer Planetary Probes. **American Institute of Aeronautics and Astronautics**, 6th International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC), Cleveland, 2008.

Mars Curiosity Rover, Spacecraft: Power. **NASA Science**. Disponível em: <https://mars.nasa.gov/msl/spacecraft/rover/power/>. Acesso em: 7 nov. 2023.

MIKHALEV, A. V; CHERNOV, D. O; KOROBEINIKOV, V. V. Use of Am-241 in RTGs. **Journal of Physics: Conference Series**. v. 1689. n. 1. IOP Publishing, 2020. Doi:10.1088/1742- 6596/1689/1/012063.

Periodic Table of Elements. **National Library of Medicine – Nacional Center for Biotechnology Information**. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/periodic-table/>. Acesso em: 7 nov. 2023.

Power and Thermal Systems: Power Systems. **NASA**. Disponível em: <https://rps.nasa.gov/power-and-thermal-systems/power-systems/>. Acesso em: 7 nov. 2023.

Power and Thermal Systems: Thermal Systems. **NASA**. Disponível em: <https://rps.nasa.gov/power-and-thermal-systems/thermal-systems/general-purpose-heat-source/>. Acesso em: 7 nov. 2023.

Radioisotope Power Systems Committee. Radioisotope power systems: an imperative for maintaining US leadership in space exploration. **National Academic Press**, 2009.

RANKIN, D. T. *et al.* Production of Pu-238 oxide fuel for space exploration. **Westinghouse Savannah River Company Savannah River Site**, 2000.

WELCH, R; LIMONADI, D; MANNING, R. Systems engineering the curiosity rover: A retrospective. **8th international conference on system of systems engineering (IEEE)**, Maui, 2013.

Recebido: 15 de janeiro de 2024.

Aprovado: 19 de agosto de 2024.

DOI:

Como citar: SANTOS, A P R; GUIMARÃES, L N F, Cálculo da potência térmica de decaimento alfa para os radioisótopos Pu238 e Am241 com aplicação em geradores termoelétricos de radioisótopos, **Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada**, Ponta Grossa, v. 11, n. 1, p. 1-18, jun. 2024.

Contato: Ana Paula Rodrigues dos Santos: apaula0017@gmail.com

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

