

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares

Krosli Ferreira de Andrade

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE BATERIAS NUCLEARES ESPACIAIS
UTILIZANDO DIFERENTES RADIOISÓTOPOS**

Belo Horizonte
2022

Krosli Ferreira de Andrade

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE BATERIAS NUCLEARES ESPACIAIS
UTILIZANDO DIFERENTES RADIOISÓTOPOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares, do Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares. Área de Concentração: Engenharia Nuclear e de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Velasquez Cabrera

Coorientadora: Profa. Dra. Claubia Pereira Bezerra Lima

Belo Horizonte
2022

A553a

Andrade, Krosli Ferreira de.

Análise energética de baterias nucleares espaciais utilizando diferentes radioisótopos [recurso eletrônico] / Krosli Ferreira de Andrade.. – 2022.
1 recurso online (76 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Carlos Eduardo Velasquez Cabrera.

Coorientadora: Cláudia Pereira Bezerra Lima.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f.53-76.

Bibliografia: f. 51-52.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia nuclear - Teses. 2. Análise energética - Teses.
3. Baterias nucleares - Teses. 4. Radioisótopos - Teses. I. Cabrera, Carlos Eduardo Velasquez. II. Lima, Cláudia Pereira Bezerra. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.039(043)




FOLHA DE APROVAÇÃO

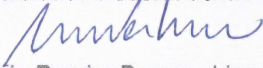
ANÁLISE ENERGÉTICA DE BATERIAS NUCLEARES ESPACIAIS UTILIZANDO DIFERENTES RADIOISÓTOPOS

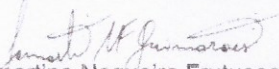
KROSLI FERREIRA DE ANDRADE

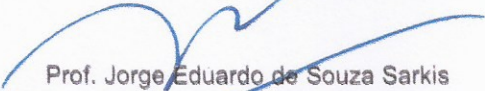
Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, como requisito para obtenção do grau de Mestre em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, área de concentração ENGENHARIA NUCLEAR E DA ENERGIA.

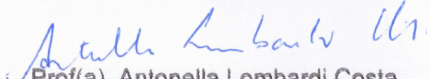
Aprovada em 16 de dezembro de 2022, pela banca constituída pelos membros:

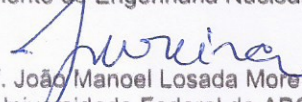

Prof. Carlos Eduardo Velásquez Cabrera - Orientador
Universidade Federal de Minas Gerais


Prof(a). Claúbia Pereira Bezerra Lima - Coorientadora
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG


Prof. Lamartine Nogueira Frutuoso Guimarães
PG-CTE/ITA, CAP/INPE e UNIP-SJC


Prof. Jorge Eduardo de Souza Sarkis
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares


Prof(a). Antonella Lombardi Costa
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG


Prof. João Manoel Losada Moreira
Universidade Federal do ABC

Belo Horizonte, 16 de dezembro de 2022.

AGRADECIMENTOS

Houve muitas dificuldades no período de Pandemia, como exemplo de algumas disciplinas que foram realizadas de forma virtual, dificuldades tanto a minha como aluno, tanto a dos professores pois foi uma experiência nova e muito difícil para todos. Limitação no acesso ao DEN, que reduziu a sinergia com os colegas, a utilização do programa ORIGEN-S, onde dificultou o andamento da dissertação e solução dos problemas. Existiram também dificuldades nas questões emocionais em função do isolamento, do risco de perder emprego, já que não tenho bolsa, e nas incertezas que prejudicaram o rendimento da pesquisa e dos estudos. Mas foram momentos de muito aprendizado, de grandes descobertas, foi disruptivo porque a minha área de atuação da graduação foi engenharia de Telecomunicações. Um Agradecimento muito especial ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Eduardo Velasquez pelas dicas, diversas reuniões, sugestões, fontes de pesquisa, infinitas revisões e horas de dedicação, e à minha co-orientadora Prof.^a. Dr.^a. Cláudia Pereira pelas revisões e pelo grande apoio.

Agradeço também aos demais professores e colegas do Departamento de Engenharia Nuclear pelos conhecimentos passados e pelos momentos de apoio e descontração.

Um Agradecimento mais que especial ao apoio, estímulo e motivação das minhas queridas: Aparecida Gomes (Mãe), Aparecida de Fátima (Esposa), Stephanie (Filha), Clélia (Irmã) e à toda minha família e amigos.

RESUMO

Ao lado do desenvolvimento industrial, a energia elétrica passou a fazer parte do cotidiano das atividades antropogênicas assim como passou a alimentar grandes sonhos e desafios, como a exploração espacial. Foi neste contexto de grandes desafios, que surgiu a necessidade de utilização de baterias nucleares, mais especificamente do tipo GTR (Gerador Termoelétrico Radioisotópico). Suas características tais como longa duração, a não necessidade de recarga (ou substituição), e fornecimento de potência linear, ao contrário das baterias de lítio, são essenciais na exploração espacial. As Baterias GTR basicamente possuem dois módulos: um módulo contendo a fonte térmica que é um material radioativo e outro módulo que executa a conversão do calor em energia elétrica através do efeito Seebeck. O objetivo deste trabalho é projetar de forma teórica, uma bateria GTR utilizando radioisótopos com decaimento alfa e beta, com características similares as da melhor bateria GTR fabricada até o momento, a MMGTR, que com eficiência na conversão térmica/elétrica de 6,25% , pode fornecer 2000 W de potência térmica e 125 W de potência elétrica ao final da vida útil de aproximadamente 14 anos. Foram estudados diferentes radioisótopos a partir do decaimento alfa: ^{232}U , ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{243}Cm e ^{244}Cm com meia-vida entre 13 e 432 anos, alta energia de decaimento entre 5.414 e 6.168 keV e densidade energética entre 2,18 e $2,37 \times 10^9$ J/g e para o decaimento beta, os radioisótopos estudados foram os ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{137}Cs , ^{147}Pm e ^{210}Pb com meia-vida entre 1 e 30 anos, e densidade energética entre $1,14 \times 10^7$ e $2,37 \times 10^9$ J/g. Como resultado, foram obtidas as massas necessárias para suprir a demanda de potência térmica e elétrica de cada radioisótopos, quantidade de módulos Seebeck necessários para a geração de energia elétrica, a potência térmica e elétrica com valores inicial e final e os custos envolvidos. Os resultados mostram que os projetos de baterias nucleares com decaimento beta têm maior viabilidade técnico-econômica para o ^{90}Sr , na composição de óxido SrTiO_3 , devido aos menores custos apresentados. Por outro lado, para o decaimento alfa a alternativa mais viável do ponto de vista técnico-econômico é a utilização de radioisótopos como o ^{243}Cm e ^{244}Cm .

Palavras-chave: Baterias nucleares GTR; exploração espacial; efeito Seebeck; decaimento alfa e beta.

ABSTRACT

Alongside industrial development, electrical energy became part of everyday anthropogenic activities as well as fueling big dreams and challenges, such as space exploration. It was in this context of great challenges that the need to use energy batteries arose, more specifically of the RTG (Radioisotopic Thermoelectric Generator) type. Its features, such as long life, no need to recharge (or replace), and linear power delivery, unlike those of lithium batteries, are essential in space exploration. The GTR Batteries basically have two modules: a module containing the thermal source, which is a radioactive material, and another module that performs the conversion of heat into electrical energy through the Seebeck effect. The objective of this work is to theoretically design a RTG battery using radioisotopes with alpha and beta decay with characteristics similar to those of the best RTG battery manufactured so far, the MMRTG, which has a thermal/electrical conversion efficiency of 6.25% and can provide 2000 W of thermal power and 125 W of electrical power at the end of its useful life of approximately 14 years. Different radioisotopes from alpha decay were studied, including ^{232}U , ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{243}Cm and ^{244}Cm with half-lives ranging from 13 to 432 years, a high decay energy ranging from 5.414 to 6.168 keV, and an energy stored ranging from 2, 18 to $2, 37 \times 10^9 \text{J/g}$. For beta decay, radioisotopes studied included ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{137}Cs , ^{147}Pm and ^{210}Pb with half-lives ranging from 1 to 30 years, and an energy stored ranging from 1.14 to $2.37 \times 10^9 \text{J/g}$. As a result, the masses required to supply each radioisotope's thermal and electrical power demand, the number of Seebeck modules required for electrical energy generation, the thermal and electrical power with initial and final values, and the costs involved were determined. The results show that nuclear battery projects with beta decay are more technically and economically viable for ^{90}Sr in the SrTiO_3 oxide format due to the lower costs presented. On the other hand, for alpha decay, the most viable alternative from a technical and economic point of view is the use of radioisotopes such as ^{243}Cm and ^{244}Cm .

Keywords: RTG nuclear batteries; space exploration; Seebeck effect; alpha and beta decay.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Marca-passo (esq.) e uma bateria nuclear GTR (dir.)	20
Figura 2 – 1000 Baterias nucleares GTR usadas para fornecer energia para faróis e balizas de navegação	21
Figura 3 – Variação da energia solar ao afastar do astro	22
Figura 4 – Módulo RHU de ^{238}Pu pesa somente 40g, com 3,2 cm de comprimento e 2,6 cm de diâmetro e produz 1 W térmico	23
Figura 5 – Secções de um Gerador Termoelétrico Radioisótopo Multi-Missão MMGTR	24
Figura 6 – Centro Espacial Kennedy da NASA onde os técnicos preparam a espaçonave New Horizons, a parte escura é uma bateria MMGTR	24
Figura 7 – Efeito Seebeck – Descrição Geral	25
Figura 8 – Par termoelétrico	26
Figura 9 – Potência térmica emitida por 603,17 g de ^{238}Pu ao longo de 100 anos .	30
Figura 10 – Módulo Seebeck escolhido	31
Figura 11 – Configuração dos módulos Termopares - $NT = NS \times NP$	31
Figura 12 – Módulos Seebeck em formatos: a) retangular, b) hexagonal, c) octogonal e d) decagonal	34
Figura 13 – Variação da potência térmica dos radioisótopos com decaimento alfa ao longo dos 14 anos	42
Figura 14 – Variação da potência térmica para os radioisótopos ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{137}Cs e ^{210}Pb , todos com decaimento beta ao longo dos 14 anos	43
Figura 15 – Variação da potência térmica para o radioisótopo ^{147}Pm que possui decaimento beta, ao longo dos 14 anos	43
Figura 16 – Variação da potência térmica para o radioisótopo ^{106}Ru que possui decaimento beta, ao longo dos 14 anos	44
Figura 17 – Variação da potência elétrica para os radioisótopos que possuem decaimento alfa	45
Figura 18 – Variação da potência elétrica para alguns radioisótopos que possuem decaimento beta	46
Figura 19 – Variação da potência elétrica para o radioisótopo ^{147}Pm que possui decaimento beta	46
Figura 20 – Variação da potência elétrica para o radioisótopo ^{106}Ru que possui decaimento beta	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo de energia armazenada entre materiais utilizados em baterias químicas e nucleares.	18
Tabela 2 – Informação de alguns marca-passos clínicos.	20
Tabela 3 – Valores de design de parâmetros básicos do GTR.	23
Tabela 4 – Propriedades dos radioisótopos para baterias nucleares utilizados no trabalho.	29
Tabela 5 – Características do módulo.	31
Tabela 6 – Especificações na montagem da estrutura Seebeck com 16 módulos . .	33
Tabela 7 – Especificações das estruturas Seebeck e cilíndricas.	35
Tabela 8 – Especificações das estruturas Seebeck e cilíndricas.	36
Tabela 9 – Constante de decaimento.	36
Tabela 10 – Valores de energia térmica no início e fim do processo.	37
Tabela 11 – Massa Molar dos radioisótopos envolvidos.	37
Tabela 12 – Porcentagens dos elementos nos compostos no decaimento alfa.	38
Tabela 13 – Porcentagens dos elementos nos compostos no decaimento beta.	38
Tabela 14 – Massas totais dos compostos e seus componentes.	38
Tabela 15 – Volume ocupado pelos compostos, as estruturas escolhidas, seus formatos e quantidade de módulos Seebeck.	39
Tabela 16 – Valores calculados no início do processo (ano 0)	40
Tabela 17 – Valores calculados no final do processo (ano 14).	40
Tabela 18 – Informações dos módulos Seebeck e variações de potência elétrica e térmica.	45
Tabela 19 – Valores no custo de produção para cada radioisótopo.	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASRG	<i>Advanced Stirling Radioisotope Generator</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
GTR	Gerador Termoelétrico Radioisotópico
MMGTR	Gerador Termoelétrico de Radioisotópico Multimissão
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
RTG	<i>Radioisotope Thermoelectric Generator</i>
RHU	<i>Radioisotope Heater Unit</i>
SNAP	<i>Systems for Nuclear Auxiliary Power</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

ce	Captura eletrônica
eV	elétron-Volt
fis	Fissão
i_0	Corrente elétrica inicial
i_f	Corrente elétrica final
I	Corrente elétrica no circuito
K	Kelvin
kg	Quilograma
m	Metro
m^3	Metro cúbico
NP	Número de módulos Seebeck em paralelo
NS	Número de módulos Seebeck em série
NT	Número total de módulos Seebeck
PE	Potência elétrica
P_0	Potência elétrica inicial
P_f	Potência elétrica final
Q_0	Energia térmica inicial
Q_c	Fonte de temperatura fria
Q_f	Energia térmica final
Q_h	Fonte de energia térmica, calor
R_c	Resistência elétrica interna do módulo Seebeck
R_{eq}	Resistência equivalente inicial
R_{eqf}	Resistência equivalente final
RL	Resistência elétrica na carga

S	Coeficiente Seebeck médio em $V/^\circ\text{C}$
T_c	Temperatura na parte fria do sistema
T_h	Temperatura na parte quente do sistema
V	Tensão elétrica de saída do módulo gerador
V_i	Tensão elétrica inicial
V_f	Tensão elétrica final
ΔT	Gradiente de temperatura
$^\circ\text{C}$	Graus Celsius
W_{th}	Watt térmico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	MARCO TEÓRICO	18
3	METODOLOGIA	25
3.1	Descrição geral do sistema	25
3.2	Decaimento Radioativo como fonte de calor	28
3.3	Dimensionamento de um sistema completo de uma bateria	30
3.3.1	Determinação da quantidade de módulos	30
3.3.2	Dimensionamento das estruturas Seebeck	33
3.3.3	Determinação das massas e volumes dos radioisótopos	35
3.4	Considerações e aproximações realizadas	40
4	RESULTADOS	42
5	CONCLUSÕES DE DISCUSSÃO	49
	REFERÊNCIAS	51
	APÊNDICE A – RADIOISÓTOPOS COM DECAIMENTO	
	ALFA	53
	APÊNDICE B – RADIOISÓTOPOS COM DECAIMENTO	
	BETA	64
	APÊNDICE C – CICLO DE PRODUÇÃO DE ^{238}Pu	76

1 INTRODUÇÃO

Para projetos que envolvam satélites e exploração espacial profunda, o uso de baterias eletrônicas convencionais, tais como baterias de lítio, podem ser inviáveis devido a necessidade de recarga e inviabilidade na utilização de painéis fotovoltaicos para sua recarga. Isso se deve ao fato que a intensidade luminosa se reduz à medida que o satélite se afasta do Sol. Por exemplo, no Planeta Marte, a intensidade luminosa equivale a 50% em relação ao planeta Terra, enquanto Plutão recebe somente 0,3% desta intensidade luminosa. Além disso, é necessário considerar que existem pontos sem iluminação em nosso sistema solar, como o lado escuro da lua e a atmosfera opaca de Vênus. Neste tipo de lugares as baterias nucleares poderiam ser úteis para gerar energia elétrica por longos períodos de tempo (MAIDANA, 2014).

A evolução da tecnologia de energia nuclear para fins pacíficos após a segunda guerra mundial e o começo da guerra fria entre Estados Unidos e a URSS, acabou gerando uma concorrência pelo domínio de tecnologias aeroespaciais associada à exploração espacial. Dentro deste contexto, foi iniciada a utilização de baterias nucleares como fonte de energia primária. Estas baterias utilizam o decaimento radioativo de um radioisótopo como fonte de calor e o princípio de conversão de calor em energia elétrica através de um termopar. Devido à longa meia-vida dos radioisótopos, a geração de calor pode ser usada por longos períodos sem necessidade de trocar a fonte de calor ou realizar recargas, tornando assim as baterias nucleares uma fonte de energia viável para longos prazos de exploração espacial. Atualmente existem diferentes tipos de baterias nucleares tais como: termoelétricas, termo fotoelétricas, coleta direta de carga, termiônicas, cintilação intermediária, alfa voltaicas e beta voltaicas. Esses tipos de baterias estão divididos da seguinte forma (PRELAS *et al.*, 2016):

1. Radiação ionizante para produção de calor (por exemplo, termoelétrica, termo fotoelétrica e termiônica);
2. Produção de íons e estados excitados (por exemplo, alfa voltaico, beta voltaico e cintilação intermediário);
3. Conversão de energia cinética em energia potencial contida em campos eletrostáticos (por exemplo, coleta direta de carga).

Considerando a utilização de baterias nucleares para usos espaciais, a bateria com maior eficiência energética para este tipo de aplicações é a termoelétrica – descrita no item 1, que será alvo de estudo neste trabalho. Este tipo de bateria é classificada como GTR (Gerador Termoelétrico Radioisotópico), onde o calor de decaimento alfa ou β^- de um material radioativo é transformado em eletricidade através de um gradiente de

temperatura no termopar utilizando o efeito Seebeck (MAIDANA, 2014; PRELAS *et al.*, 2016; RAGHEB, 2021; THERMOELECTRIC, 2020).

Os principais requerimentos para a escolha dos radioisótopos como fonte de calor é que tenham uma densidade energética acima de 10^7 J/g e uma longa meia-vida (relativa ao tempo de vida requerido). Entre outros aspectos é importante considerar também a quantidade de material radioativo utilizado, a viabilidade de produção do radioisótopo em termos de custo por grama e a configuração série-paralela da matriz de módulos Seebeck.

A fonte de energia para este tipo de bateria é o decaimento radioativo alfa ou β^- , e é possível calcular a potência emitida ao longo de sua meia-vida. Os radioisótopos com essas características podem ser produzidos em reatores nucleares ou em aceleradores de partículas (MAIDANA, 2014; PRELAS *et al.*, 2016; RAGHEB, 2021).

O radioisótopo mais utilizado em baterias nucleares GTR é o ^{238}Pu , que possui decaimento alfa, meia-vida de 87,74 anos, uma alta densidade energética de $2,19 \times 10^9$ J/g e um custo de produção de US\$1.968/g (MAIDANA, 2014; WERNER *et al.*, 2016). No entanto, existem outros radioisótopos que podem ser utilizados usando o mesmo processo de decaimento alfa ou também podem ser projetados a partir do decaimento β^- .

O objetivo deste trabalho é estudar a possibilidade de geração de energia usando diferentes radioisótopos como alternativas ao plutônio (^{238}Pu), será utilizado como bateria salvaguarda. Dentro deste contexto, será avaliada a viabilidade técnica e econômica da utilização de radioisótopos alternativos que atendam aos requisitos mínimos das baterias nucleares. Como referência para o trabalho, foi escolhido o sistema GTR mais avançado, que é o Gerador Termoelétrico de Radioisotópico Multimissão (MMGTR). A bateria MMGTR possui uma massa total de 45 kg, para utilização do ^{238}Pu sendo 4,8 kg de $^{238}\text{PuO}_2$. Toda a bateria MMRTG tem dimensões cilíndricas com um diâmetro de 0,63 m e uma profundidade de 0,66 m. A diferença entre os 45kg totais e os 4,8 kg do ^{238}Pu , é formada pela estrutura de suporte como os circuitos elétricos, dissipadores de alumínio e conectores (PRELAS *et al.*, 2016; WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2021; HAMMEL *et al.*, 2016; WERNER *et al.*, 2017).

