



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESTUDO COMPARATIVO DA RELAÇÃO CUSTO BENEFÍCIO
DOS MÉTODOS DE PRODUÇÃO DE ^{99}Mo : FISSÃO DE ^{235}U
E REAÇÃO DE CAPTURA NEUTRÔNICA NO ^{98}Mo**

SERGIO YUKIO TAKAHASHI

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Aplicações.**

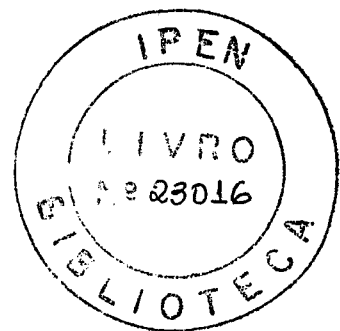
**Orientador:
Dr. João Alberto Osso Jr.**

**São Paulo
2004**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**ESTUDO COMPARATIVO DA RELAÇÃO CUSTO BENEFÍCIO DOS MÉTODOS
DE PRODUÇÃO DE ^{99}Mo : FISSÃO DE ^{235}U E REAÇÃO DE CAPTURA
NEUTRÔNICA NO ^{98}Mo .**



Sergio Yukio Takahashi

**Dissertação apresentada como
parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Mestre em Ciências na
Área de Tecnologia Nuclear -
Aplicações**

Exemplar revisado pelo autor

Orientador:

Dr. João Alberto Osso Jr.

SÃO PAULO

2004

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Neusa e às minhas filhas Erika e Emily que estiveram sempre presentes e apoiando esta empreitada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por ter aberto esta oportunidade na minha vida.

Quero apresentar os meus agradecimentos principalmente ao meu orientador Dr. João Alberto Osso Jr, que buscou de todas as formas que o trabalho fosse realizado.

A minha maior alegria são as pessoas que tive a oportunidade de conhecer durante esta jornada, e que devo o sucesso do empreendimento, e para estas pessoas o meu especial obrigado, pelo apoio pelas palavras de incentivo no momento de dificuldades e pelo espírito de companheirismo e bem querer. Pessoas da diretoria, todos da CPG, e de outras unidades.

O meu muito obrigado por estarem comigo e por poder conhecer e aprender muito com todos vocês.

EPÍGRAFE

As decisões inteligentes são encontradas nos diálogos entre a realidade e o sonho

v

**ESTUDO COMPARATIVO DA RELAÇÃO CUSTO BENEFÍCIO DOS MÉTODOS
DE PRODUÇÃO DE ^{99}Mo : FISSÃO DE ^{235}U E REAÇÃO DE CAPTURA
NEUTRÔNICA NO ^{98}Mo .**

Sergio Yukio Takahashi

RESUMO

Este trabalho analisa os benefícios e custos resultantes na produção de geradores de tecnécio, utilizando, como base, Molibdênio obtido por duas fontes diferentes.

Para esta análise, foram investigados dois processos de fabricação do Molibdênio, no qual um é importado, obtido por meio da fissão de urânio, utilizado atualmente, e outro processo de produção é o do Molibdênio gel, processo inteiramente nacional, desenvolvido por pesquisadores do IPEN. Foram compilados, também, os custos inerentes aos dois processos de obtenção do Molibdênio.

Conclui-se que, embora existam aspectos positivos e negativos em ambos os processos, os dois devem ser mantidos: o Molibdênio gerado por fissão deverá atender à fabricação de gerador de tecnécio com atividade acima de $1,85 \times 10^{10} \text{Bq}$ (500mCi) e o do Molibdênio gel para os geradores de Tecnécio-99m de atividades de $9,25 \times 10^9 \text{Bq}$ (250 mCi) e $1,85 \times 10^{10} \text{Bq}$. Este limite de atividade poderá ser ampliado, desde que o reator IEAR-01 possa operar com uma potência maior e com jornada de trabalho em 3 turnos.

**COMPARATIVE STUDIES OF THE RELATION COSTS/BENEFITS OF
THE PRODUCTION METHODS OF ^{99}Mo : FISSION OF ^{235}U AND
NEUTRON CAPTURE REACTION ON ^{98}Mo**

Sergio Yukio Takahashi

ABSTRACT

This work analyses the benefits and costs that are the results of the production of Technetium generators, using ^{99}Mo produced by two different ways.

For this analysis, the production process of Mo, nowadays imported, obtained through the fission of uranium. The second process is the gel generator that is totally national, developed by researcher at IPEN. The self-sustained costs were evaluated for both production processes.

The conclusion was that although positive and negative aspects appear in both processes, they must remain: Fission Mo will supply the generators with activities higher than $1.85 \times 10^{10}\text{Bq}$ and the gel generator will supply activities up to $1.85 \times 10^{10}\text{Bq}$. This limitation can be overcome if the power of the Reactor is upgraded and if the irradiation time covers the 3 shifts.