Portanto, baseados nos dados descritos acima, os requisitos mínimos para o projeto de baterias nucleares deste trabalho serão baseados na potência térmica (2 kW_{th}), potência elétrica (125 W), eficiência de conversão de 6,25% e vida útil de 14 anos. Para o formato da bateria, além da referência, se avaliará o desempenho de outros formatos. Nos projetos realizados pelas agências espaciais NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e ESA (*European Space Agency*), o formato escolhido para os radioisótopos como fonte de calor é o formato cilíndrico, pois neste formato se consegue uma distribuição de calor uniforme e em todas as direções e desta forma, uma maior transferência de calor para os módulos Seebeck. O formato ideal da estrutura com módulos Seebeck deveria ser em formato cilíndrico, para que tenha um encaixe perfeito com a estrutura cilíndrica do

radioisótopo, mas como não existem placas Seebeck para criar uma estrutura com este formato, foram escolhidas placas Seebeck planas. Portanto a estrutura formada, terá como opções os formatos: retangular, hexagonal, octogonal e decagonal, o mais próximo possível do formato cilíndrico, que será o formato do composto utilizando o radioisótopo. O formato foi escolhido em função da otimização geométrica dos módulos Seebeck ao redor da fonte cilíndrica. A forma geométrica varia em função da massa necessária a ser usada para obter os requisitos mínimos segundo o radioisótopo utilizado. Estes cálculos foram realizados usando a ferramenta de programação do MATLAB.

As opções de radioisótopos com decaimento alfa que cumprem com os requisitos mínimos para o projeto de baterias nucleares são (PRELAS *et al.*, 2016; WERNER *et al.*, 2016; ZOU *et al.*, 2020):

- ^{232}U com meia-vida de 68,9 anos, energia de decaimento de 5.414 keV e densidade energética de $2,18 \times 10^9$ J/g;
- ^{241}Am com meia-vida de 432,2 anos, energia de decaimento de 5.638 keV e densidade energética em cerca de $2,18 \times 10^9$ J/g
- ^{243}Cm com meia-vida de 29,1 anos, energia de decaimento de 6.168 keV e densidade energética de cerca de $2,37 \times 10^9$ J/g
- ^{244}Cm com meia-vida de 18,1 anos, energia de decaimento de 5.902 KeV e densidade energética em cerca de $2,26 \times 10^9$ J/g

Por outro lado, para o decaimento β^- , foram escolhidos os seguintes radioisótopos, por possuírem características que cumprem com os requisitos mínimos para geração de energia nos MMGTR são (PRELAS *et al.*, 2016; HAMMEL *et al.*, 2016; WERNER *et al.*, 2017; MANGENG; THAYER, 1984; ROHRMANN, 1963):

- ^{60}Co com meia-vida de 5,2713 anos, energia de decaimento de 318 keV e densidade energética de $1,46 \times 10^9$ J/g;
- ^{90}Sr com meia-vida de 28,77 anos, energia de decaimento de 546 keV e densidade energética de $9,77 \times 10^8$ J/g
- ^{106}Ru com meia-vida de 1,0234 anos, energia de decaimento de 39 keV e densidade energética de $1,14 \times 10^7$ J/g
- ^{137}Cs com meia-vida de 30,1 anos, energia de decaimento de 514 keV e densidade energética de $2,67 \times 10^8$ J/g
- ^{147}Pm com meia-vida em 2,624 anos, energia de decaimento de 225 keV e densidade energética de $4,76 \times 10^7$ J/g,

- ^{210}Pb com meia-vida de 22,29 anos, energia de decaimento de 16 keV e densidade energética de $2,37 \times 10^9$ J/g

Para estudar a viabilidade técnica e econômica, os principais parâmetros a serem analisados consideram os formatos cerâmicos ou metálicos dos compostos na forma: ^{60}Co , ^{106}Ru , ^{210}Pb , óxidos $^{232}\text{UO}_2$, $^{241}\text{AmO}_2$, $^{243}\text{CmO}_2$, $^{244}\text{CmO}_2$, $^{90}\text{SrTiO}_3$ e $^{147}\text{Pm}_2\text{O}_3$ e cloreto $^{137}\text{CsCl}$. Dessa forma, este trabalho focará na viabilidade técnica e econômica de radioisótopos que possam atender aos principais requisitos mínimos para a construção da bateria.

O programa MATLAB será usado para calcular a massa, potência térmica e potência elétrica produzida pelos radioisótopos durante os 14 anos de vida útil. Para o cálculo no tempo $t = 0$ e no $t = 14$ anos foi utilizada a teoria de decaimento radioativo para decaimento alfa e beta, onde o núcleo pai é o radioisótopo utilizado. No entanto, para o decaimento alfa será utilizado o código de depleção ORIGEN-S (GAULD *et al.*, 2011), utilizado para verificar os cálculos de decaimento alfa e se há contribuição dos núcleos filhos.

Quanto aos cálculos de custo, é importante destacar que neste estudo não são considerados os custos utilizados nas técnicas de reciclagem e reprocessamento para obtenção dos radioisótopos e sim o preço aproximado por grama de material, segundo valores de produção internacionais.

Neste capítulo 1 foi apresentada uma visão geral dos conceitos, métodos e objetivos do trabalho. No capítulo 2 – Marco Teórico, será mostrado a evolução e capacidade das baterias desde as antigas baterias até as atuais químicas e nucleares, o efeito Seebeck, a utilização geral das baterias nucleares, incluindo o uso espacial com as baterias GTR e MMGTR. No capítulo 3 – Metodologia, será apresentada a descrição geral do sistema, a utilização do MATLAB, a descrição detalhada do efeito Seebeck e quantidade de módulos, o decaimento radioativo como fonte de calor, enfim um sistema completo com todos os radioisótopos. No capítulo 4 – Resultados, serão apresentados os resultados através do programa MATLAB, confrontando com o programa ORIGEN-S, serão apresentados os gráficos e tabelas, as quantidades de módulos Seebeck, as potências elétricas e térmicas geradas no início e término do processo para cada radioisótopo e os custos envolvidos. No capítulo 5 – Conclusões de Discussão, será mostrada a escolha do radioisótopo mais adequado adotando como premissa os menores custos na produção do radioisótopo e as menores dimensões das baterias.

2 MARCO TEÓRICO

A primeira bateria química foi criada pelo Italiano Alessandro Volta em 1800. A bateria de Volta consistia em discos alternados de zinco e prata (ou cobre e estanho) separados por papel ou tecido embebido em água salgada ou hidróxido de sódio. Por outro lado, o conceito de bateria nuclear começou com Henry Moseley em 1913, demonstrando o conceito de geração de corrente através de partículas carregadas. No entanto, o auge do desenvolvimento desta tecnologia nuclear para fins pacíficos só foi conseguido após a segunda guerra mundial e a corrida espacial entre as nações, onde surgiu a necessidade de baterias de longa duração para produzir energia elétrica de forma duradoura e confiável. A [Tabela 1](#) mostra uma comparação da capacidade de armazenamento de baterias químicas e nucleares. É possível perceber que as baterias nucleares têm maior disponibilidade de densidade energética que as baterias químicas, o que viabiliza sua utilização para longos períodos de tempo.

Tabela 1 – Comparativo de energia armazenada entre materiais utilizados em baterias químicas e nucleares.

Meio de armazenamento	Densidade energética (J/g)	Tipo de Bateria
metal alcalino	422,6	Química
carbono-zinco	130,7	Química
Ni-Cd	118,8	Química
NiMH	288	Química
Li-ion	460	Química
^{232}U	$2,18 \times 10^9$	Nuclear
^{238}Pu	$2,19 \times 10^9$	Nuclear
^{241}Am	$2,18 \times 10^9$	Nuclear
^{243}Cm	$2,37 \times 10^9$	Nuclear
^{244}Cm	$2,26 \times 10^9$	Nuclear
^{60}Co	$1,46 \times 10^9$	Nuclear
^{90}Sr	$9,77 \times 10^8$	Nuclear
^{106}Ru	$1,14 \times 10^7$	Nuclear
^{137}Cs	$2,67 \times 10^8$	Nuclear
^{147}Pm	$4,76 \times 10^7$	Nuclear
^{210}Pb	$2,37 \times 10^9$	Nuclear

Fonte: [Prelas et al. \(2016\)](#).

Os cálculos da energia J/g, que estão na referência [Prelas et al. \(2016\)](#), podem ser demonstrados como exemplo para o ^{238}Pu :

$$\text{Energia de decaimento} = 5,593 \text{ MeV/átomo e } 1\text{eV} = 1,6 \times 10^{-19}\text{J},$$

$$238,0495534 \text{ gramas} \text{ — } 6,022 \times 10^{23} \text{ núcleos}$$

$$1 \text{ grama} \text{ — } N$$

$$N = \frac{1 \times 6,022 \times 10^{23}}{238,0495534} = 2,529725 \times 10^{21} \text{ átomo/grama.} \quad (1)$$

Então,

$$5,593 \times 10^6 \times 1,6 \times 10^{-19} = 8,9488 \times 10^{-13} \text{ J/átomo,} \quad (2)$$

$$8,9488 \times 10^{-13} \times 2,529725 \times 10^{21} = 2,264 \times 10^9 \text{ J/g,} \quad (3)$$

bem próximo do valor da referência (PRELAS *et al.*, 2016).

O mecanismo para viabilizar a conversão de energia térmica em energia elétrica é através do efeito Seebeck, descoberto pelo cientista Alemão Thomas Johann Seebeck em 1821 (PRELAS *et al.*, 2016). Consiste em um circuito elétrico fechado, construído com a junção de dois condutores termopares (materiais diferentes), onde uma parte deste material entra em contato com a fonte de calor e outra parte entra em contato com uma superfície fria, gerando um gradiente térmico. Com este gradiente térmico é possível criar uma variação de corrente e tensão elétrica, gerando potência elétrica¹.

A fonte de calor tem como origem os decaimentos α ou β^- conforme pode ser descrito nos conceitos abaixo:

Decaimento α



Decaimento β^-



Onde:

- $\alpha = 2p + 2n$
- $\beta^- = e$
- $\bar{\nu}_e =$ antineutrino eletrônico

Os primeiros geradores termoelétricos que utilizaram conversão de energia térmica para energia elétrica foram desenvolvidos em 1961 para aplicações espaciais nos EUA, também chamados de *Systems for Nuclear Auxiliary Power* (SNAP) (MAIDANA, 2014; PRELAS *et al.*, 2016; GUSEV *et al.*, 2011). Logo foram desenvolvidas aplicações na medicina, como a utilização no marca-passos *McDonnell Douglas (BetaCel 400)* e ARCO. A

¹ Nos cálculos realizados pela densidade de energia J/g para o radioisótopo exemplo, o ²³⁸Pu, o valor calculado $2,264 \times 10^9$ J/g e a referência $2,19 \times 10^9$ J/g diferem pois a referência não utilizou o mesmo valor de energia de decaimento de 5,593 MeV/átomo, que a própria referência apresentou. Para manter a coerência, utilizamos os valores da tabela.

Figura 1 mostra um marca-passos e sua respectiva bateria nuclear produzida e utilizada desde 1966 usando o radioisótopo de ^{238}Pu , segundo a referência ainda estavam em funcionamento noventa destas baterias, no peito dos pacientes, até 2004. A Tabela 2 apresenta alguns modelos de marca-passos e algumas características como nome do fabricante, país de fabricação, tipo e quantidade de radioisótopo utilizado, quantidade de pacientes com a inserção do marca-passos e o tipo da bateria nuclear.



Figura 1 – Marca-passos (esq.) e uma bateria nuclear GTR (dir.). Fonte: Zoui *et al.* (2020).

Tabela 2 – Informação de alguns marca-passos clínicos.

Nome do Fabricante	País de Fabricação	Combustível	Massa (g)	Quantidade de casos clínicos	Comentários
ARCO	EUA	Óxido ^{238}Pu	0,41	42	Termoelétrica
AtomCell (nuclear battery corp)	EUA	Óxido ^{238}Pu	0,12	Testes animais	Termoelétrica
Atomic energy research establishment	Reino Unido	Óxido ^{238}Pu	0,18	80	Termoelétrica
McDonnell Douglas (BetaCel 400)	EUA	Óxido ^{147}Pm	0,105	60	Betavoltaica
Gulf energy and env. Sys.	EUA	Óxido ^{238}Pu	0,18	Testes animais	Termoelétrica
CIT Alcatel	França	$^{238}\text{Pu}/\text{Sc}$ Alloy	0,16	400	Termoelétrica (1º marca-passos)
Siemens AG	Alemanha Ocidental	Óxido ^{238}Pu	0,2	–	Termoelétrica
Syncal	EUA	Óxido ^{238}Pu	–	–	Termoelétrica

Fonte: Prellas *et al.* (2016).

Por outro lado, as baterias nucleares também podem ser encontradas em dispositivos ou equipamentos eletrônicos onde se faz necessário trabalhar de forma isolada ou em áreas de difícil acesso, quando a chance de trocar as fontes de geração de energia térmica são nulas. Como exemplo, a Figura 2 mostra uma construção Soviética de alimentação elétrica de uma baliza de navegação, que é semelhante a um farol, que utiliza uma bateria nuclear que funcionou entre 1960 e 1980 sem nenhuma manutenção.



Figura 2 – 1000 Baterias nucleares GTR usadas para fornecer energia para faróis e balizas de navegação. Fonte: [Zoui *et al.* \(2020\)](#).

As baterias nucleares foram utilizadas em satélites para a exploração espacial profunda onde não é possível a utilização de baterias químicas devido à falta de acesso para a troca destas e/ou a pouca disponibilidade de intensidade luminosa em planetas distantes do Sol onde o uso de painéis solares é parcialmente inviável ([PRELAS *et al.*, 2016](#)). A intensidade luminosa solar diminui em função do afastamento do satélite do Sol, como é mostrado na [Figura 3](#) que tem relação inversa com $4\pi d^2$, onde d é a distância do Sol. O planeta Terra é considerado como sistema de referência, ou seja a intensidade luminosa é 100%, e a intensidade luminosa decresce em função da distância da terra. Por exemplo, para Marte, essa intensidade luminosa cai para 43,1%; no caso de Júpiter é de aproximadamente 4%, Saturno 1,1%, Urano 0,3% e Netuno 0,1% desta intensidade ([MAIDANA, 2014](#)).

Na prática, a utilização de baterias nucleares através de módulos GTR (Gerador Termoelétrico Radioisotópico) na exploração de outros planetas, foram utilizadas primeiramente através das sondas Pioneer-10 e 11 em 1972 e 1973, respectivamente. Os módulos GTR também foram utilizados nas Sondas Voyager 1 e 2 onde o radioisótopo utilizado como fonte principal de energia foi o ^{238}Pu , foram colocadas em funcionamento em 1977 e atualmente encontram-se fora do sistema solar e ainda em funcionamento. A Voyager 1 está a 23,5 bilhões de km do Sol e a Voyager 2 a 19,6 bilhões de km ([NASA, 2020](#); [PRELAS *et al.*, 2016](#)).

Este tipo de bateria também é essencial na exploração de planetas, modelo similar como o modelo GPRS, foi utilizado no robô Curiosity que aterrissou em Marte em 05/08/2012 e o Perseverance, que aterrissou em Marte em 18/02/2021, com uma bateria nuclear que pode mantê-lo em funcionamento por no mínimo 14 anos.

Nas utilizações espaciais, quando o Foguete tenta abandonar a atmosfera terrestre tem-se uma grande vibração devido ao esforço para vencer a gravidade e portanto está mais

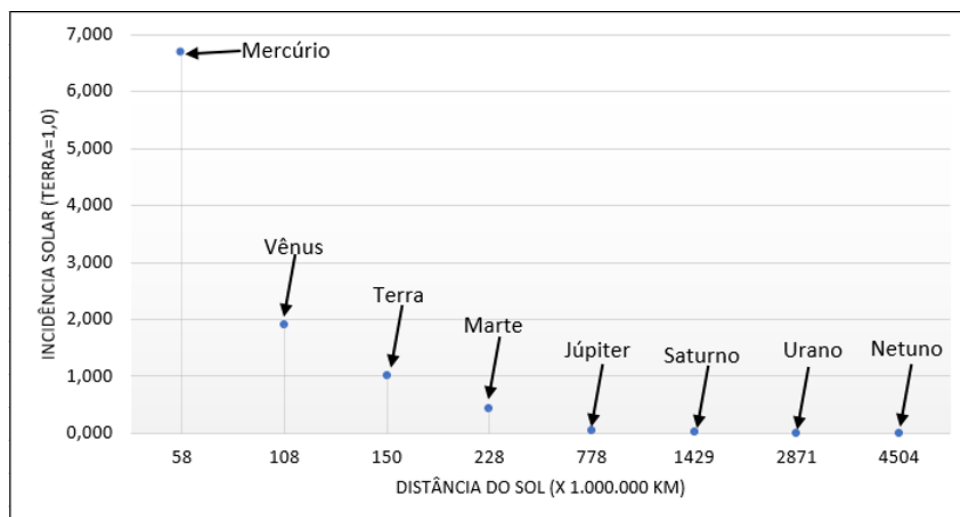


Figura 3 – Variação da energia solar ao afastar do astro. 1 AU equivale a distância do Sol à Terra. Fonte: Maidana (2014).

predispósito a sofrer acidentes que produzem a sua queda. Sendo assim, a bateria nuclear contém um módulo chamado RHU (*Radioisotope Heater Unit*) que contém a fonte de calor ou em outras palavras o radioisótopo com decaimento alfa ou β^- . A função principal deste módulo é proteger o radioisótopo de choques físicos, principalmente nos casos do uso em satélites onde é lançado através de foguetes. Este módulo funciona como proteção do radioisótopo na queda para evitar a dispersão de material radioativo (WERNER *et al.*, 2017). Como exemplo, pode ser destacado o caso da missão Galileo, enviada a Júpiter em outubro de 1989. Este módulo continha $^{238}\text{PuO}_2$ que foi envolvido com irídio e colocado em um cilindro de carbono (BOARD SPACE STUDIES *et al.*, 2009). O módulo RHU pode ser utilizado também como aquecedor dos circuitos elétricos no espaço ou na noite fria marciana (RAGHEB, 2021; NASA, 2020).

No entanto, é importante ressaltar que as baterias nucleares ainda estão em processo de melhoramento, em função das tecnologias disponíveis, tanto quanto à segurança dos módulos RHU quanto à eficiência energética. A tecnologia *Advanced Stirling Radioisotope Generator* (ASRG) pretende ter melhorias na eficiência das baterias termoelétricas melhorando a conversão de potência térmica para potência elétrica (BOARD SPACE STUDIES *et al.*, 2009).

As principais características dos radioisótopos usados são: ter uma meia vida longa, uma alta energia da partícula alfa (ou β^-) e uma alta densidade energética. Dentre os radioisótopos que cumprem com estas condições o mais utilizado atualmente é o ^{238}Pu . A Tabela 3 mostra as principais características para duas baterias nucleares de baixa potência usando este radioisótopo. A principal diferença é a potência elétrica gerada, que é maior potência para a bateria GTR-400 em relação à bateria GTR Angel. Isto se deve a melhorias realizadas nas técnicas de montagem que produziram um aumento na eficiência do sistema. Demonstrando assim que com o aumento no gradiente de temperatura (temperatura da

junção quente - temperatura da junção fria) e um pequeno aumento de massa de 0,5 para 0,6 kg, é possível ter mais que o dobro da potência gerada: de 0,4 para 0,7 W.



Figura 4 – Módulo RHU de ^{238}Pu pesa somente 40g, com 3,2 cm de comprimento e 2,6 cm de diâmetro e produz 1 W térmico. Fonte: [Ragheb \(2021\)](#).

Tabela 3 – Valores de design de parâmetros básicos do GTR.

Parâmetro	GTR Angel	GTR-400
Potência elétrica (W)	0,2	0,43
Diâmetro (mm)	85	110
Altura (mm)	105	110
Eficiência (%)	2,3	4,3
Temperatura da junção quente (°C)	150	200
Temperatura da junção fria (°C)	30	30
Massa (kg)	0,5	0,6
Potência específica (W/kg)	0,4	0,7

Fonte: [Gusev et al. \(2011\)](#).

Finalmente, o modelo mais avançado de bateria GTR usando o efeito Seebeck é o MMGTR (Gerador termoeletrico radioisotopo multimissão). Esse modelo possui massa total de 45 kg que correspondente a 4,8 kg de $^{238}\text{PuO}_2$, produção de energia térmica de 2 kW_{th}, potência elétrica de 125 W com eficiência de 6,25% e vida útil mínima de 14 anos com diâmetro de 0,63 m e profundidade de 0,66 m ([PRELAS et al., 2016](#); [WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2021](#); [HAMMEL et al., 2016](#); [WERNER et al., 2017](#)).

A [Figura 5](#) mostra o sistema MMGTR com todos os seus componentes, e a [Figura 6](#) mostra a espaçonave que utiliza o MMGTR.

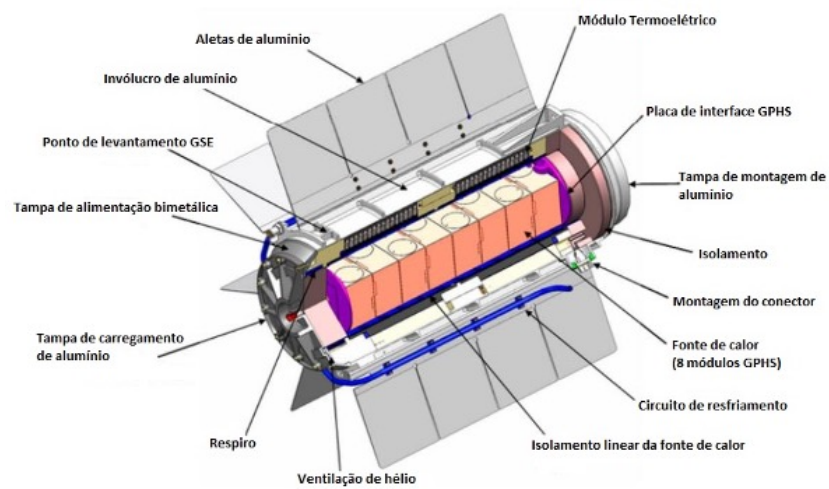


Figura 5 – Secções de um Gerador Termoelétrico Radioisótopo Multi-Missão MMGTR.



Figura 6 – Centro Espacial Kennedy da NASA onde os técnicos preparam a espaçonave New Horizons, a parte escura é uma bateria MMGTR.

3 METODOLOGIA

A seguir será apresentada a descrição completa do sistema a ser proposto. O MATLAB programa será usado para calcular as principais características do sistema como: decaimento radioativo, quantidade e formatos dos módulos Seebeck, massas e volumes dos radioisótopos, e cálculo das energias para uma bateria com características similares às da bateria MMGTR. Esta bateria terá como opções os radioisótopos com decaimento alfa (^{232}U , ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{243}Cm , ^{244}Cm) e com decaimento β^- (^{60}Co , ^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{137}Cs , ^{147}Pm e ^{210}Pb). Por outro lado, o programa ORIGEN-S será usado para a verificação das variações de massa dos principais radioisótopos e seus filhos, assim como a contribuição de potência térmica gerada pelo decaimento alfa.

3.1 Descrição geral do sistema

Uma bateria nuclear é composta por um termopar, uma fonte de material radioativo e um circuito elétrico. O termopar tem como princípio de funcionamento o efeito Seebeck, conforme descrito na ???. Este consiste em uma fonte de calor e uma fonte fria e o circuito elétrico termopar descrito na Figura 7. A fonte de energia térmica do sistema é o calor proveniente da fonte radioativa que juntamente com a fonte fria (temperatura ambiente), possibilita um gradiente de temperatura. Esta diferença de temperatura, utilizada com as funções do circuito termopar, irá produzir energia elétrica.

Os condutores elétricos que são formados por materiais diferentes, aqui representados pelos metais X e Y, conforme descrito na Figura 7, recebem nas suas extremidades temperaturas quente e fria. O aquecimento faz com que os elétrons tenham diferentes ganhos de energia cinética, deslocando-se para a extremidade fria. Isto irá gerar uma diferença de tensão (V) entre estas extremidades. Esta diferença de tensão (V) é o principal componente para gerar energia elétrica.

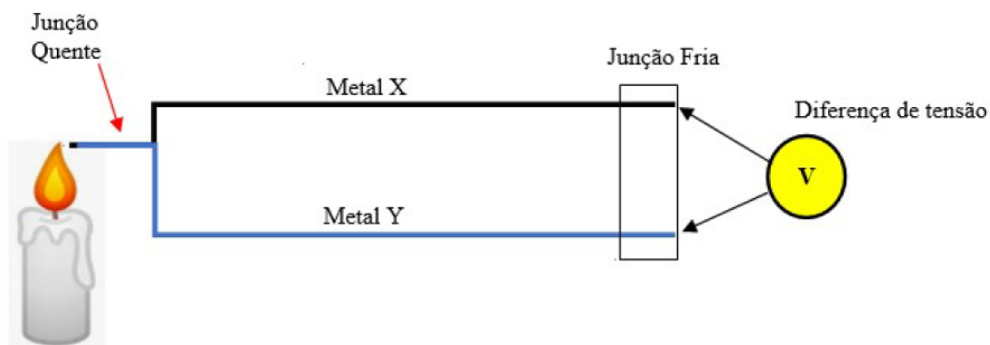


Figura 7 – Efeito Seebeck – Descrição Geral.

Para explicar geração de energia elétrica a partir do efeito Seebeck, é necessário

entender o funcionamento de um circuito elétrico fechado com seus principais componentes: tensão elétrica (V), impedância ou resistência interna da fonte (R_c), resistência da carga (R_L) e corrente elétrica (I) que circula no sistema apresentado na [Figura 8](#).

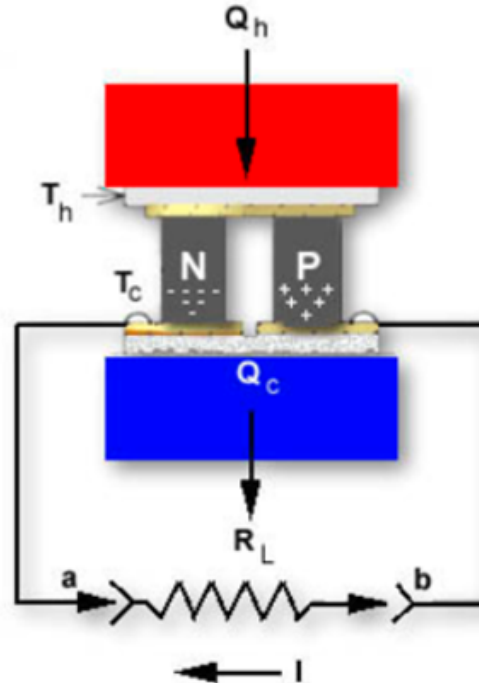


Figura 8 – Par termoelétrico. Fonte: [Ferrotec Corporation \(2020\)](#).

O Termopar é formado basicamente por dois metais diferentes, portanto com condutividades diferentes e aqui representados pelos blocos N e P. Eles estão conectados fisicamente e eletricamente por uma barra superior amarela, conforme [Figura 8](#) e juntamente com estes 3 elementos, existe o bloco Q_h , que representa a fonte de calor e onde é produzida a Temperatura quente (T_h). Os blocos com metais N e P estão em contato também com o bloco Q_c que representa uma fonte fria, que representa a Temperatura fria (T_c), mas os blocos com metais N e P não possuem conexão física ou elétrica neste ponto. Os blocos com metais N e P ao receberem a Temperatura quente (T_h) em uma de suas extremidades, fazem com que os elétrons ganhem energia cinética e desloquem em direção ao bloco Q_c e temperatura fria (T_c). Com a inserção da carga R_L acima, o circuito passa a ser fechado, portanto haverá circulação de elétrons entre os blocos de metais N e P, através da carga R_L , mas o metal N possui uma maior capacidade de gerar elétrons que o metal P, portanto o fluxo de elétrons será maior no sentido metal N para o metal P. A corrente elétrica tem um sentido inverso ao de elétrons, portanto, haverá circulação de corrente (I) do ponto “b” para o ponto “a”.

Na [Equação 6](#) é possível mostrar o circuito sem a carga R_L conectada, portanto um circuito em aberto ([FERROTEC CORPORATION, 2020](#)):

$$V = S \cdot \Delta T, \quad (6)$$

onde: V é Tensão de saída do módulo gerador, S é o Coeficiente Seebeck médio em volts/°C e ΔT é Gradiente de temperatura no termopar, onde $\Delta T = T_h - T_c$, onde T_h é a temperatura da parte quente e T_c , a temperatura na parte fria.

O módulo Seebeck em estudo utiliza um termopar Bismuto-Telúrio (Bi_2Te_3) e utiliza os valores extremos de $T_h = 300^\circ\text{C}$ e $T_c = 25^\circ\text{C}$, onde é encontrado o valor máximo de tensão $V = 5,052 \text{ V}$ (THERMOELECTRIC, 2020). A Equação 7 mostra que é possível calcular o coeficiente Seebeck do módulo (FERROTEC CORPORATION, 2020):

$$S = \frac{V}{\Delta T} = \frac{5,052 \text{ V}}{300^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}} = 0,018371 \frac{\text{V}}{^\circ\text{C}}. \quad (7)$$

Ao se conectar uma carga RL na saída do circuito, este passa a ser um circuito fechado fazendo com que se tenha a circulação de uma corrente elétrica (I), juntamente com a circulação desta corrente, é necessário considerar a resistência interna R_c (FERROTEC CORPORATION, 2020).

Para encontrar o valor da resistência interna R_c e corrente I utilizando os mesmos valores extremos de $T_h = 300^\circ\text{C}$ e $T_c = 25^\circ\text{C}$, encontramos os valores de $R_c = 2,90 \Omega$ e $I = 1,608\text{A}$. Para a melhor eficiência de qualquer circuito, toda a potência da fonte deve ser transferida para a carga RL. De acordo com a teoria dos circuitos é necessário fazer $R_c = RL$, desta forma o valor será de 2,90 ohms (THERMOELECTRIC, 2020).

A quantidade de energia térmica (Q_h) necessária para ser transformada em energia elétrica, pode ser demonstrada na Equação 8 através do efeito Seebeck (FERROTEC CORPORATION, 2020):

$$Q_h = (S \cdot T_h \cdot I) - (0,5 \cdot I^2 \cdot R_c) + (K_c \cdot \Delta T), \quad (8)$$

onde Q_h é calor de entrada em W e K_c a condutância térmica do circuito, 1,2 W/K.

K_c utiliza como referência temperaturas em Kelvin (K) e os outros componentes da equação utilizam Celsius(°C), mas como as variações de temperatura K e °C possuem a mesma variação, o ΔT terá o mesmo valor, portanto podemos utilizar somente °C no último termo da equação.

Portanto reescrevendo a Equação 8 obtém-se a Equação 9:

$$Q_h = (S \cdot T_h \cdot I) - (0,5 \cdot I^2 \cdot R_c) + K_c \cdot [(T_h + 273,15) - (T_c + 273,15)], \quad (9)$$

onde se conclui que a energia térmica necessária para alimentar o módulo Seebeck em estudo será:

$$Q_h = (0,018371 \cdot 300 \cdot 1,608) - (0,5 \cdot 1,608^2 \cdot 2,9) + 1,2 \cdot (300 - 25), \quad (10)$$

$$Q_h = 335,11 \text{ W.}$$

O termo $(S \cdot T_h \cdot I)$ está relacionado ao efeito Peltier, onde a circulação de corrente aquece ainda mais a peça que já recebe calor da fonte aquecida (KHAMIL *et al.*, 2020), e o termo $(0,5 \cdot I^2 \cdot R_c)$ mostra que metade do calor gerado na circulação de corrente no sistema elétrico, volta para realimentar o sistema (KHAMIL *et al.*, 2020).

3.2 Decaimento Radioativo como fonte de calor

O decaimento radioativo alfa e β^- pode ser utilizado para gerar energia térmica, pois o decaimento produz partículas com alta energia cinética. Estas partículas energéticas ao se chocarem com os átomos do próprio material, geram energia térmica. No entanto, estes radioisótopos devem ter uma meia vida longa, alta densidade energética e as partículas emitidas (alfa ou beta) devem ter uma alta energia. Dentre as opções avaliadas, os radioisótopos com decaimento alfa que cumprem com esses quesitos são: ^{232}U , ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{243}Cm , ^{244}Cm . Por outro lado, os radioisótopos com decaimento β^- que cumprem os esses requisitos são: ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{137}Cs , ^{147}Pm e ^{210}Pb . Ao contrário do ^{238}Pu , os radioisótopos propostos não são considerados como armas nucleares, portanto sua produção não está sujeita às mesmas restrições (MANGENG; THAYER, 1984).

Para calcular a potência térmica inicial que é gerada pelas partículas emitidas pelos radioisótopos, é necessário fornecer a massa inicial destes radioisótopos, que pode ser calculada utilizando a Equação 11 (RAGHEB, 2021):

$$Q_0 = (\text{Massa inicial}) \cdot (\text{Densidade de Potência}) \quad (11)$$

A Tabela 4 mostra a base de informações de densidade de potência, meia-vida, tipo de decaimento e energia de decaimento para cada radioisótopo estudado.

Para detalhar melhor as equações de decaimento, será considerado como referência o ^{238}Pu . Adotando como referência a necessidade de fornecer potência térmica $Q_h = 335,11 \text{ W}_{th}$, é possível calcular a massa para conseguir esta energia.

Na Equação 12 é possível considerar o valor de Q_0 :

$$Q_0 = Q_h = 335,11 \text{ W}_{th}. \quad (12)$$

Tabela 4 – Propriedades dos radioisótopos para baterias nucleares utilizados no trabalho.

Radioisótopo	Energia de decaimento (MeV)	$T_{1/2}$ (anos)	Tipo de decaimento	Densidade de potência (W/g)
^{232}U	5,414	68,9	alfa	0,70008796
^{238}Pu	5,593	87,74	alfa (100%), fis ($1,85 \times 10^{-7}\%$)	0,55558680
^{241}Am	5,638	432,2	alfa (100%), fis ($4,3 \cdot 10^{-10}\%$)	0,10857265
^{243}Cm	6,168	29,1	alfa (99,71%), ce (0,29%), fis ($5,3 \times 10^{-9}\%$)	1,64761742
^{244}Cm	5,902	18,1	alfa (100%), fis (1,37 $\times 10^{-4}\%$)	2,77753688
^{60}Co	0,318	5,27	beta e gama	0,71041766
^{90}Sr	0,546	28,77	beta	0,14898145
^{106}Ru	0,039	1,02	beta	0,25396224
^{137}Cs	0,514	30,1	beta	0,09540309
^{147}Pm	0,225	2,62	beta	0,41193477
^{210}Pb	0,016	22,29	beta	2,40353480

Fonte: [Prelas et al. \(2016\)](#).

Rearranjando os termos da [Equação 11](#) é possível calcular a massa inicial do radioisótopo ^{238}Pu :

$$\text{massa } [^{238}\text{Pu}] = \frac{Q_0}{\text{Densidade de Potência}} = \frac{335,11 \text{ W}}{555,587 \times 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{g}}} = 603,17 \text{ g} \quad (13)$$

A variação na potência térmica, ao longo dos anos, obedece à lei de decaimento que está ligada ao tempo de meia vida do radioisótopo e pode ser demonstrada pelas [Equações 14 e 15](#) a seguir:

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (14)$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{87,74} \quad (15)$$

Mantendo como referência o radioisótopo ^{238}Pu :

$$\lambda [^{238}\text{Pu}] = \frac{0,693}{87,74} = 0,007898336 \text{ anos}^{-1},$$

logo:

$$Q(t) [^{238}\text{Pu}] = 335,11 \cdot e^{-\lambda t} \quad (16)$$

Com t na escala em anos, utilizando o programa MATLAB é possível plotar a Equação 17 mostrado na Figura 9.

$$Q(t) [^{238}\text{Pu}] = 335,11 \cdot e^{-0,007898336 \cdot t} \quad (17)$$

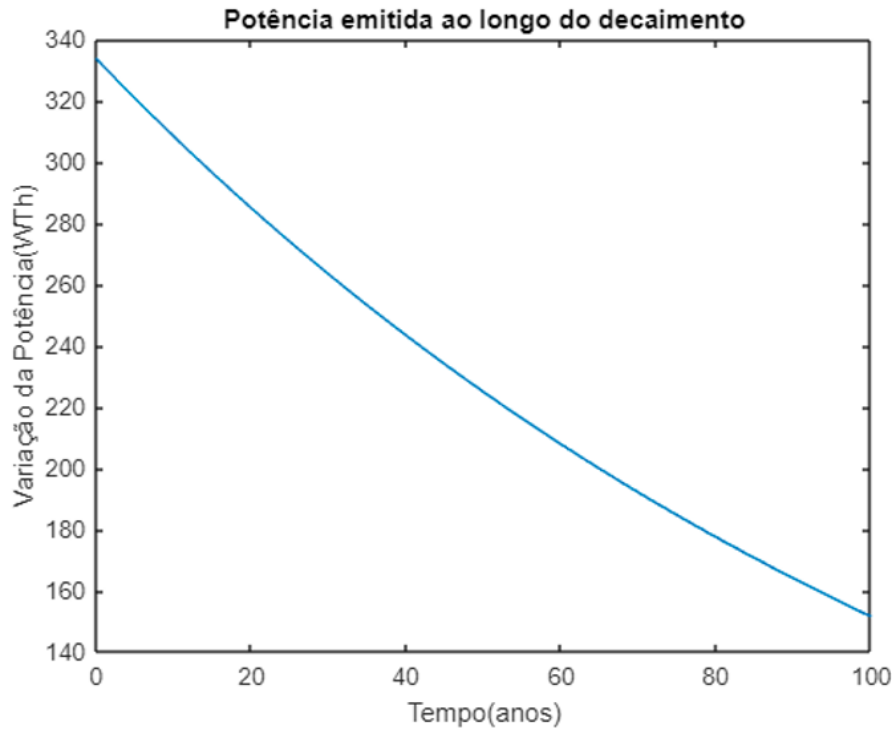


Figura 9 – Potência térmica emitida por 603,17 g de ^{238}Pu ao longo de 100 anos.

3.3 Dimensionamento de um sistema completo de uma bateria

Com a utilização das equações e tabelas apresentadas anteriormente, é possível demonstrar um sistema completo utilizando os radioisótopos escolhidos ^{232}U , ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{243}Cm , ^{244}Cm , ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{137}Cs , ^{147}Pm e ^{210}Pb . Ao final será possível encontrar as massas e volumes destes radioisótopos e a quantidade dos módulos Seebeck necessários para os requisitos de potência térmica e elétrica.

3.3.1 Determinação da quantidade de módulos

Utilizando as especificações de referência de um módulo Seebeck comercial, é possível ver na Figura 10, as principais características de funcionamento e de geometria do módulo utilizado (THERMOELECTRIC, 2020). É possível chegar aos valores descritos na Tabela 5 com características como os valores máximos que podem ser obtidos através do módulo:

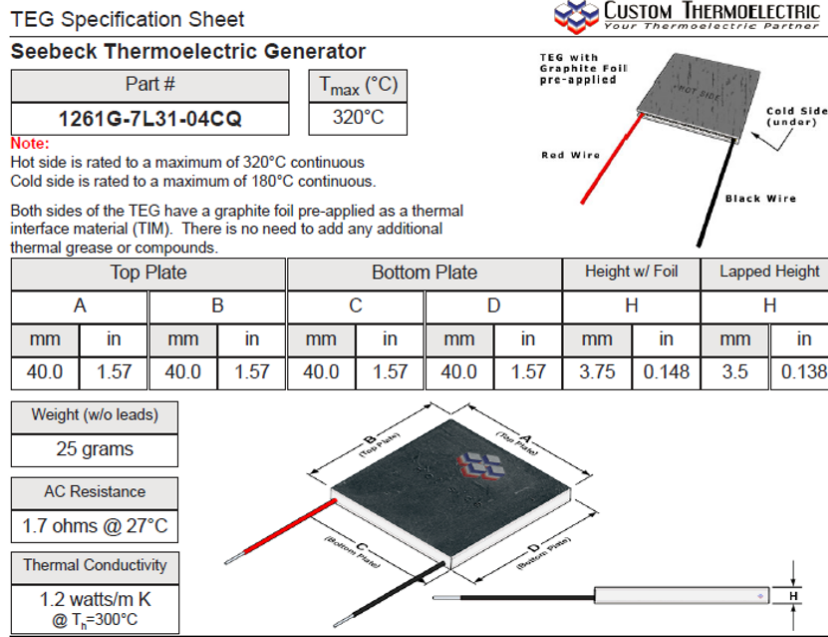


Figura 10 – Módulo Seebeck escolhido. Fonte: [Thermoelectric \(2020\)](#).