SUMÁRIO

| | Página |
|--|---------------|
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Histórico do IPEN | 1 |
| 1.1.1 Missão do IPEN | 2 |
| 1.1.2 Missão do Centro de Radiofarmácia | 2 |
| 1.1.3 O Centro de Radiofarmácia | 2 |
| 1.1.4 Produtos para medicina nuclear | 5 |
| 1.1.4.1 Radioisótopos primários | 5 |
| 1.1.4.2 Moléculas Marcadas | 6 |
| 1.1.4.3 Conjunto de Reagentes Liofilizados para radiodiagnóstico (kits) | 7 |
| 1.1.4.4 Geradores de Molibdênio/Tecnécio | 7 |
| 1.2 Geradores de Tecnécio – 99m | 7 |
| 1.2.1 Tecnécio-99 meta estável | 7 |
| 1.2.2 Produção de ⁹⁹ Mo | 8 |
| 1.2.2.1 Produção de ⁹⁹ Mo em ciclotron | 9 |
| 1.2.2.2 Produção de ⁹⁹ Mo em reator nuclear pela fissão de ²³⁵ U | 9 |
| 1.2.2.3 Produção de ⁹⁹ Mo em reator nuclear pela ativação de alvos de Mo | 9 |
| 2. OBJETIVOS | 10 |
| 3. METODOLOGIA | 11 |
| 3.1 Produção de ⁹⁹ Mo a Partir da Fissão do ²³⁵ U | 11 |
| 3.1.1 Métodos de separação do ⁹⁹ Mo dos produtos de fissão | 16 |
| 3.2 Produção de ⁹⁹ Mo a partir da ativação neutrônica do Mo | 17 |
| 3.2.1 Gerador tipo gel no IPEN | 19 |
| 3.2.2 Preparo do gerador contendo o gel MoZr | 22 |
| 3.2.3 Identificação da estrutura do gel | 22 |
| 3.2.4 Projeto, montagem e testes dos equipamentos para produção rotineira. | 23 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 26 |
| 4.1 Custos incorrentes | 26 |
| 4.1.1 Molibdênio obtido através da fissão de Urânio | 26 |
| 4.1.2 Molibdênio gel produzido no IPEN | 37 |
| 4.1.3 Gerador tipo gel produzido no IPEN - alvo enriquecido | 40 |
| 4.2 Análise crítica dos processos de produção | 42 |
| 4.2.1 Molibdênio por fissão | 42 |
| 4.2.2 Molibdênio GEL | 44 |
| 5 CONCLUSÃO | 46 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 47 |

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Rendimento de produção de fissão térmica versus número de massa. 13

Figura 2: Diagrama da formulação básica do preparo do gel de MoZr 21

Figura 3: Diagrama do gerador de ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ tipo cromatográfico 22

Figura 3: Diagrama dos equipamentos para o processamento do gel de MoZr ...24

Figura 5: Curva de rendimento de eluição do gerador tipo gel 39

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Geradores de ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ - Distribuição semanal | 27 |
| Tabela 2: Custo total do gerador | 27 |
| Tabela 3: Custo da matéria prima dos geradores de fissão | 28 |
| Tabela 4: Atividade específica de ^{99}Mo no irradiador de Be | 38 |
| Tabela 5: Massa de gel para produzir geradores | 39 |
| Tabela 6: Custo para a produção de geradores | 41 |
| Tabela 7: Custo dos elementos combustíveis | 45 |
| Tabela 8: Balanço anual de consumo de elementos combustíveis e economia de divisas | 46 |
| Tabela 9: Balanço anual de consumo de elementos combustíveis e economia de divisas | 46 |

1. INTRODUÇÃO

1.1 Histórico do IPEN

O Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN foi fundado em 1956 com o objetivo de realizar pesquisas científicas e tecnológicas e formar especialistas na área nuclear. É uma autarquia estadual vinculada à Secretaria de Ciência, Tecnologia, Desenvolvimento Econômico e Turismo do Estado de São Paulo - CETDET-S e associada, para finalidades de ensino, à Universidade de São Paulo (USP), mantido e gerido, técnica e administrativamente, pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

Localizado em São Paulo, na Cidade Universitária "Armando de Sales Oliveira", ocupa uma área total de 500.000 m². Seus laboratórios e instalações totalizam 101.000 m² de área construída.

O IPEN é uma instituição de pesquisas que oferece serviços e produtos nas áreas nuclear e correlata e, de acordo com a Lei 4118 de 27 de julho de 1962, as atividades nucleares em território nacional são um monopólio constitucional da União. O monopólio é exercido pela CNEN que recebe os valores orçamentários do MCT, prioriza e os distribui entre as suas controladas.

Na área médica, o IPEN é responsável pela produção e distribuição de radiofármacos, fornecendo os à cerca de 250 clínicas e hospitais em todo o Brasil e no exterior, permitindo a realização de cerca de 2.000.000 procedimentos de medicina nuclear por ano.