Tabela 5 – Características do módulo.

Potência máxima	$V_{m\acute{a}x}$ (Tensão máxima de saída)	$i_{m\acute{a}x}$ (corrente máxima de saída)	$R_{m\acute{a}x}$ (resistência máxima)
8,15 W	5,052 volts	1,608 amperes	2,90 ohms

Conforme é possível observar na [Tabela 5](#), um módulo apenas não consegue gerar os 125 W elétricos necessários ao final dos 14 anos de vida útil. Então, será necessário utilizar vários destes módulos através de conexões em série e paralelo para obter a potência elétrica desejada. A [Figura 11](#) mostra uma arquitetura matricial dos módulos Seebeck dispostos em uma estrutura em série (S_1, S_2, S_n) e em paralelo (P_1, P_2, P_n).

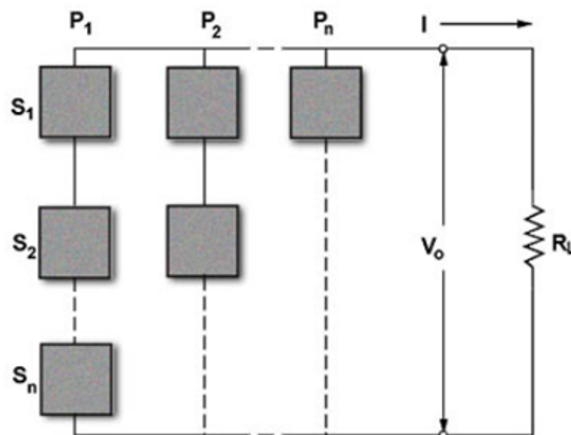


Figura 11 – Configuração dos módulos Termopares - $NT = NS \times NP$. Fonte: [Ferrotec Corporation \(2020\)](#).

Da [Figura 11](#) temos: NT = número total de módulos; NS = número de módulos em série (S_1, S_2, S_n) e NP = número de módulos em paralelo (P_1, P_2, P_n). Desta forma, é necessário calcular a quantidade mínima de módulos necessárias (NT) conforme [Equação 18](#) a seguir:

$$NT = \frac{PE}{P_{\text{máx}}} = \frac{125}{8,15} = 15,34 \text{ módulos} \quad (18)$$

Onde PE é a potência elétrica desejada, $P_{\text{máx}}$ é a potência máxima que pode ser obtida de um módulo Seebeck, mas será necessário arredondar este valor e fazê-lo múltiplo de 2, porque o valor de NT deverá ser número par e inteiro, assim:

$$NT = 16 \text{ módulos}$$

Assim, o circuito que irá ser elaborado deverá ter no mínimo 16 módulos. A partir disto podemos ter duas possíveis estruturas. Para obter a potência desejada pode ser multiplicada a quantidade de módulos em série e paralelo, desta forma $NT = NS \times NP$, então teremos:

$$NS = 8, NP = 2, NT = 16.$$

$$NS = 4, NP = 4, NT = 16.$$

Utilizando as equações:

$$V_0 = V \cdot NS \quad (19)$$

$$i_0 = I \cdot NP \quad (20)$$

$$P_0 = V_0 \cdot i_0 \quad (21)$$

$$R_{\text{eq}} = \frac{NS}{NP} \cdot R_M \quad (22)$$

Considerando as [Equações de 19 a 22](#), e os valores das características máximas para o módulo Seebeck de referência ([Tabela 5](#)), é possível encontrar as novas especificações do circuito formado pela conexão dos módulos em série e paralelo. Para obter a transferência máxima de potência da fonte de energia elétrica para a carga RL, deve-se igualar a resistência da fonte R_c com a resistência da carga RL. Desta forma é possível calcular os valores de potência, corrente, tensão e resistência do circuito, como apresentado na [Tabela 6](#).

No entanto, deve ser preferencialmente adotado $NS > NP$, porque NS influencia o valor da tensão (V_0) e NP influencia o valor da corrente (i_0) e circuitos que trabalham com altas correntes geram muitas perdas devido ao aquecimento, desperdiçando parte da energia elétrica. Desta forma, o circuito escolhido possui oito módulos em série ($NS = 8$) e dois módulos em paralelo ($NP = 2$).

Tabela 6 – Especificações na montagem da estrutura Seebeck com 16 módulos

NS	NP	NT	V_0 (Volts)	i_0 (Amperes)	Req(Ohms)	Po(W)
8	2	16	40.42	3.22	11.6	130
4	4	16	20.21	6.43	2.9	130

Fonte: [Thermoelectric \(2020\)](#).

3.3.2 Dimensionamento das estruturas Seebeck

A geometria das baterias e dos módulos que as contém na utilização do efeito Seebeck são bastante complexas. A forma geométrica ou estrutura do radioisótopo que irá gerar calor deveria ser uma fonte isotrópica, ou seja, uma esfera para que se tenha um aproveitamento de toda a energia térmica emitida. Entretanto, para a construção dos módulos Seebeck que irão trabalhar com estes radioisótopos, esse formato é inviável.

Nos projetos realizados pelas agências espaciais NASA e ESA, o formato escolhido para os radioisótopos como fonte de calor é próximo de um formato cilíndrico, pois neste formato se consegue uma distribuição de calor de forma uniforme e em todas as direções e uma maior transferência de calor para os módulos Seebeck. Como não foi possível encontrar módulos Seebeck circulares, somente planos, o formato escolhido com montagem dos módulos Seebeck será: retangular, hexagonal, octogonal e decagonal, o mais próximo possível do formato cilíndrico, semelhante ao formato do radioisótopo, conforme [Figura 12](#).

O radioisótopo no formato cilíndrico está em cor vermelha e os módulos Seebeck em cor azul e com arestas de 4×10^{-3} m. O critério em escolher entre o formato retangular, hexagonal, octogonal ou decagonal, está em função do volume do radioisótopo utilizado.

Observar também que os módulos Seebeck em formato 4×10^{-3} m \times 4×10^{-3} m ([THERMOELECTRIC, 2020](#)) estarão nas laterais dos cilindros. Desta forma, na frente e atrás dos módulos, não é possível colocar módulos Seebeck devido ao seu formato. Nestas regiões será colocado isolamento térmico para que o calor emitido pelos cilindros de radioisótopos não saia da estrutura diminuindo assim a eficiência do sistema. A [Tabela 8](#) mostra as estruturas que serão inseridas no programa MATLAB desenvolvido para apresentar a melhor estrutura geométrica a ser usada no sistema para cada radioisótopo, submetido às condições mencionadas no começo deste Capítulo.

O espaço entre a estrutura formada pelos módulos Seebeck e os cilindros com material radioisótopo deve ser o menor possível, para que o calor seja totalmente transferido às placas Seebeck. Obedecendo à quantidade mínima de NT=16 conforme demonstrado na página 32. Os volumes das estruturas Seebeck podem ser demonstradas com as seguintes equações:

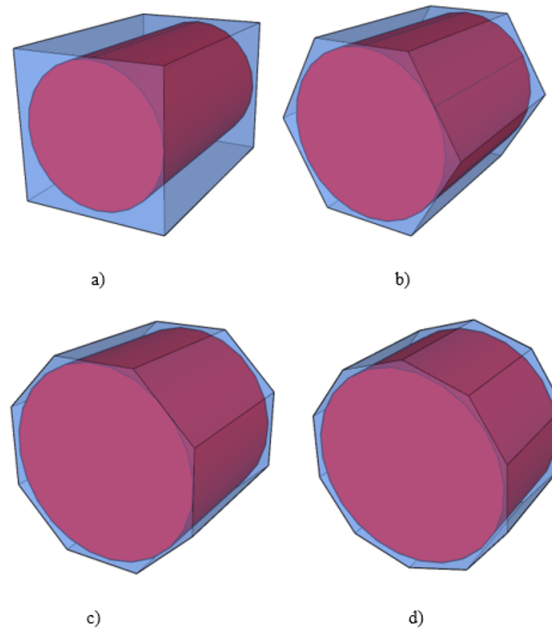


Figura 12 – Módulos Seebeck em formatos: a) retangular, b) hexagonal, c) octogonal e d) decagonal.

Cubo

$$\text{Volume} = a^2 \times h \quad (23)$$

Hexágono

$$\text{Volume} = \frac{a^2 \times h}{2} \quad (24)$$

Octógono

$$\text{Volume} = 2 \times (1 + \sqrt{2}) \times a^2 \times h \quad (25)$$

Decágono

$$\text{Volume} = \frac{5\sqrt{5 + 2\sqrt{5}} \times a^2 \times h}{2} \quad (26)$$

Onde a = aresta, com valor fixo de 4×10^{-3} m e h = profundidade da bateria, com valores múltiplos de 4×10^{-3} m.

Tabela 7 – Especificações das estruturas Seebeck e cilíndricas.

Estrutura	Formato	Dimensões			Cilindro	Número de módulos		
		Arestas (cm)	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Volume (m ³)	NT	NS	NP
EA	Cubo	4	4	64	50,3	6	3	2
EB	Cubo	4	8	128	100,5	10	5	2
EC	Hexágono	4	8	332,6	301,6	12	4	3
ED	Hexágono	4	12	498,8	452,4	18	6	3
EE	Octógono	4	12	927,1	878,9	24	6	4
EF	Octógono	4	16	1236,1	1171,9	32	8	4
EG	Octógono	4	20	1545,1	1464,9	40	10	4
EH	Octógono	4	24	1854,1	1757,9	48	12	4
EI	Octógono	4	28	2163,1	2050,8	56	14	4
EJ	Octógono	4	32	2472,2	2343,8	64	8	8
EK	Octógono	4	36	2781,2	2636,8	72	9	8
EL	Octógono	4	40	3090,2	2929,8	80	10	8
EM	Octógono	4	52	4017,3	3808,7	104	13	8
EN	Octógono	4	68	5253,3	4980,6	136	17	8
EO	Decágono	4	68	8371,3	8095,1	170	17	10
EP	Decágono	4	80	9848,6	9523,6	200	25	8
EQ	Decágono	4	108	13295,6	12856,8	270	18	15
ER	Decágono	4	132	16250,2	15713,9	330	22	15
ES	Decágono	4	172	21174,5	20475,7	430	43	10
ET	Decágono	4	204	25113,9	24285,1	510	30	17
EU	Decágono	4	260	32007,9	30951,7	650	26	25
EV	Decágono	4	296	36439,8	35237,3	740	37	20
EX	Decágono	4	400	49242,9	47617,9	1000	100	10
EZ	Decágono	4	570000	70171184,6	67855537,8	1425000	1900	750

3.3.3 Determinação das massas e volumes dos radioisótopos

Aplicando a mesma metodologia usada para o ²³⁸Pu é possível realizar os cálculos para os outros radioisótopos propostos. Então, adotando a [Equação 15](#), calcula-se as constantes de decaimento para os radioisótopos que são apresentadas na [Tabela 9](#).

Adotando como referência a [Equação 14](#) e considerando que a potência térmica final deverá ser de 2000 W_{th}, para todos os radioisótopos, ou seja Q(t=14 anos) = 2000, é possível elaborar a [Equação 27](#). Onde a partir do valor da potência final podem ser obtidos os valores da potência térmica no início do processo, para todos os radioisótopos estudados. Os resultados são mostrados na [Tabela 10](#).

$$Q_0 = \frac{2000}{e^{-\lambda \cdot t}} W_{th}. \quad (27)$$

Tabela 8 – Especificações das estruturas Seebeck e cilíndricas.

Estrutura	Formato	Dimensões			Cilindro	Número de módulos		
		Arestas (m)	Altura (m)	Volume (m ³)	Volume (m ³)	NT	NS	NP
EA	Cubo	4×10^{-2}	$4, \times 10^{-3}$	$6,4 \times 10^{-5}$	$5,03 \times 10^{-5}$	6	3	2
EB	Cubo	4×10^{-2}	$8, \times 10^{-3}$	$1,28 \times 10^{-4}$	$1,01 \times 10^{-4}$	10	5	2
EC	Hexágono	4×10^{-2}	$8, \times 10^{-3}$	$3,33 \times 10^{-4}$	$3,02 \times 10^{-4}$	12	4	3
ED	Hexágono	4×10^{-2}	$1,2 \times 10^{-2}$	$4,99 \times 10^{-4}$	$4,52 \times 10^{-4}$	18	6	3
EE	Octógono	4×10^{-2}	$1,2 \times 10^{-2}$	$9,27 \times 10^{-4}$	$8,79 \times 10^{-4}$	24	6	4
EF	Octógono	4×10^{-2}	$1,6 \times 10^{-2}$	$1,24 \times 10^{-3}$	$1,17 \times 10^{-3}$	32	8	4
EG	Octógono	4×10^{-2}	$2, \times 10^{-2}$	$1,55 \times 10^{-3}$	$1,46 \times 10^{-3}$	40	10	4
EH	Octógono	4×10^{-2}	$2,4 \times 10^{-2}$	$1,85 \times 10^{-3}$	$1,76 \times 10^{-3}$	48	12	4
EI	Octógono	4×10^{-2}	$2,8 \times 10^{-2}$	$2,16 \times 10^{-3}$	$2,05 \times 10^{-3}$	56	14	4
EJ	Octógono	4×10^{-2}	$3,2 \times 10^{-2}$	$2,47 \times 10^{-3}$	$2,34 \times 10^{-3}$	64	8	8
EK	Octógono	4×10^{-2}	$3,6 \times 10^{-2}$	$2,78 \times 10^{-3}$	$2,64 \times 10^{-3}$	72	9	8
EL	Octógono	4×10^{-2}	4×10^{-2}	$3,09 \times 10^{-3}$	$2,93 \times 10^{-3}$	80	10	8
EM	Octógono	4×10^{-2}	$5,2 \times 10^{-2}$	$4,02 \times 10^{-3}$	$3,81 \times 10^{-3}$	104	13	8
EN	Octógono	4×10^{-2}	$6,8 \times 10^{-2}$	$5,25 \times 10^{-3}$	$4,98 \times 10^{-3}$	136	17	8
EO	Decágono	4×10^{-2}	$6,8 \times 10^{-2}$	$8,37 \times 10^{-3}$	$8,1 \times 10^{-3}$	170	17	10
EP	Decágono	4×10^{-2}	$8, \times 10^{-2}$	$9,85 \times 10^{-3}$	$9,52 \times 10^{-3}$	200	25	8
EQ	Decágono	4×10^{-2}	$1,08 \times 10^{-1}$	$1,33 \times 10^{-2}$	$1,29 \times 10^{-2}$	270	18	15
ER	Decágono	4×10^{-2}	$1,32 \times 10^{-1}$	$1,63 \times 10^{-2}$	$1,57 \times 10^{-2}$	330	22	15
ES	Decágono	4×10^{-2}	$1,72 \times 10^{-1}$	$2,12 \times 10^{-2}$	$2,05 \times 10^{-2}$	430	43	10
ET	Decágono	4×10^{-2}	$2,04 \times 10^{-1}$	$2,51 \times 10^{-2}$	$2,43 \times 10^{-2}$	510	30	17
EU	Decágono	4×10^{-2}	$2,6 \times 10^{-1}$	$3,2 \times 10^{-2}$	$3,1 \times 10^{-2}$	650	26	25
EV	Decágono	4×10^{-2}	$2,96 \times 10^{-1}$	$3,64 \times 10^{-2}$	$3,52 \times 10^{-2}$	740	37	20
EX	Decágono	4×10^{-2}	$4, \times 10^{-1}$	$4,92 \times 10^{-2}$	$4,76 \times 10^{-2}$	1000	100	10
EZ	Decágono	4×10^{-2}	$5,7 \times 10^2$	$7,02 \times 10^1$	$6,79 \times 10^1$	1425000	1900	750

Tabela 9 – Constante de decaimento.

Radioisótopo	T _{1/2} (ano)	λ (ano ⁻¹)
²³² U	68,9	0,01006019
²³⁸ Pu	87,7	0,00790001
²⁴¹ Am	432,2	0,00160376
²⁴³ Cm	29,1	0,02381949
²⁴⁴ Cm	18,1	0,03829542
⁶⁰ Co	5,3	0,13149454
⁹⁰ Sr	28,8	0,02409271
¹⁰⁶ Ru	1	0,6772984
¹³⁷ Cs	30,1	0,02302815
¹⁴⁷ Pm	2,6	0,2641567
²¹⁰ Pb	22,3	0,03109678

Massa dos radioisótopos

A superfície dos radioisótopos pode atingir temperaturas muito altas, o que poderia danificar os circuitos eletrônicos que estarão muito próximos, além disso, para facilitar a

Tabela 10 – Valores de energia térmica no início e fim do processo.

Radioisótopo	Q(0 anos) (W_{th})	Q(14 anos) (W_{th})
^{232}U	2.302,50	2.000,00
^{238}Pu	2.233,90	2.000,00
^{241}Am	2.045,40	2.000,00
^{243}Cm	2.791,60	2.000,00
^{244}Cm	3.418,80	2.000,00
^{60}Co	12.604,70	2.000,00
^{90}Sr	2.802,30	2.000,00
^{106}Ru	26.247.466,60	2.000,00
^{137}Cs	2.760,90	2.000,00
^{147}Pm	80.748,60	2.000,00
^{210}Pb	3.091,00	2.000,00

manipulação, alguns radioisótopos estarão em composições que não sejam as naturais. São eles, metálico ou cerâmico se o composto contiver O_2 como: ^{60}Co , ^{106}Ru , ^{210}Pb , óxidos $^{232}\text{UO}_2$, $^{241}\text{AmO}_2$, $^{244}\text{CmO}_2$, $^{244}\text{CmO}_2$, $^{90}\text{SrTiO}_3$ e $^{147}\text{Pm}_2\text{O}_3$ e cloreto $^{137}\text{CsCl}$. Assim, será necessário calcular as massas totais dos compostos.

Na [Tabela 11](#), são apresentados os valores das massas molares que serão utilizadas nos cálculos. A [Tabela 12](#) mostra as porcentagens de cada radioisótopo dentro do composto utilizado no decaimento alfa e para os radioisótopos com decaimento beta serão apresentados na [Tabela 13](#).

Tabela 11 – Massa Molar dos radioisótopos envolvidos.

Elemento	Massa Molar
^{16}O	15,99491
^{232}U	232,03715
^{238}Pu	238,04955
^{241}Am	241,05682
^{243}Cm	243,06139
^{244}Cm	244,06275
^{60}Co	58,93319
^{90}Sr	87,62000
^{106}Ru	101,07000
^{137}Cs	132,90545
^{147}Pm	144,91275
^{210}Pb	207,20000
^{35}Cl	35,45300
^{47}Ti	47,86700

Tabela 12 – Porcentagens dos elementos nos compostos no decaimento alfa.

Composto	^{16}O	^{232}U	^{238}Pu	^{241}Am	^{243}Cm	^{244}Cm
UO ₂	12,12%	87,88%	–	–	–	–
PuO ₂	11,85%	–	88,15%	–	–	–
AmO ₂	11,72%	–	–	88,28%	–	–
CmO ₂	11,63%	–	–	–	88,37%	–
CmO ₂	11,59%	–	–	–	–	88,41%

Tabela 13 – Porcentagens dos elementos nos compostos no decaimento beta.

Composto	^{16}O	^{47}Ti	^{35}Cl	^{60}Co	^{90}Sr	^{106}Ru	^{137}Cs	^{147}Pm	^{210}Pb
Co-nat	–	–	–	100%	–	–	–	–	–
SrTiO ₃	26,2%	26,1%	–	–	47,8%	–	–	–	–
Ru-nat	–	–	–	–	–	100%	–	–	–
CsCl	–	–	21,1%	–	–	–	78,9%	–	–
Pm ₂ O ₃	14,2%	–	–	–	–	–	–	85,8%	–
Pb-nat	–	–	–	–	–	–	–	–	100%

Assim, utilizando a [Equação 13](#) e a [Tabela 4](#), é possível calcular a massa total de cada composto e a massa do radioisótopo de interesse que será utilizado como fonte de calor conforme apresentado na [Tabela 14](#).

Tabela 14 – Massas totais dos compostos e seus componentes.

Composto	Massa Total (kg)	Massa do Radioisótopo (kg)	Massa do Oxigênio (kg)	Massa do Titânio (kg)	Massa do Cloro(kg)
UO ₂	3,25	2,86	0,39	–	–
PuO ₂	4,56	4,02	0,54	–	–
AmO ₂	21,35	18,85	2,50	–	–
$^{243}\text{CmO}_2$	1,93	1,71	0,22	–	–
$^{244}\text{CmO}_2$	1,39	1,23	0,16	–	–
Co-nat	17,74	17,74	–	–	–
SrTiO ₃	39,39	18,81	10,30	10,28	–
Ru-nat	$103,35 \times 10^3$	$103,35 \times 10^3$	–	–	–
CsCl	36,66	28,94	–	–	7,72
Pm ₂ O ₃	228,49	196,02	–	–	–
Pb-nat	1,29	1,29	–	–	–

Volume necessário para os radioisótopos

Para calcular os volumes de cada composto, inicialmente será necessário informar a densidade de cada um dos materiais ([PRELAS *et al.*, 2016](#); [RAGHEB, 2021](#); [MANGENG; THAYER, 1984](#)): UO₂ = 10×10^3 kg/m³, PuO₂ = 10×10^3 kg/m³, AmO₂ = $10,47 \times 10^3$ kg/m³, $^{243}\text{CmO}_2$ = $12,17 \times 10^3$ kg/m³, $^{244}\text{CmO}_2$ = $12,17 \times 10^3$ kg/m³, Co-nat =

$8,90 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\text{SrTiO}_3 = 4,60 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\text{Ru-nat} = 1,53 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\text{CsCl} = 3,20 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\text{Pm}_2\text{O}_3 = 6,60 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ e $\text{Pb-nat} = 11,34 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.

O cálculo do volume do material pode ser encontrado segundo a [Equação 28](#), dada pela razão da massa do composto e a sua densidade:

$$\text{Volume do Material} = \frac{\text{Massa do Composto (kg)}}{\text{Densidade } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)} \quad (28)$$

Isso pode ser demonstrado na segunda coluna da [Tabela 15](#). Com base nas informações desta coluna e das informações da [Tabela 8](#), é possível escolher as estruturas Seebeck que irão conter os cilindros dos radioisótopos mostradas na [Tabela 15](#).

Importante observar, conforme descrito na [subseção 3.3.1](#), que a quantidade mínima destes módulos deverá ser de $\text{NT} = 16$ módulos, pois a potência elétrica esperada é de 125 W elétricos, independente do radioisótopo escolhido.

Tabela 15 – Volume ocupado pelos compostos, as estruturas escolhidas, seus formatos e quantidade de módulos Seebeck.

Composto	Volume cilindro (m^3)	Estrutura	Formato	Aresta (m)	Altura (m)	NT	NS	NP
UO_2	$3,74 \times 10^{-4}$	ED	Hexágono	4×10^{-2}	$1,20 \times 10^{-2}$	18	6	3
PuO_2	$4,56 \times 10^{-4}$	EE	Octógono	4×10^{-2}	$1,20 \times 10^{-2}$	24	6	4
AmO_2	$2,04 \times 10^{-3}$	EI	Octógono	4×10^{-2}	$2,80 \times 10^{-2}$	56	14	4
243CmO_2	$1,58 \times 10^{-4}$	ED	Hexágono	4×10^{-2}	$1,20 \times 10^{-2}$	18	6	3
244CmO_2	$1,14 \times 10^{-4}$	ED	Hexágono	4×10^{-2}	$1,20 \times 10^{-2}$	18	6	3
Co-nat	$1,99 \times 10^{-3}$	EI	Octógono	4×10^{-2}	$2,80 \times 10^{-2}$	56	14	4
SrTiO_3	$8,56 \times 10^{-3}$	EP	Decágono	4×10^{-2}	8×10^{-2}	200	25	8
Ru-nat	$6,80 \times 10^1$	EZ	Decágono	4×10^{-2}	570.000	1.425.000	1.900	750
CsCl	$1,15 \times 10^{-2}$	EQ	Decágono	4×10^{-2}	$1,08 \times 10^{-1}$	270	18	15
Pm_2O_3	$3,46 \times 10^{-2}$	EV	Decágono	4×10^{-2}	$2,96 \times 10^{-1}$	740	37	20
Pb-nat	$1,13 \times 10^{-4}$	ED	hexágono	4×10^{-2}	$1,20 \times 10^{-2}$	18	6	3

Nas Tabelas [16](#) e [17](#) são mostrados os valores de tensão, corrente e potência que serão gerados no início da vida útil ($t = 0$) até o final da vida útil ($t = 14$ anos). Foi considerado que a energia térmica que chega em cada módulo seja de forma uniforme, portanto com o mesmo valor e que mesmo a eficiência sendo de 6,25%, a capacidade máxima de gerar energia elétrica em cada módulo é de 8,15 W elétricos, conforme explicado anteriormente.

Foram utilizadas as informações dos gráficos descritos na referência ([THERMOELECTRIC, 2020](#)), para montar uma base de dados no programa MATLAB. Embora os valores da temperatura externa sejam bem baixos, considerando o espaço, foi considerada a temperatura externa dos módulos em $T_c = 25^\circ\text{C}$.

Após os 14 anos, é necessário alcançar a potência final de 125 W. Na [Tabela 17](#) ($t = 14$) é possível observar a redução nos valores de tensão, corrente e resistência equivalente

em relação aos valores da [Tabela 16](#) ($t=0$). Embora sejam valores diferentes quando comparados com o ano inicial, isso não afeta o circuito alimentado, pois existem circuitos que ajustam esses valores até os valores nominais requeridos nos equipamentos eletrônicos que serão alimentados.

Tabela 16 – Valores calculados no início do processo (ano 0)

Composto	V_0 (V)	i_0 (A)	R_{eq} (Ω)	P_0 (W elétricos)
UO ₂	30,36	4,83	5,8	146,58
PuO ₂	25,21	5,64	4,07	142,14
AmO ₂	35,77	3,62	8,61	129,45
²⁴³ CmO ₂	30,36	4,83	5,8	146,58
²⁴⁴ CmO ₂	30,36	4,83	5,8	146,58
Co–nat	70,84	6,44	10,15	456,03
SrTiO ₃	38,36	4,72	6,98	181,07
Ru–nat	3401,2	492,31	5,82	$1,67 \times 10^6$
CsCl	23,69	7,58	2,59	179,57
Pm ₂ O ₃	169,68	30,07	5,1	5102,2
Pb–nat	30,36	4,83	5,8	146,58

Tabela 17 – Valores calculados no final do processo (ano 14).

Composto	V_f (V)	I_f (A)	R_{eqf} (Ω)	P_f (W elétricos)
UO ₂	27,77	4,53	5,52	125,8
PuO ₂	23,71	5,34	4,04	126,71
AmO ₂	35,38	3,6	8,58	127,29
²⁴³ CmO ₂	27,77	4,53	5,52	125,8
²⁴⁴ CmO ₂	27,77	4,53	5,52	125,8
Co–nat	35,38	3,6	8,58	127,29
SrTiO ₃	32,53	4,02	6,72	130,81
Ru–nat	26,97	28,46	2,02	767,47
CsCl	20,64	6,32	2,54	130,5
Pm ₂ O ₃	25,36	5,44	3,61	137,9
Pb–nat	27,77	4,53	5,52	125,8

3.4 Considerações e aproximações realizadas

O trabalho não considerou os custos dos módulos Seebeck, do circuito controlador de tensão, corrente e impedância/resistência, dos módulos de isolamento térmico, dos dissipadores de calor e da estrutura metálica que os contém. Este cálculo é complexo, e no trabalho foi considerado apenas o valor do custo de produção dos radioisótopos, que são os maiores custos. Na formação dos compostos, os radioisótopos possuem as seguintes purezas: ²³⁸Pu e ²⁴¹Am - 100%, ²³²U - 85%, ²⁴⁴Cm - 90%, ⁶⁰Co - 10%, ⁹⁰Sr - 56%, ¹⁰⁶Ru - 20%, ¹³⁷Cs - 35%, ¹⁴⁷Pm - 95%. ²⁴³Cm e ²¹⁰Pb não foram encontradas literaturas com

estas informações (ROHRMANN, 1963; MANGENG; THAYER, 1984). Mas na realização dos cálculos, foram realizadas aproximações considerando os radioisótopos como puros, ou seja, sem a mistura de seus outros isótopos na formação da massa.

Foram consideradas como premissa as mesmas informações da melhor bateria nuclear atualmente, a MMGTR com 6,25% na eficiência de conversão térmica elétrica, a potência térmica de 2 kW e a vida útil de 14 anos.

Foram utilizados dados de entrada no programa MATLAB com 8 casas decimais, o número mínimo de módulos Seebeck será de 16 módulos.

Foi utilizado o sistema internacional de unidades com comprimento em (m) e massa em (kg).

4 RESULTADOS

O primeiro passo para realizar o projeto da bateria nuclear é calcular a massa inicial de cada radioisótopo para encontrar os valores de energia térmica e elétrica fornecida pela bateria. Com a utilização do programa MATLAB é possível calcular a massa total dos compostos que foram mostrados na [Tabela 14](#), para a utilização do ORIGEN-S é possível calcular a variação das massas dos radioisótopos e seus filhos, que irão se acumular durante o processo. Com as informações de densidade de potência (W/g) dos radioisótopos pais e filhos é possível calcular a variação da potência térmica ao longo dos anos. É necessário lembrar que existem 3 variáveis a serem consideradas ao produzir energia térmica e elétrica suficiente para 14 anos: como meia-vida, quantidade de massa utilizada para cada radioisótopo e a densidade energética produzida pelo decaimento alfa ou beta. Durante a análise do decaimento alfa pelo ORIGEN-S, foi encontrado o radioisótopo filho do decaimento de ^{232}U , o ^{228}Th , que também tem um decaimento alfa e possui alta densidade energética de $2,26 \times 10^9$ J/g e meia-vida de 1,91 anos. Desta forma, o cálculo teve que ser refeito, pois no projeto inicial foi considerado apenas o ^{232}U e ambos os radioisótopos contribuem para a potência térmica e em consequência a elétrica, onde atinjam suas maiores produções de potência de $3,64 \text{ kW}_{\text{th}}$ em torno de 8,4 anos. Depois a potência começa a diminuir linearmente até atingir $3,52 \text{ kW}_{\text{th}}$ conforme mostrado na [Figura 13](#).

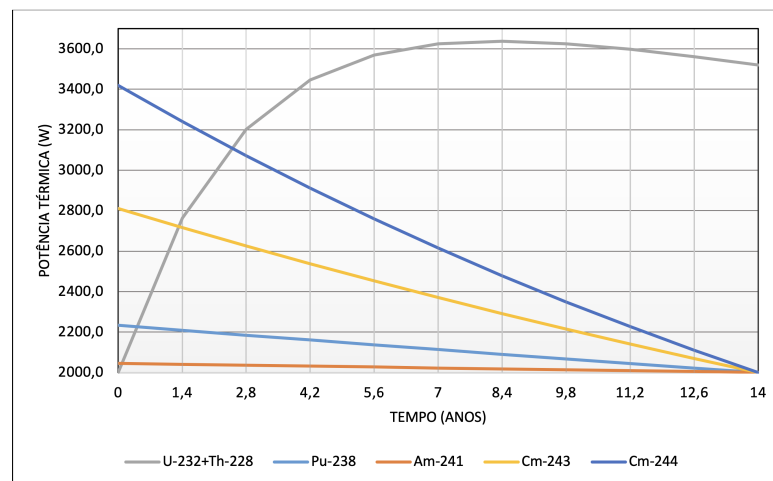


Figura 13 – Variação da potência térmica dos radioisótopos com decaimento alfa ao longo dos 14 anos.

Importante lembrar que o valor inicial da energia térmica para ^{232}U deverá ser de no mínimo $000 \text{ W}_{\text{th}}$, que é o valor mínimo requerido para o projeto do MMGTR.

Por outro lado, para projetar um MMGTR usando decaimento beta, foi necessário considerar a equação de decaimento radioativo de cada radioisótopo devido o ORIGEN-S não conseguir simular o decaimento beta. As Figuras [14](#), [15](#) e [16](#) mostram as energias térmicas calculadas a partir da equação de decaimento radioativo (teórico) usando o

programa MATLAB.

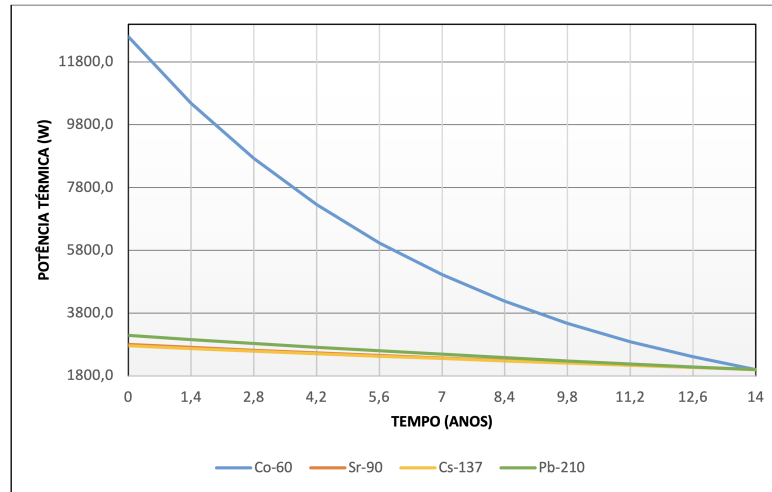


Figura 14 – Variação da potência térmica para os radioisótopos ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{137}Cs e ^{210}Pb , todos com decaimento beta ao longo dos 14 anos.

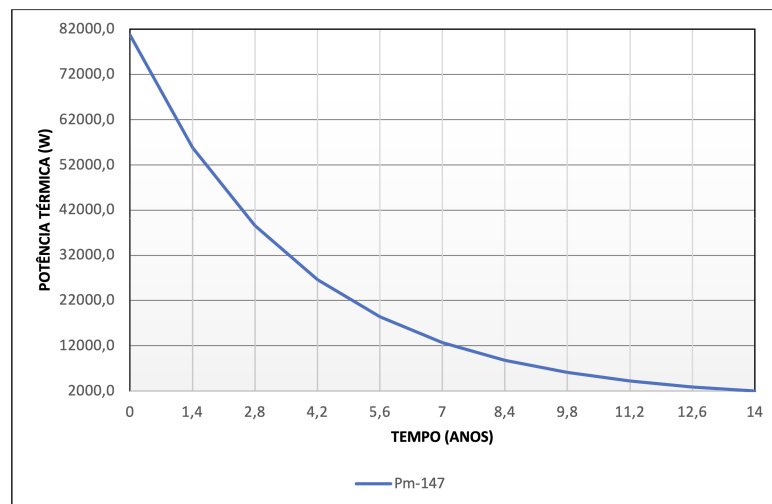


Figura 15 – Variação da potência térmica para o radioisótopo ^{147}Pm que possui decaimento beta, ao longo dos 14 anos.

Para os compostos com decaimento alfa, é possível perceber que a produção de energia térmica pelo AmO_2 é quase constante devido à sua longa meia-vida, embora seja o radioisótopo que necessita de maior massa. Em seguida o radioisótopo de referência PuO_2 que apresenta uma variação de 0,23 kW de potência térmica durante os 14 anos. Por outro lado, o ^{243}Cm tem meia-vida de 11 anos maior que a do ^{244}Cm , implicando que a quantidade de massa deve ser maior para o ^{244}Cm do que para o ^{243}Cm . No entanto, a densidade de potência no decaimento alfa de ^{244}Cm é cerca de 1,6 vezes maior do que a de ^{243}Cm produzindo maior energia térmica e elétrica com menor quantidade de material.

Em seguida, utilizando as Equações 14, 15 e de 18 a 28, é possível calcular a quantidade de módulos Seebeck necessários para atender aos requisitos de energia térmica e elétrica do projeto. A energia elétrica gerada pelos módulos Seebeck está limitada à

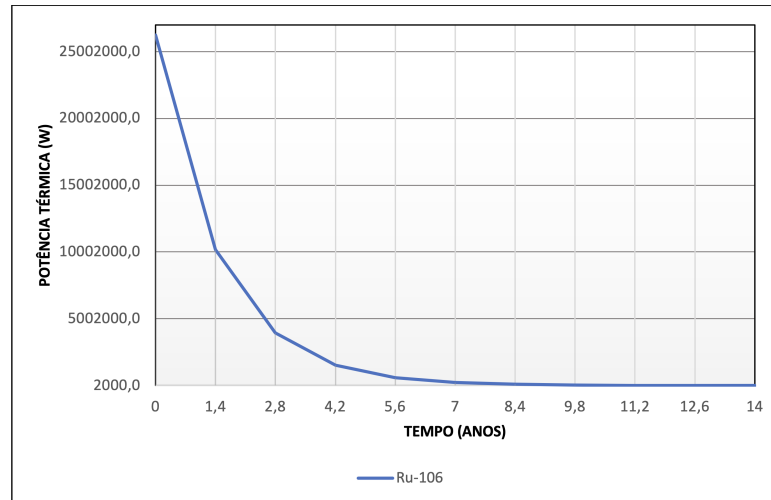


Figura 16 – Variação da potência térmica para o radioisótopo ^{106}Ru que possui decaimento beta, ao longo dos 14 anos.

entrada das energias térmicas emitidas pelos radioisótopos e pela eficiência na conversão da energia em forma de calor para elétrica e a máxima capacidade de cada módulo que é de 8,15 W. É possível observar que o número total de módulos é obtido como $NT = NP \cdot NS$ onde a principal condição é que $NS > NP$. Portanto, o resultado NT considera a resistência, tensão e corrente necessárias para o circuito. Para este projeto onde a potência elétrica final deverá ser de 125 W o número mínimo de módulos deverá ser $NT = 16$.

O símbolo positivo nos valores da Tabela 18, indica que há um ganho de potência e o negativo uma perda de potência entre as condições inicial e final, onde ΔEP é a variação da potência elétrica e ΔTP é a variação da potência térmica. O radioisótopo filho do ^{232}U , o ^{228}Th também contribui com a energia elétrica e térmica, portanto, as variações no final da vida útil são maiores do que no início da mesma. Por outro lado, o ^{241}Am é o radioisótopo que apresenta menores perdas de energia elétrica e térmica, o que significa que pode ser utilizado por mais tempo.

Na Tabela 17 é possível observar que as potências elétricas no tempo $t = 14$ anos estão próximas de 125 W, com exceção do $^{232}\text{UO}_2$ devido à formação do radioisótopo ^{228}Th , que também contribui para a potência térmica. Outras exceções podem ser observadas pelos radioisótopos que possuem um número de módulos Seebeck NT acima de 200, que é o caso do ^{106}Ru , SrTiO_3 , CsCl e Pm_2O_3 que tem valores acima de 130 W, isto é devido as aproximações consideradas nos cálculos no programa MATLAB. Para as potências elétricas maiores do que o necessário de 125 W, isso não influencia no desempenho do circuito, pois existem dispositivos eletrônicos que ajustam esses valores à potência nominal. Para o caso do ^{106}Ru com valor de com valor de 767,47 W e Pm_2O_3 com valor de 137,90 W calculados pelo programa MATLAB é bem acima de 125 W, necessário informar que não é possível produzir ao final dos 14 anos de vida útil, devido às limitações da potência térmica emitida, de $2000W_{th}$ e da eficiência na conversão para elétrica, de 6,25%. Desta forma foi

Tabela 18 – Informações dos módulos Seebeck e variações de potência elétrica e térmica.

Composto	Módulos Seebeck			P(0 anos) (W)	P(14 anos) (W)	ΔEP (W)	ΔTP (W _{th})
	Total	Série	Paralelo				
²³² UO ₂	18	6	3	125	220,1	+95,1	+1520,8
²³⁸ PuO ₂	24	6	3	142,1	126,7	-15,4	-233,9
²⁴¹ AmO ₂	56	14	4	129,5	127,3	-2,2	-45,4
²⁴³ CmO ₂	18	6	3	146,6	125,8	-20,8	-791,6
²⁴⁴ CmO ₂	18	6	3	146,6	125,8	-20,8	-1418,8
Co-nat	56	14	4	456,4	127,3	-329,11	-10604,7
SrTiO ₃	200	25	8	175,1	130,8	-44,3	-802,3
Ru-nat	1.425.000	1.900	750	1640466,7	125	-1640341,7	-26245466,6
CsCl	270	18	15	172,6	125	-42,05	-760,9
Pm ₂ O ₃	740	37	20	5046,8	137,9	-4921,8	-78748,6
Pb-nat	18	6	3	146,7	125,8	-20,9	-1091

considerado o valor máximo de 125 W corrigidos na Tabela 18. Utilizando a Figura 17, é possível mostrar a variação das potências elétricas dos radioisótopos com decaimento alfa. Sendo que para os radioisótopos ²³²U + ²²⁸Th, ²⁴³Cm e ²⁴⁴Cm será necessário usar um limitante para o valor da potência elétrica devido a quantidade de módulos Seebeck utilizados. Caso fosse utilizado uma quantidade maior destes módulos, montando uma estrutura maior ao redor dos cilindros dos radioisótopos, isso afastaria as placas Seebeck da fonte de calor, reduzindo a potência produzida.

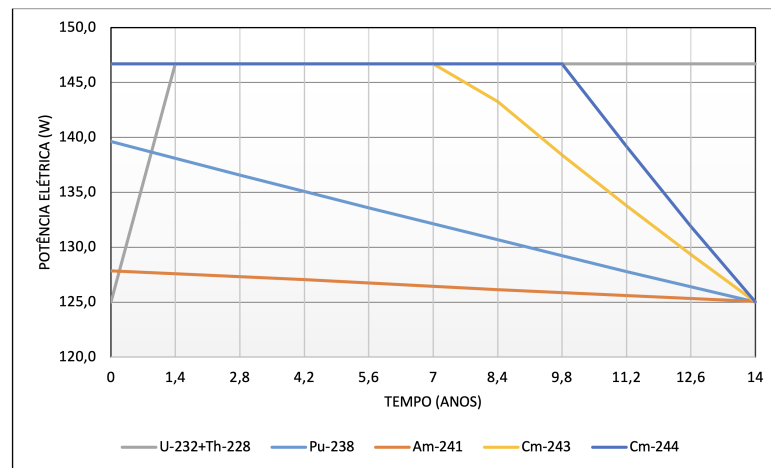


Figura 17 – Variação da potência elétrica para os radioisótopos que possuem decaimento alfa.

Para os radioisótopos com decaimento β^- , é possível mostrar a variação das potências elétricas nas Figuras 18, 19 e 20. A linha do ⁶⁰Co na Figura 18, indica que também existe um limitante no valor da potência elétrica para este radioisótopo, devido a quantidade de módulos Seebeck necessários. De forma similar ao caso anterior o aumento destes módulos, montando uma estrutura maior ao redor dos cilindros dos radioisótopos, afastaria as placas Seebeck da fonte de calor, reduzindo a potência emitida.

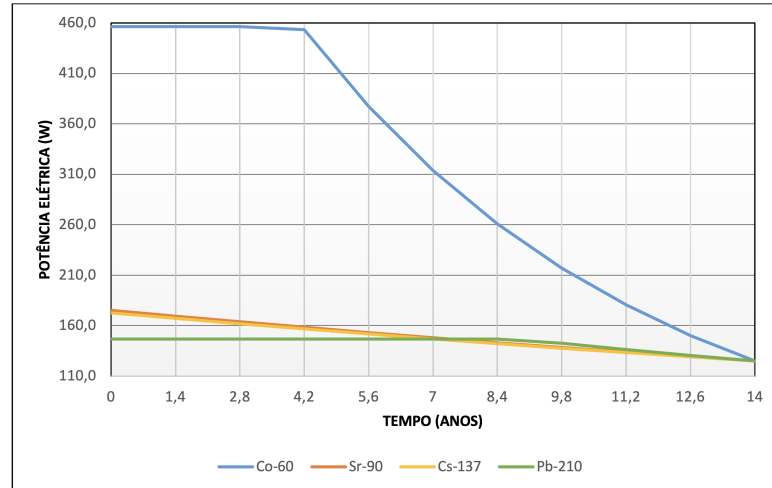


Figura 18 – Variação da potência elétrica para alguns radioisótopos que possuem decaimento beta.

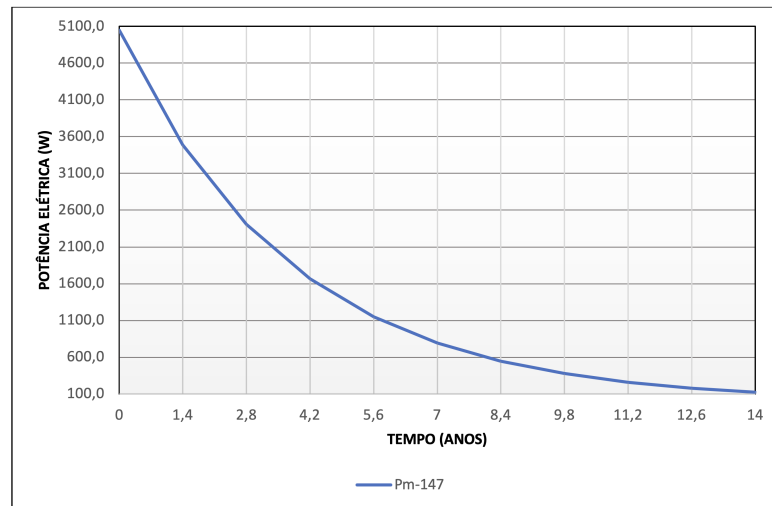


Figura 19 – Variação da potência elétrica para o radioisótopo ^{147}Pm que possui decaimento beta.

Por último, é necessário calcular a viabilidade econômica do projeto da bateria GTR. Este cálculo é realizado multiplicando a massa de cada radioisótopo pelo seu custo de produção por grama US\$/g. A [Tabela 19](#) mostra a quantidade de massa necessária para produzir 2kW_{th} de energia térmica e 125 W de energia elétrica por 14 anos. Portanto, existem vários radioisótopos com custos mais baixos que do ^{238}Pu , que foi utilizado como referência.

Na [Tabela 15](#) é possível verificar o formato, quantidade de módulos Seebeck e sua distribuição em série e paralelo. Dentre os quais foram encontrados valores para a utilização de cada radioisótopo, sendo os maiores o Ru-nat com 1.425.000 módulos Seebeck e Pm_2O_3 com 740 módulos Seebeck. Isso se deve ao fato de ambos terem um tempo de meia vida curto, necessitando de grandes quantidades de massa e altos volumes. Isso implica em uma bateria com uma profundidade de 570.000 m para Ru-nat e de 296 m para Pm_2O_3

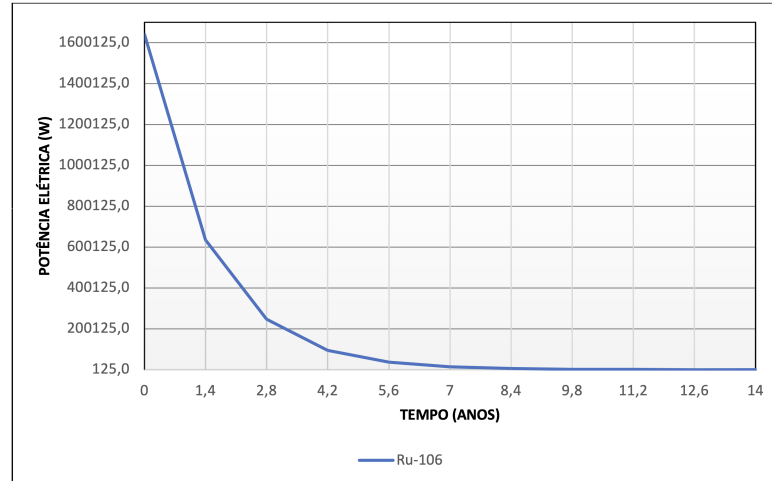


Figura 20 – Variação da potência elétrica para o radioisótopo ^{106}Ru que possui decaimento beta.

Tabela 19 – Valores no custo de produção para cada radioisótopo.

Radioisótopo	Composto	Decaimento	massa (kg)	Custo unitário (US\$/kg)	Custo Total (US\$)
^{232}U	UO_2	alfa	2,86	1.540.000,00	4.399.472,00
^{238}Pu	PuO_2	alfa	4,02	1.968.000,00	7.913.328,00
^{241}Am	AmO_2	alfa	18,85	1.400.000,00	26.383.000,00
^{243}Cm	$^{243}\text{CmO}_2$	alfa	1,71	*1.000.000,00	1.706.000,00
^{244}Cm	$^{244}\text{CmO}_2$	alfa	1,23	1.000.000,00	1.231.000,00
^{60}Co	Co-nat	beta	17,74	570.000,00	10.113.339,00
^{90}Sr	SrTiO_3	beta	18,81	14.000,00	263.337,20
^{106}Ru	Ru-nat	beta	$103,35 \times 10^3$	1850	191.200.914,18
^{137}Cs	CsCl	beta	28,94	9000	260.450,10
^{147}Pm	Pm_2O_3	beta	196,02	30000	5.880.687,00
^{210}Pb	Pb-nat	beta	1,29	**9.213.000.000,00	11.847.918.000,00

Os cálculos acima foram realizados para fornecer uma bateria GTR que irá fornecer 125 we e 2 kW_{th}.

* Não foi encontrado referência para o valor de ^{243}Cm , portanto adotado o mesmo valor de ^{244}Cm .

** Custo não encontrado para ^{210}Pb , foi realizado estimativa com base na proporção produzida e custos de produção de outros radioisótopos.

Fonte: [Prelas et al. \(2016\)](#), [Hammel et al. \(2016\)](#), [Zoui et al. \(2020\)](#), [Thompson e Cunningham \(1956\)](#), [LNHB \(2022\)](#).

tornando o dispositivo inviável em relação às dimensões projetadas.

Importante informar que este trabalho não considera as técnicas e processos de recuperação na quantidade de massa necessária para o projeto. Além da redução na eficiência dos módulos Seebeck quando utilizados por longos períodos.

Este trabalho estuda projetos com módulos Seebeck na construção de baterias GTR para exploração espacial utilizando radioisótopos com as mesmas características do ^{238}Pu e a viabilidade econômica em termos de custo de produção dos radioisótopos analisados. Normalmente, os artefatos espaciais que utilizam GTR são projetados para uma vida útil

entre 14 e 25 anos, de acordo com cada uso ([BOARD SPACE STUDIES *et al.*, 2009](#); [WERNER *et al.*, 2016](#)). Portanto, é possível perceber que Radioisótopos alternativos para ^{238}Pu possuem preços mais baixos e utilizam menores quantidades de módulos Seebeck.

5 CONCLUSÕES DE DISCUSSÃO

É possível ter uma visão clara no funcionamento do projeto descrevendo o funcionamento do mecanismo que gera a energia térmica a partir do decaimento radioativo alfa e β^- utilizando as massas dos radioisótopos. Também foi descrito o mecanismo eletrônico que realiza a conversão térmica/elétrica, o termopar com o efeito Seebeck. Os cálculos são teóricos e não levam em conta o desgaste nos equipamentos eletrônicos causados pela radiação das partículas energéticas. A baixa eficiência na conversão da energia térmica em elétrica somente é viável economicamente em projetos com baterias nucleares utilizadas em condições específicas como a exploração espacial, onde os investimentos são muito altos. Em outras situações as baterias de lítio são altamente utilizadas.

Todos os radioisótopos tiveram os cálculos realizados, mas algumas restrições devem ser apontadas, como o radioisótopo Ru-nat que precisa de uma massa muito grande de 103,4 t, com 1.425.000 módulos Seebeck e bateria com 570.000 m de profundidade. Para o Pm_2O_3 , com massa de 196 kg com 740 módulos Seebeck e bateria com profundidade de 296 m. Isso torna inviável a fabricação de baterias com estes dois radioisótopos.

Nas questões que envolvem custo de produção, tornam a utilização do composto Pb-nat inviável devido ao alto custo de produção do ^{210}Pb . Desta forma, restam 5 radioisótopos que possuem viabilidade na construção, com decaimento alfa: ^{232}U , ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{243}Cm , ^{244}Cm , e 3 radioisótopos com decaimento β^- : ^{60}Co , ^{90}Sr e ^{137}Cs .

Com o ^{241}Am teremos um custo de US\$ 26.383.000,00, bem mais elevado que os demais radioisótopos, mas que mantém uma potência quase constante ao longo dos 14 anos, embora possua uma das maiores massas com 18,8 kg. Para o ^{90}Sr com custo de US\$ 263.337,20 e ^{137}Cs com custo de US\$ 260.450,10 são os mais viáveis economicamente. Por outro lado, ^{232}U possui a menor massa e volume necessários, tornando uma boa opção também.

O melhor radioisótopo levando em consideração as avaliações feitas neste trabalho é o ^{90}Sr , no formato SrTiO_3 . Além de possuir um dos menores custos (US\$ 263.337,20), terá um volume no cilindro com $8,56 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ com módulos em formato decagonal com arestas de $4 \times 10^{-3} \text{ m}$ e altura de $80 \times 10^{-3} \text{ m}$. Caso uma baixa dimensão seja essencial para o projeto da bateria nuclear e os custos orçamentários não sejam uma restrição, poderão ser usados os radioisótopos ^{243}Cm e ^{244}Cm no formato CmO_2 pois possuem as menores massas e volumes. Sendo que o projeto da fonte de calor terá um formato hexagonal com arestas de $4 \times 10^{-3} \text{ m}$ e com uma profundidade de $12 \times 10^{-3} \text{ m}$.

Uma informação importante a considerar também é que a superfície dos radioisótopos pode atingir temperaturas muito altas que poderia danificar os circuitos termopares e por isso a necessidade destes radioisótopos estarem em formato de compostos para produzir

uma temperatura que seja suportada pelos circuitos eletrônicos. Além disso, devido a espessura dos módulos Seebeck apresentados neste trabalho (3,5 mm), a distância entre a superfície que recebe a temperatura quente e a superfície que recebe a temperatura fria é muito reduzida, assim projetos do dissipador de calor do lado frio pode ser um problema de engenharia bastante desafiador. Por outro lado, os compostos com óxidos podem formar gases, e a eliminação deles deve ser levada em conta nos projetos.

Conforme informado no item 3.4, os compostos foram considerados como formados pelos radioisótopos puros, ou seja, 100% das massas dos radioisótopos, sem participação de outros isótopos. Como a maioria deles possuem pureza acima de 85%, os cálculos podem ser aproximados, mas para os radioisótopos ^{137}Cs e ^{60}Co , caso faça opção por utilização, os cálculos devem ser refeitos com os valores reais das purezas.

Para trabalhos futuros, existe uma grande abertura para desenvolvimento de novos trabalhos nesta linha, como a criação e ensaios físicos na construção das baterias RTG com a utilização dos radioisótopos mais acessíveis. Pode-se utilizar combustível retirado diretamente do reator, por questões de sustentabilidade, ao aproveitar os resíduos. Em um trabalho futuro é possível calcular as estruturas metálicas para refrigeração e contenção das partículas radioativas que podem ser geradas.

REFERÊNCIAS

- BOARD SPACE STUDIES *et al.* **Radioisotope power systems: an imperative for maintaining US leadership in space exploration.** Washington D.C.: National Academies Press, 2009.
- FERROTEC CORPORATION. Thermoelectric Technical Reference. 2020. Disponível em: <<https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref13/>>. Acesso em: 05/06/2022.
- GAULD, I. C. *et al.* Isotopic depletion and decay methods and analysis capabilities in SCALE. **Nuclear Technology**, Taylor & Francis, v. 174, n. 2, p. 169–195, 2011.
- GUSEV, V. *et al.* Milliwatt-power radioisotope thermoelectric generator (RTG) based on plutonium-238. **Journal of electronic materials**, Springer, v. 40, n. 5, p. 807–811, 2011.
- HAMMEL, T. *et al.* Evolutionary upgrade for the multi-mission radioisotope thermoelectric generator (MMRTG). In: IEEE. **2016 IEEE Aerospace Conference**. [S.l.], 2016. p. 1–8.
- KHAMIL, K. *et al.* Modelling and simulation of the performance analysis for Peltier module and Seebeck module using MATLAB/Simulink. **Jurnal Kejuruteraan**, v. 32, n. 2, p. 231–238, 2020.
- LABORATORIE NATIONAL HENRI BECQUEREL. **Table de Radionucléides**. 2022. Disponível em: <http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Co-60_tables.pdf>. Acesso em: 11 de Novembro de 2022.
- MAIDANA, C. O. Thermo-magnetic systems for space nuclear reactors. **SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology**, Springer International Publishing, Cham, Springer, p. 53, 2014.
- MANGENG, C. A.; THAYER, G. R. **Beneficial uses of 241 Am**. Los Alamos, 1984.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Interstellar Mission: Voyager 1. Maryland, 2020. Disponível em: <<https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref13/>>. Acesso em: 05/06/2022.
- PRELAS, M. *et al.* **Nuclear batteries and radioisotopes**. New York: Springer, 2016.
- RAGHEB, M. Course of Nuclear Power Engineering - NPPE 402/ Chapter 3 - Radioisotopes. Illinois at Urbana-Champaign, Department: Nuclear, Plasma and Radiological Engineering, University of Illinois., 2021. Disponível em: <<https://mragheb.com/NPRE%20402%20ME%20405%20Nuclear%20Power%20Engineering/Radioisotopes%20Power%20Production.pdf>>. Acesso em: 09/08/2022.
- ROHRMANN, C. **Radioisotopic heat sources. Revision 1**. Richland, WA (USA), 1963.
- THERMOELECTRIC, C. 1261G-7L31-04CQ ThermoElectric Generator 40 × 40mm. Maryland, 2020. Disponível em: <<https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref13/>>. Acesso em: 05/06/2022.

THOMPSON, G. S.; CUNNINGHAM, B. Production of Curium 243. United States Patent Office, Patente nº US2741627A, 1956.

WERNER, J. *et al.* A multi-mission radioisotope thermoelectric generator (MMRTG) for Mars 2020. In: IEEE. **2017 IEEE Aerospace Conference**. [S.l.], 2017. p. 1–6.

WERNER, J. E. *et al.* **Cost Comparison in 2015 Dollars for Radioisotope Power Systems—Cassini and Mars Science Laboratory**. [S.l.], 2016.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Nuclear Reactors and Radioisotopes for Space. London, 2021. Disponível em: <[NuclearReactorsandRadioisotopesforSpace](#)>. Acesso em: 05/06/2022.

ZOUI, M. A. *et al.* A review on thermoelectric generators: Progress and applications. **Energies**, MDPI, v. 13, n. 14, p. 3606, 2020.

APÊNDICE A – RADIOISÓTOPOS COM DECAIMENTO ALFA

a) Radioisótopo ^{232}U no formato UO_2

Conforme mostrado na [Tabela 15](#), será utilizada uma estrutura ED, com $\text{NT} = 18$, $\text{NS} = 6$, $\text{NP} = 3$. Sendo a energia térmica no ano zero:

$$Q_0 [^{232}\text{U}] = 2000 \text{ W}_{\text{Th}},$$

considerando rendimento de 6,25% na conversão de energia térmica em elétrica:

$$\text{PE} [^{232}\text{U}] = 2000 \cdot 6,25\% = 125 \text{ W}.$$

Como existem 18 módulos Seebeck, considerando a energia térmica e consequentemente a elétrica distribuídas de forma igual em todos os módulos:

$$\text{Energia por módulo } [^{232}\text{U}] = \frac{125}{18} = 6,94 \text{ W}.$$

Considerando a temperatura externa como um valor de $T_c = 25^\circ\text{C}$, utilizando o gráfico watts \times tensão ([THERMOELECTRIC, 2020](#)), encontramos como referência $T_h = 268^\circ\text{C}$, mas não é possível provar isso, é apenas uma referência para encontrar os valores da tensão, corrente e resistência elétricas dos módulos na mesma referência ([THERMOELECTRIC, 2020](#)):

- $V = 4,61 \text{ V}$;
- $I = 1,51 \text{ A}$;
- $R_{\text{eq}} = 2,75 \Omega$.

Montando estes módulos conforme $\text{NT} = 18$, $\text{NS} = 6$, $\text{NP}=3$, no ano zero têm-se os seguintes valores:

$$\begin{aligned}
 V_0 &= 4,61 \cdot 6 = 27,66 \text{ V}; \\
 i_0 &= 1,51 \cdot 3 = 4,53 \text{ A}; \\
 P_0 &= V_0 \cdot i_0 = 27,66 \cdot 4,53 = 125,3 \text{ W}; \\
 R_{\text{eq}} &= \frac{NS}{NP} \cdot RM = \frac{6}{3} \cdot 2,75 = 5,5 \Omega.
 \end{aligned}$$

A energia térmica no ano 14:

$$Q_0 [^{232}\text{U}] = 3520,9 \text{ W}_{\text{Th}},$$

considerando rendimento de 6,25% na conversão de energia térmica em elétrica:

$$PE [^{232}\text{U}] = 3520,9 \cdot 6,25\% = 220,06 \text{ W}$$

$$\begin{aligned}
 V_0 &= V \cdot NS \\
 i_0 &= I \cdot NP \\
 P_0 &= V_0 \cdot i_0 \\
 R_{\text{eq}} &= \frac{NS}{NP}.
 \end{aligned}$$

Como existem 18 módulos Seebeck, considerando a energia térmica e consequentemente a elétrica distribuídas de forma igual em todos os módulos:

$$\text{Energia por módulo } [^{232}\text{U}] = \frac{220,06}{18} = 12,23 \text{ W}.$$

Mas como a capacidade máxima de cada módulo é de 8,15 W, conforme a [Tabela 5](#):

- $V = 5,052 \text{ V};$
- $I = 1,608 \text{ A};$
- $R_{\text{eq}} = 2,9 \Omega.$

Montando estes módulos conforme $NT = 18$, $NS = 6$, $NP = 3$, no ano 14 teremos os seguintes valores:

$$\begin{aligned}
 V_0 &= 4,61 \cdot 6 = 30,31 \text{ V}; \\
 i_0 &= 1,608 \cdot 3 = 4,82 \text{ A}; \\
 P_0 &= V_0 \cdot i_0 = 30,31 \cdot 4,82 = 146,09 \text{ W}; \\
 R_{\text{eq}} &= \frac{NS}{NP} \cdot RM = \frac{6}{3} \cdot 2,9 = 5,8 \Omega.
 \end{aligned}$$

b) Radioisótopo ^{238}Pu no formato PuO_2

Conforme mostrado na [Tabela 15](#), será utilizada uma estrutura EE, com $NT = 24$, $NS = 6$, $NP = 4$. Sendo a energia térmica no ano zero:

$$Q_0 [^{238}\text{Pu}] = 2233,9 \text{ W}_{\text{Th}},$$

considerando rendimento de 6,25% na conversão de energia térmica em elétrica:

$$PE [^{238}\text{Pu}] = 2233,9 \cdot 6,25\% = 139,6 \text{ W}.$$

Como existem 24 módulos Seebeck e considerando a energia térmica e em consequência a elétrica distribuída de forma igual em todos os módulos:

$$\text{Energia por módulo } [^{238}\text{Pu}] = \frac{139,6}{24} = 5,82 \text{ W}.$$

Considerando a temperatura externa como um valor de $T_c = 25^\circ\text{C}$, utilizando o gráfico watts \times tensão ([THERMOELECTRIC, 2020](#)), encontramos como referência $T_h = 240^\circ\text{C}$, mas não é possível provar isso, é apenas uma referência para encontrar os valores da tensão, corrente e resistência elétricas dos módulos na mesma referência ([THERMOELECTRIC, 2020](#)):

- $V = 4,15 \text{ V}$;
- $I = 1,4 \text{ A}$;
- $R_{\text{eq}} = 2,73 \Omega$.

Montando estes módulos conforme $NT = 24$, $NS = 6$, $NP = 4$, no ano zero têm-se

os seguintes valores:

$$\begin{aligned}V_0 &= 4,15 \cdot 6 = 24,9 \text{ V}; \\i_0 &= 1,4 \cdot 4 = 5,6 \text{ A}; \\P_0 &= V_0 \cdot i_0 = 24,9 \cdot 5,6 = 125,3 \text{ W}; \\R_{\text{eq}} &= \frac{NS}{NP} \cdot RM = \frac{6}{4} \cdot 2,75 = 4,1 \Omega.\end{aligned}$$

Calculando a energia térmica no ano 14:

$$Q_0 [^{238}\text{Pu}] = 2000 \text{ W}_{\text{Th}},$$

considerando rendimento de 6,25% na conversão de energia térmica em elétrica:

$$PE [^{238}\text{Pu}] = 2000 \cdot 6,25\% = 125 \text{ W}.$$

Como existem 24 módulos Seebeck, considerando a energia térmica e consequentemente a elétrica distribuídas de forma igual em todos os módulos:

$$\text{Energia por módulo } [^{238}\text{Pu}] = \frac{125}{24} = 5,21 \text{ W}.$$

Considerando a temperatura externa como um valor de $T_c = 25^\circ\text{C}$, utilizando o gráfico watts \times tensão ([THERMOELECTRIC, 2020](#)), encontramos como referência $T_h = 230^\circ\text{C}$, mas não é possível provar isso, é apenas uma referência para encontrar os valores da tensão, corrente e resistência elétricas dos módulos na mesma referência ([THERMOELECTRIC, 2020](#)):

- $V = 4,01 \text{ V}$;
- $I = 1,3 \text{ A}$;
- $R_{\text{eq}} = 2,7 \Omega$.

Montando estes módulos conforme $NT = 24$, $NS = 6$, $NP = 4$, no ano 14 teremos

os seguintes valores:

$$\begin{aligned}V_0 &= 4,61 \cdot 6 = 24 \text{ V}; \\i_0 &= 1,3 \cdot 4 = 5,2 \text{ A}; \\P_0 &= V_0 \cdot i_0 = 24 \cdot 5,2 = 124,8 \text{ W}; \\R_{\text{eq}} &= \frac{NS}{NP} \cdot RM = \frac{6}{4} \cdot 2,7 = 4,05 \Omega.\end{aligned}$$

c) Radioisótopo ^{241}Am no formato AmO_2

Conforme mostrado na [Tabela 15](#), será utilizada uma estrutura EI, com $NT = 56$, $NS = 14$, $NP = 4$. Sendo a energia térmica no ano zero:

$$Q_0 [^{241}\text{Am}] = 2045,4 \text{ W}_{\text{Th}},$$

considerando rendimento de 6,25% na conversão de energia térmica em elétrica:

$$PE [^{241}\text{Am}] = 2045,4 \cdot 6,25\% = 127,8 \text{ W}.$$

Como existem 56 módulos Seebeck e considerando a energia térmica e em consequência a elétrica distribuída de forma igual em todos os módulos:

$$\text{Energia por módulo } [^{241}\text{Am}] = \frac{127,8}{56} = 2,28 \text{ W}.$$

Considerando a temperatura externa como um valor de $T_c = 25^\circ\text{C}$, utilizando o gráfico watts \times tensão ([THERMOELECTRIC, 2020](#)), encontramos como referência $T_h = 147^\circ\text{C}$, mas não é possível provar isso, é apenas uma referência para encontrar os valores da tensão, corrente e resistência elétricas dos módulos na mesma referência ([THERMOELECTRIC, 2020](#)):

- $V = 2,53 \text{ V}$;
- $I = 0,9 \text{ A}$;
- $R_{\text{eq}} = 2,46 \Omega$.

Montando estes módulos conforme $NT = 56$, $NS = 14$, $NP = 4$, no ano zero têm-se os seguintes valores:

$$\begin{aligned}
 V_0 &= 2,53 \cdot 14 = 35,4 \text{ V}; \\
 i_0 &= 0,9 \cdot 4 = 3,6 \text{ A}; \\
 P_0 &= V_0 \cdot i_0 = 35,4 \cdot 3,6 = 127,4 \text{ W}; \\
 R_{\text{eq}} &= \frac{NS}{NP} \cdot RM = \frac{16}{4} \cdot 2,46 = 9,84 \Omega.
 \end{aligned}$$

Calculando a energia térmica no ano 14:

$$Q_0 [^{241}\text{Am}] = 2000 \text{ W}_{\text{Th}},$$

considerando rendimento de 6,25% na conversão de energia térmica em elétrica:

$$PE [^{241}\text{Am}] = 2000 \cdot 6,25\% = 125 \text{ W}.$$

Como existem 56 módulos Seebeck, considerando a energia térmica e consequentemente a elétrica distribuídas de forma igual em todos os módulos:

$$\text{Energia por módulo } [^{241}\text{Am}] = \frac{125}{56} = 2,23 \text{ W}.$$

Considerando a temperatura externa como um valor de $T_c = 25^\circ\text{C}$, utilizando o gráfico watts \times tensão ([THERMOELECTRIC, 2020](#)), encontramos como referência $T_h = 145^\circ\text{C}$, mas não é possível provar isso, é apenas uma referência para encontrar os valores da tensão, corrente e resistência elétricas dos módulos na mesma referência ([THERMOELECTRIC, 2020](#)):

- $V = 2,48 \text{ V}$;
- $I = 0,9 \text{ A}$;
- $R_{\text{eq}} = 2,42 \Omega$.

Montando estes módulos conforme $NT = 56$, $NS = 14$, $NP = 4$, no ano 14 teremos os seguintes valores:

$$\begin{aligned}
 V_0 &= 2,48 \cdot 14 = 34,7 \text{ V}; \\
 i_0 &= 0,9 \cdot 4 = 3,6 \text{ A}; \\
 P_0 &= V_0 \cdot i_0 = 34,7 \cdot 3,6 = 124,8 \text{ W}; \\
 R_{\text{eq}} &= \frac{NS}{NP} \cdot RM = \frac{16}{4} \cdot 2,42 = 9,68 \Omega.
 \end{aligned}$$

d) Radioisótopo ^{243}Cm no formato CmO_2

Conforme mostrado na [Tabela 15](#), será utilizada uma estrutura ED, com $NT = 18$, $NS = 6$, $NP = 3$. Sendo a energia térmica no ano zero:

$$Q_0 [^{243}\text{Cm}] = 2791,6 \text{ W}_{\text{Th}},$$

considerando rendimento de 6,25% na conversão de energia térmica em elétrica:

$$PE [^{243}\text{Cm}] = 2791,6 \cdot 6,25\% = 174,5 \text{ W}.$$

Como existem 18 módulos Seebeck e considerando a energia térmica e em consequência a elétrica distribuída de forma igual em todos os módulos:

$$\text{Energia por módulo } [^{243}\text{Cm}] = \frac{174,5}{18} = 9,7 \text{ W}.$$

Mas como a capacidade máxima de cada módulo é de 8,15 W, conforme a [Tabela 5](#):

- $V = 5,052 \text{ V}$;
- $I = 1,608 \text{ A}$;
- $R_{\text{eq}} = 2,9 \Omega$.

Montando estes módulos conforme $NT = 18$, $NS = 6$, $NP = 3$, no ano zero têm-se os seguintes valores:

$$\begin{aligned}
 V_0 &= 5,052 \cdot 6 = 30,31 \text{ V}; \\
 i_0 &= 1,608 \cdot 3 = 4,82 \text{ A}; \\
 P_0 &= V_0 \cdot i_0 = 30,31 \cdot 4,82 = 146,09 \text{ W}; \\
 R_{\text{eq}} &= \frac{NS}{NP} \cdot RM = \frac{6}{3} \cdot 2,9 = 5,8\Omega.
 \end{aligned}$$

Calculando a energia térmica no ano 14:

$$Q_0 [^{243}\text{Cm}] = 2000 W_{\text{Th}},$$

considerando rendimento de 6,25% na conversão de energia térmica em elétrica:

$$PE [^{243}\text{Cm}] = 2000 \cdot 6,25\% = 125 \text{ W}.$$

Como existem 18 módulos Seebeck, considerando a energia térmica e consequentemente a elétrica distribuídas de forma igual em todos os módulos:

$$\text{Energia por módulo } [^{243}\text{Cm}] = \frac{125}{18} = 6,94 \text{ W}.$$

Considerando a temperatura externa como um valor de $T_c = 25^\circ\text{C}$, utilizando o gráfico watts \times tensão ([THERMOELECTRIC, 2020](#)), encontramos como referência $T_h = 268^\circ\text{C}$, mas não é possível provar isso, é apenas uma referência para encontrar os valores da tensão, corrente e resistência elétricas dos módulos na mesma referência ([THERMOELECTRIC, 2020](#)):

- $V = 4,61 \text{ V}$;
- $I = 1,51 \text{ A}$;
- $R_{\text{eq}} = 2,75 \Omega$.

Montando estes módulos conforme $NT = 18$, $NS = 6$, $NP = 3$, no ano 14 teremos os seguintes valores:

$$\begin{aligned}
 V_0 &= 4,61 \cdot 6 = 27,66 \text{ V}; \\
 i_0 &= 1,51 \cdot 3 = 4,53 \text{ A}; \\
 P_0 &= V_0 \cdot i_0 = 27,66 \cdot 4,53 = 125,3 \text{ W}; \\
 R_{\text{eq}} &= \frac{NS}{NP} \cdot RM = \frac{6}{3} \cdot 2,75 = 5,5 \Omega.
 \end{aligned}$$

e) Radioisótopo ^{244}Cm no formato CmO_2

Conforme mostrado na [Tabela 15](#), será utilizada uma estrutura ED, com $NT = 18$, $NS = 6$, $NP = 3$. Sendo a energia térmica no ano zero:

$$Q_0 [^{244}\text{Cm}] = 3418,8 \text{ W}_{\text{Th}},$$

considerando rendimento de 6,25% na conversão de energia térmica em elétrica:

$$PE [^{244}\text{Cm}] = 3418,8 \cdot 6,25\% = 213,7 \text{ W}.$$

Como existem 18 módulos Seebeck e considerando a energia térmica e em consequência a elétrica distribuída de forma igual em todos os módulos:

$$\text{Energia por módulo } [^{244}\text{Cm}] = \frac{213,7}{18} = 9,7 \text{ W}.$$

Mas como a capacidade máxima de cada módulo é de 8,15 W, conforme a [Tabela 5](#):

- $V = 5,052 \text{ V}$;
- $I = 1,608 \text{ A}$;
- $R_{\text{eq}} = 2,9 \Omega$.

Montando estes módulos conforme $NT = 18$, $NS = 6$, $NP = 3$, no ano zero têm-se os seguintes valores:

$$\begin{aligned}
 V_0 &= 5,052 \cdot 6 = 30,31 \text{ V}; \\
 i_0 &= 1,608 \cdot 3 = 4,82 \text{ A}; \\
 P_0 &= V_0 \cdot i_0 = 30,31 \cdot 4,82 = 146,09 \text{ W}; \\
 R_{\text{eq}} &= \frac{NS}{NP} \cdot RM = \frac{6}{3} \cdot 2,9 = 5,8\Omega.
 \end{aligned}$$

Calculando a energia térmica no ano 14:

$$Q_0 [^{244}\text{Cm}] = 2000 \text{ W}_{\text{Th}},$$

considerando rendimento de 6,25% na conversão de energia térmica em elétrica:

$$PE [^{244}\text{Cm}] = 2000 \cdot 6,25\% = 125 \text{ W}$$

Como existem 18 módulos Seebeck, considerando a energia térmica e consequentemente a elétrica distribuídas de forma igual em todos os módulos:

$$\text{Energia por módulo } [^{244}\text{Cm}] = \frac{125}{18} = 6,94 \text{ W}.$$

Considerando a temperatura externa como um valor de $T_c = 25^\circ\text{C}$, utilizando o gráfico watts \times tensão ([THERMOELECTRIC, 2020](#)), encontramos como referência $T_h = 268^\circ\text{C}$, mas não é possível provar isso, é apenas uma referência para encontrar os valores da tensão, corrente e resistência elétricas dos módulos na mesma referência ([THERMOELECTRIC, 2020](#)):

- $V = 4,61 \text{ V}$;
- $I = 1,51 \text{ A}$;
- $R_{\text{eq}} = 2,75 \Omega$.

Montando estes módulos conforme $NT = 18$, $NS = 6$, $NP = 3$, no ano 14 teremos os seguintes valores:

$$V_0 = 4,61 \cdot 6 = 27,66 \text{ V};$$

$$i_0 = 1,51 \cdot 3 = 4,53 \text{ A};$$

$$P_0 = V_0 \cdot i_0 = 27,66 \cdot 4,53 = 125,3 \text{ W};$$

$$R_{\text{eq}} = \frac{NS}{NP} \cdot R_M = \frac{6}{3} \cdot 2,75 = 5,5 \Omega.$$

APÊNDICE B – RADIOISÓTOPOS COM DECAIMENTO BETA

a) Radioisótopo ^{60}Co no formato natural

Conforme mostrado na [Tabela 15](#), será utilizada uma estrutura ED, com $NT = 56$, $NS = 14$, $NP = 4$. Sendo a energia térmica no ano zero:

$$Q_0 [^{60}\text{Co}] = 12604,7 \text{ W}_{\text{Th}},$$

considerando rendimento de 6,25% na conversão de energia térmica em elétrica:

$$PE [^{60}\text{Co}] = 12604,7 \cdot 6,25\% = 787,8 \text{ W}.$$

Como existem 56 módulos Seebeck e considerando a energia térmica e em consequência a elétrica distribuída de forma igual em todos os módulos:

$$\text{Energia por módulo } [^{60}\text{Co}] = \frac{787,8}{56} = 14,07 \text{ W}.$$

Mas como a capacidade máxima de cada módulo é de 8,15 W, conforme a [Tabela 5](#):

- $V = 5,052 \text{ V}$;
- $I = 1,608 \text{ A}$;
- $R_{\text{eq}} = 2,9 \Omega$.

Montando estes módulos conforme $NT = 56$, $NS = 14$, $NP = 4$, no ano zero têm-se os seguintes valores:

$$\begin{aligned} V_0 &= 5,052 \cdot 14 = 70,73 \text{ V}; \\ i_0 &= 1,608 \cdot 4 = 6,43 \text{ A}; \\ P_0 &= V_0 \cdot i_0 = 70,73 \cdot 6,43 = 458,4 \text{ W}; \\ R_{\text{eq}} &= \frac{NS}{NP} \cdot R_M = \frac{14}{4} \cdot 2,9 = 10,15 \Omega. \end{aligned}$$

Calculando a energia térmica no ano 14:

$$Q_0 [^{60}\text{Co}] = 2000 \text{ W}_{\text{Th}},$$

considerando rendimento de 6,25% na conversão de energia térmica em elétrica:

$$\text{PE} [^{60}\text{Co}] = 2000 \cdot 6,25\% = 125 \text{ W}$$

Como existem 56 módulos Seebeck, considerando a energia térmica e consequentemente a elétrica distribuídas de forma igual em todos os módulos:

$$\text{Energia por módulo } [^{60}\text{Co}] = \frac{125}{56} = 2,23 \text{ W}.$$

Considerando a temperatura externa como um valor de $T_c = 25^\circ\text{C}$, utilizando o gráfico watts \times tensão ([THERMOELECTRIC, 2020](#)), encontramos como referência $T_h = 145^\circ\text{C}$, mas não é possível provar isso, é apenas uma referência para encontrar os valores da tensão, corrente e resistência elétricas dos módulos na mesma referência ([THERMOELECTRIC, 2020](#)):

- $V = 2,48 \text{ V}$;
- $I = 0,9 \text{ A}$;
- $R_{\text{eq}} = 2,42 \Omega$.

Montando estes módulos conforme $NT = 56$, $NS = 14$, $NP = 4$, no ano 14 teremos os seguintes valores:

$$\begin{aligned} V_0 &= 2,48 \cdot 14 = 34,7 \text{ V}; \\ i_0 &= 0,9 \cdot 4 = 3,6 \text{ A}; \\ P_0 &= V_0 \cdot i_0 = 34,7 \cdot 3,6 = 124,9 \text{ W}; \\ R_{\text{eq}} &= \frac{NS}{NP} \cdot R_M = \frac{14}{4} \cdot 2,42 = 5,5 \Omega. \end{aligned}$$

b) Radioisótopo ^{90}Sr no formato SrTiO_3

Conforme mostrado na [Tabela 15](#), será utilizada uma estrutura EI, com $NT = 200$, $NS = 25$, $NP = 8$. Sendo a energia térmica no ano zero:

$$Q_0 [^{90}\text{Sr}] = 2802,3 \text{ W}_{\text{Th}},$$

considerando rendimento de 6,25% na conversão de energia térmica em elétrica:

$$PE [^{90}\text{Sr}] = 2802,3 \cdot 6,25\% = 175,14 \text{ W.}$$

Como existem 56 módulos Seebeck e considerando a energia térmica e em consequência a elétrica distribuída de forma igual em todos os módulos:

$$\text{Energia por módulo } [^{90}\text{Sr}] = \frac{175,14}{200} = 0,88 \text{ W.}$$

Considerando a temperatura externa como um valor de $T_c = 25^\circ\text{C}$, utilizando o gráfico watts \times tensão ([THERMOELECTRIC, 2020](#)), encontramos como referência $T_h = 95^\circ\text{C}$, mas não é possível provar isso, é apenas uma referência para encontrar os valores da tensão, corrente e resistência elétricas dos módulos na mesma referência ([THERMOELECTRIC, 2020](#)):

- $V = 1,54 \text{ V}$;
- $I = 0,57 \text{ A}$;
- $R_{eq} = 2,24 \Omega$.

Montando estes módulos conforme $NT = 200$, $NS = 25$, $NP = 8$, no ano zero têm-se os seguintes valores:

$$\begin{aligned} V_0 &= 1,54 \cdot 25 = 38,5 \text{ V}; \\ i_0 &= 0,57 \cdot 8 = 4,56 \text{ A}; \\ P_0 &= V_0 \cdot i_0 = 38,50 \cdot 4,56 = 175,6 \text{ W}; \\ R_{eq} &= \frac{NS}{NP} \cdot R_M = \frac{25}{8} \cdot 2,24 = 7 \Omega. \end{aligned}$$

Calculando a energia térmica no ano 14:

$$Q_0 [^{90}\text{Sr}] = 2000 W_{Th},$$

considerando rendimento de 6,25% na conversão de energia térmica em elétrica:

$$PE [^{90}\text{Sr}] = 2000 \cdot 6,25\% = 125 \text{ W.}$$

Como existem 56 módulos Seebeck, considerando a energia térmica e consequentemente a elétrica distribuídas de forma igual em todos os módulos:

$$\text{Energia por módulo } [{}^{90}\text{Sr}] = \frac{125}{200} = 0,63 \text{ W.}$$

Considerando a temperatura externa como um valor de $T_c = 25^\circ\text{C}$, utilizando o gráfico watts \times tensão ([THERMOELECTRIC, 2020](#)), encontramos como referência $T_h = 84^\circ\text{C}$, mas não é possível provar isso, é apenas uma referência para encontrar os valores da tensão, corrente e resistência elétricas dos módulos na mesma referência ([THERMOELECTRIC, 2020](#)):

- $V = 1,3 \text{ V}$;
- $I = 0,48 \text{ A}$;
- $R_{\text{eq}} = 2,18 \Omega$.

Montando estes módulos conforme $NT = 200$, $NS = 25$, $NP = 8$, no ano 14 teremos os seguintes valores:

$$\begin{aligned} V_0 &= 1,3 \cdot 25 = 32,5 \text{ V}; \\ i_0 &= 0,48 \cdot 8 = 3,84 \text{ A}; \\ P_0 &= V_0 \cdot i_0 = 32,5 \cdot 3,84 = 124,9 \text{ W}; \\ R_{\text{eq}} &= \frac{NS}{NP} \cdot R_M = \frac{25}{8} \cdot 2,18 = 6,81 \Omega. \end{aligned}$$

c) Radioisótopo ${}^{106}\text{Ru}$ no formato natural

Conforme mostrado na [Tabela 15](#), será utilizada uma estrutura EI, com $NT = 1425000$, $NS = 1900$, $NP = 750$. Sendo a energia térmica no ano zero:

$$Q_0 [{}^{106}\text{Ru}] = 26247466 \text{ W}_{\text{Th}},$$

considerando rendimento de 6,25% na conversão de energia térmica em elétrica:

$$PE [{}^{106}\text{Ru}] = 26247466 \cdot 6,25\% = 1640466,7 \text{ W.}$$

Como existem 56 módulos Seebeck e considerando a energia térmica e em consequência a elétrica distribuída de forma igual em todos os módulos:

$$\text{Energia por módulo } [^{106}\text{Ru}] = \frac{1640466,7}{1425000} = 1,15 \text{ W.}$$

Considerando a temperatura externa como um valor de $T_c = 25^\circ\text{C}$, utilizando o gráfico watts \times tensão ([THERMOELECTRIC, 2020](#)), encontramos como referência $T_h = 107^\circ\text{C}$, mas não é possível provar isso, é apenas uma referência para encontrar os valores da tensão, corrente e resistência elétricas dos módulos na mesma referência ([THERMOELECTRIC, 2020](#)):

- $V = 1,77 \text{ V}$;
- $I = 0,65 \text{ A}$;
- $R_{\text{eq}} = 2,3 \Omega$.

Montando estes módulos conforme $NT = 1425000$, $NS = 1900$, $NP = 750$, no ano zero têm-se os seguintes valores:

$$\begin{aligned} V_0 &= 1,77 \cdot 1900 = 3363 \text{ V}; \\ i_0 &= 0,65 \cdot 750 = 487,5 \text{ A}; \\ P_0 &= V_0 \cdot i_0 = 3363 \cdot 4,56 = 1639462,5 \text{ W}; \\ R_{\text{eq}} &= \frac{NS}{NP} \cdot RM = \frac{1900}{750} \cdot 2,3 = 5,83 \Omega. \end{aligned}$$

Calculando a energia térmica no ano 14:

$$Q_0 [^{106}\text{Ru}] = 2000 W_{\text{Th}},$$

considerando rendimento de 6,25% na conversão de energia térmica em elétrica:

$$PE [^{106}\text{Ru}] = 2000 \cdot 6,25\% = 125 \text{ W.}$$

Como existem 56 módulos Seebeck, considerando a energia térmica e consequentemente a elétrica distribuídas de forma igual em todos os módulos:

$$\text{Energia por módulo } [^{106}\text{Ru}] = \frac{125}{1425000} = 0,00009 \text{ W.}$$

Considerando a temperatura externa como um valor de $T_c = 25^\circ\text{C}$, utilizando o gráfico watts \times tensão ([THERMOELECTRIC, 2020](#)), encontramos como referência $T_h = 50^\circ\text{C}$, mas não é possível provar isso, é apenas uma referência para encontrar os valores da tensão, corrente e resistência elétricas dos módulos na mesma referência ([THERMOELECTRIC, 2020](#)):

- $V = 0,5 \text{ V}$;
- $I = 0,2 \text{ A}$;
- $R_{\text{eq}} = 2 \Omega$.

Montando estes módulos conforme $NT = 1425000$, $NS = 1900$, $NP = 750$, no ano 14 teremos os seguintes valores:

$$\begin{aligned} V_0 &= 0,5 \cdot 1900 = 950 \text{ V}; \\ i_0 &= 0,2 \cdot 750 = 375 \text{ A}; \\ P_0 &= V_0 \cdot i_0 = 950 \cdot 375 = 356250 \text{ W}; \\ R_{\text{eq}} &= \frac{NS}{NP} \cdot R_M = \frac{1900}{750} \cdot 2 = 5,07 \Omega. \end{aligned}$$

Como não é possível atingir a potência acima, pois o limitante é a energia térmica de 2000 W, normalizando os valores:

$$\begin{aligned} P_0 &= V_0 \cdot i_0 = 125 \text{ W}; \\ V_0 &= \frac{375}{950} \cdot 125 = 49,34 \text{ V}; \\ i &= \frac{P_0}{V_0} = \frac{125}{49,34} = 2,53 \text{ V}; \end{aligned}$$

mantendo:

$$R_{\text{eq}} = 5,07 \Omega$$

d) Radioisótopo ^{137}Cs no formato CsCl

Conforme mostrado na [Tabela 15](#), será utilizada uma estrutura EI, com $NT = 270$, $NS = 18$, $NP = 15$. Sendo a energia térmica no ano zero:

$$Q_0 [^{137}\text{Cs}] = 2760,49 \text{ W}_{\text{Th}},$$

considerando rendimento de 6,25% na conversão de energia térmica em elétrica:

$$PE [^{137}\text{Cs}] = 2760,49 \cdot 6,25\% = 172,6 \text{ W}.$$

Como existem 270 módulos Seebeck e considerando a energia térmica e em consequência a elétrica distribuída de forma igual em todos os módulos:

$$\text{Energia por módulo } [^{137}\text{Cs}] = \frac{172,6}{270} = 0,64 \text{ W}.$$

Considerando a temperatura externa como um valor de $T_c = 25^\circ\text{C}$, utilizando o gráfico watts \times tensão ([THERMOELECTRIC, 2020](#)), encontramos como referência $T_h = 86^\circ\text{C}$, mas não é possível provar isso, é apenas uma referência para encontrar os valores da tensão, corrente e resistência elétricas dos módulos na mesma referência ([THERMOELECTRIC, 2020](#)):

- $V = 1,3 \text{ V}$;
- $I = 0,49 \text{ A}$;
- $R_{\text{eq}} = 2,18 \Omega$.

Montando estes módulos conforme $NT = 270$, $NS = 18$, $NP = 15$, no ano zero têm-se os seguintes valores:

$$V_0 = 1,3 \cdot 18 = 23,4 \text{ V};$$

$$i_0 = 0,49 \cdot 15 = 7,35 \text{ A};$$

$$P_0 = V_0 \cdot i_0 = 23,4 \cdot 7,35 = 172 \text{ W};$$

$$R_{\text{eq}} = \frac{NS}{NP} \cdot R_M = \frac{18}{15} \cdot 2,18 = 2,62 \Omega.$$

Calculando a energia térmica no ano 14:

$$Q_0 [^{137}\text{Cs}] = 2000 \text{ W}_{\text{Th}},$$

considerando rendimento de 6,25% na conversão de energia térmica em elétrica:

$$\text{PE} [^{137}\text{Cs}] = 2000 \cdot 6,25\% = 125 \text{ W}.$$

Como existem 270 módulos Seebeck, considerando a energia térmica e consequentemente a elétrica distribuídas de forma igual em todos os módulos:

$$\text{Energia por módulo } [^{137}\text{Cs}] = \frac{125}{270} = 0,46 \text{ W}.$$

Considerando a temperatura externa como um valor de $T_c = 25^\circ\text{C}$, utilizando o gráfico watts \times tensão ([THERMOELECTRIC, 2020](#)), encontramos como referência $T_h = 75^\circ\text{C}$, mas não é possível provar isso, é apenas uma referência para encontrar os valores da tensão, corrente e resistência elétricas dos módulos na mesma referência ([THERMOELECTRIC, 2020](#)):

- $V = 1,16 \text{ V}$;
- $I = 0,4 \text{ A}$;
- $R_{\text{eq}} = 2,13 \Omega$.

Montando estes módulos conforme $NT = 270$, $NS = 18$, $NP = 15$, no ano 14 teremos os seguintes valores:

$$V_0 = 1,16 \cdot 18 = 20,88 \text{ V};$$

$$i_0 = 0,4 \cdot 15 = 6 \text{ A};$$

$$P_0 = V_0 \cdot i_0 = 20,88 \cdot 6 = 125,28 \text{ W};$$

$$R_{\text{eq}} = \frac{NS}{NP} \cdot R_M = \frac{18}{15} \cdot 2,42 = 2,56 \Omega.$$

e) Radioisótopo ^{147}Pm no formato Pm_2O_3

Conforme mostrado na [Tabela 15](#), será utilizada uma estrutura EI, com $NT = 740$, $NS = 37$, $NP = 20$. Sendo a energia térmica no ano zero:

$$Q_0 [^{147}\text{Pm}] = 80748,6 \text{ W}_{\text{Th}},$$

considerando rendimento de 6,25% na conversão de energia térmica em elétrica:

$$\text{PE} [^{147}\text{Pm}] = 80748,6 \cdot 6,25\% = 5046,8 \text{ W}.$$

Como existem 740 módulos Seebeck e considerando a energia térmica e em consequência a elétrica distribuída de forma igual em todos os módulos:

$$\text{Energia por módulo } [^{147}\text{Pm}] = \frac{5046,8}{740} = 6,82 \text{ W}.$$

Considerando a temperatura externa como um valor de $T_c = 25^\circ\text{C}$, utilizando o gráfico watts \times tensão ([THERMOELECTRIC, 2020](#)), encontramos como referência $T_h = 265^\circ\text{C}$, mas não é possível provar isso, é apenas uma referência para encontrar os valores da tensão, corrente e resistência elétricas dos módulos na mesma referência ([THERMOELECTRIC, 2020](#)):

- $V = 4,55 \text{ V}$;
- $I = 1,5 \text{ A}$;
- $R_{\text{eq}} = 2,8 \Omega$.

Montando estes módulos conforme $NT = 740$, $NS = 37$, $NP = 20$, no ano zero têm-se os seguintes valores:

$$\begin{aligned} V_0 &= 4,55 \cdot 37 = 168,35 \text{ V}; \\ i_0 &= 1,5 \cdot 20 = 30 \text{ A}; \\ P_0 &= V_0 \cdot i_0 = 168,35 \cdot 39 = 5050,5 \text{ W}; \\ R_{\text{eq}} &= \frac{NS}{NP} \cdot RM = \frac{37}{20} \cdot 2,18 = 2,62 \Omega. \end{aligned}$$

Calculando a energia térmica no ano 14:

$$Q_0 [^{147}\text{Pm}] = 2000 \text{ W}_{\text{Th}},$$

considerando rendimento de 6,25% na conversão de energia térmica em elétrica:

$$PE [^{147}\text{Pm}] = 2000 \cdot 6,25\% = 125 \text{ W.}$$

Como existem 740 módulos Seebeck, considerando a energia térmica e consequentemente a elétrica distribuídas de forma igual em todos os módulos:

$$\text{Energia por módulo } [^{147}\text{Pm}] = \frac{125}{740} = 0,46 \text{ W.}$$

Considerando a temperatura externa como um valor de $T_c = 25^\circ\text{C}$, utilizando o gráfico watts \times tensão ([THERMOELECTRIC, 2020](#)), encontramos como referência $T_h = 55^\circ\text{C}$, mas não é possível provar isso, é apenas uma referência para encontrar os valores da tensão, corrente e resistência elétricas dos módulos na mesma referência ([THERMOELECTRIC, 2020](#)):

- $V = 0,65 \text{ V}$;
- $I = 0,26 \text{ A}$;
- $R_{eq} = 2,03 \Omega$.

Montando estes módulos conforme $NT = 740$, $NS = 37$, $NP = 20$, no ano 14 teremos os seguintes valores:

$$V_0 = 0,65 \cdot 37 = 24,05 \text{ V};$$

$$i_0 = 0,26 \cdot 20 = 5,2 \text{ A};$$

$$P_0 = V_0 \cdot i_0 = 24,05 \cdot 6 = 125,06\text{W};$$

$$R_{eq} = \frac{NS}{NP} \cdot R_M = \frac{37}{20} \cdot 2,03 = 3,08 \Omega.$$

f) Radioisótopo ^{210}Pb no formato natural

Conforme mostrado na [Tabela 15](#), será utilizada uma estrutura ED, com $NT = 18$, $NS = 6$, $NP = 3$. Sendo a energia térmica no ano zero:

$$Q_0 [^{210}\text{Pb}] = 3091 \text{ W}_{Th},$$

considerando rendimento de 6,25% na conversão de energia térmica em elétrica:

$$PE [^{210}\text{Pb}] = 3091 \cdot 6,25\% = 193,2 \text{ W.}$$

Como existem 18 módulos Seebeck e considerando a energia térmica e em consequência a elétrica distribuída de forma igual em todos os módulos:

$$\text{Energia por módulo } [^{210}\text{Pb}] = \frac{193,2}{18} = 10,73 \text{ W.}$$

Mas como a capacidade máxima de cada módulo é de 8,15 W, conforme a [Tabela 5](#):

- $V = 5,052 \text{ V}$;
- $I = 1,608 \text{ A}$;
- $R_{\text{eq}} = 2,9 \Omega$.

Montando estes módulos conforme $NT = 18$, $NS = 6$, $NP = 3$, no ano zero têm-se os seguintes valores:

$$V_0 = 5,052 \cdot 6 = 30,31 \text{ V};$$

$$i_0 = 1,608 \cdot 3 = 4,82 \text{ A};$$

$$P_0 = V_0 \cdot i_0 = 30,31 \cdot 4,82 = 146,09 \text{ W};$$

$$R_{\text{eq}} = \frac{NS}{NP} \cdot RM = \frac{6}{3} \cdot 2,9 = 5,8 \Omega.$$

Calculando a energia térmica no ano 14:

$$Q_0 [^{210}\text{Pb}] = 2000 \text{ W}_{\text{Th}},$$

considerando rendimento de 6,25% na conversão de energia térmica em elétrica:

$$PE [^{210}\text{Pb}] = 2000 \cdot 6,25\% = 125 \text{ W}$$

Como existem 18 módulos Seebeck, considerando a energia térmica e consequentemente a elétrica distribuídas de forma igual em todos os módulos:

$$\text{Energia por módulo } [^{210}\text{Pb}] = \frac{125}{18} = 6,94 \text{ W.}$$

Considerando a temperatura externa como um valor de $T_c = 25^\circ\text{C}$, utilizando o gráfico watts \times tensão ([THERMOELECTRIC, 2020](#)), encontramos como referência $T_h = 268^\circ\text{C}$, mas não é possível provar isso, é apenas uma referência para encontrar os valores da tensão, corrente e resistência elétricas dos módulos na mesma referência ([THERMOELECTRIC, 2020](#)):

- $V = 4,61 \text{ V}$;
- $I = 1,51 \text{ A}$;
- $R_{\text{eq}} = 2,75 \Omega$.

Montando estes módulos conforme $NT = 18$, $NS = 6$, $NP = 3$, no ano 14 teremos os seguintes valores:

$$V_0 = 4,61 \cdot 6 = 27,66 \text{ V};$$

$$i_0 = 1,51 \cdot 3 = 4,53 \text{ A};$$

$$P_0 = V_0 \cdot i_0 = 27,66 \cdot 4,53 = 125,3 \text{ W};$$

$$R_{\text{eq}} = \frac{NS}{NP} \cdot RM = \frac{6}{3} \cdot 2,75 = 5,5 \Omega.$$

APÊNDICE C – CICLO DE PRODUÇÃO DE ^{238}Pu

O isótopo ^{237}Np é produzido em reator nuclear utilizando como origem o ^{238}U através da reação rápida (n,2n):



Para separar do combustível no reator, se utilizam as reações:



Os processos são descritos da seguinte forma:

1. processamento dos materiais antes da irradiação
 - 1.a) Purificação do ^{237}Np
 - 1.b) Fabricação dos alvos ^{237}Np
2. Irradiação dos alvos em um reator nuclear para realizar a transformação de ^{237}Np para ^{238}Pu .
3. processamento dos materiais antes da irradiação.
 - 3.a) Extração, separação e purificação ^{238}Pu e o remanescente dos alvos irradiados ^{237}Np .
 - 3.b) Reciclagem do ^{237}Np extraído para reutilização como alvos.
 - 3.c) Processamento do ^{238}Pu para que possa ser usado para fabricar o combustível.

Na produção do ^{238}Pu , altos níveis de ^{236}Pu são encontrados e este radioisótopo contém alta emissão de partículas gama, muito perigosa. Como o decaimento do ^{238}Pu é de 2,9 anos, o material que contém a mistura dos dois ficam armazenado por 3 anos, até ser utilizado.

A produção do ^{238}Pu é limitada à disponibilidade de ^{237}Np , que não é produzido de forma corrente em reatores nucleares, portanto a sua produção é cara e escassa e até mesmo os EUA compram ^{238}Pu da Rússia, para suprir a grande demanda nas missões espaciais.