Além das atividades de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) tradicionalmente praticadas no Instituto, o IPEN vem conduzindo um amplo programa nas áreas de biotecnologia, desenvolvendo processos para a obtenção e purificação de hormônios humanos por

engenharia genética, materiais avançados, obtendo e preparando materiais especiais, biomateriais, saúde, radioproteção e segurança nuclear, energia e meio ambiente engenharia de sistemas e tecnologia de reatores nucleares, tecnologia de materiais e ciclo do combustível nuclear.

Como forma de atuação, além da comercialização de produtos já desenvolvidos e da prestação de serviços em diversas áreas, como a aferição e a calibração de instrumentos, o IPEN desenvolve projetos em sua área de atuação, disponibilizando sua capacitação tecnológica para parcerias, tanto com o setor privado como com o setor público, por meio de contratos específicos ou pelo Centro Incubador de Empresas de Base Tecnológica.

Dentre as estratégias do IPEN, a busca da inovação da gestão e a valorização profissional dos seus colaboradores é de suma importância.

1.1.1 Missão do IPEN

“O nosso compromisso é com a melhoria da qualidade de vida da população brasileira, produzindo conhecimentos científicos, desenvolvendo tecnologias, gerando produtos e serviços e formando recursos humanos nas áreas nuclear e correlatas”.

1.1.2 Missão do Centro de Radiofarmácia

“Produzir Radiofármacos para a realização de diagnósticos e terapia em Medicina Nuclear, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida dos pacientes”.

1.1.3 O Centro de Radiofarmácia

O Centro de Radiofarmácia (CR), unidade do IPEN/CNEN-SP, em conjunto com a classe médica, vem desenvolvendo a medicina nuclear no país com a pesquisa, desenvolvimento, produção, distribuição e fornecimento de radiofármacos para diagnósticos e terapias. Estes produtos são fornecidos aos centros de diagnósticos de hospitais e clínicas de todo o país.

O Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares iniciou as atividades de produção de radioisótopos para uso na Medicina

Nuclear em fins de 1959, distribuindo a primeira partida de ^{131}I para diagnóstico da função tireoidiana.

Subseqüentemente, ao longo dos anos, outros radioelementos foram obtidos no reator nuclear IEA-R1: o ^{198}Au coloidal para estudo da função hepática e terapia de tumores intracavitários, o ^{51}Cr para marcação de hemácias, o ^{24}Na e ^{42}K para estudos do espaço sódio e potássio respectivamente. Também foi possível a produção de ^{32}P e ^{35}S , este último para uso em agricultura.

Substâncias marcadas com ^{51}Cr e ^{131}I para o diagnóstico de diversas funções do organismo humano foram preparadas com ótima aceitação pela classe médica brasileira.

Após mais de 20 anos de experiência na área de produção de radioisótopos em reator nuclear, foi possível aos pesquisadores do IPEN, graças à aquisição de um ciclotron CV-28, adquirir também a prática na obtenção de radiofármacos nesse importante equipamento. Foi assim que se tornou realidade a preparação de, por exemplo, ^{67}Ga para a localização de lesões inflamatórias e tumores de tecido mole e também do ^{123}I que, por ter meia-vida inferior à do ^{131}I e não ser emissor de radiação β^- , é de grande utilidade no diagnóstico da função tireoidiana com menor dose de absorvida ao paciente.

Nos meados de 1979, a classe médica brasileira já vinha utilizando geradores de ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ de fabricação estrangeira e preparados com ^{99}Mo obtido na fissão do ^{235}U , devido à operação descontínua do reator IEA-R1, bem como a baixa potência desenvolvida, não havia possibilidade de se produzir o ^{99}Mo no Brasil. Nessa ocasião, o IPEN contribuía com os médicos brasileiros preparando conjuntos de reativos liofilizados para que os usuários marcassem esses produtos com o $^{99\text{m}}\text{Tc}$ "in loco", obtido dos geradores importados.

Em fins de 1980, médicos nucleares procuraram o IPEN a fim de saberem se este poderia produzir os geradores de $^{99\text{m}}\text{Tc}$, dado o aumento sempre crescente nos preços cobrados pelos

fornecedores internacionais. Os pesquisadores da área de produção entusiasmados com a sugestão iniciaram os trabalhos experimentais com ^{99}Mo importado do Canadá e, finalmente em 1981 foi possível o atendimento à classe médica brasileira com geradores de $^{99\text{m}}\text{Tc}$ preparados com tecnologia nacional.

Atualmente, o IPEN prepara cerca de 260 geradores de $^{99\text{m}}\text{Tc}$ por semana atendendo toda a demanda do país, bem como, exportando para a Bolívia. Manifestaram interesse também, o Paraguai e o Uruguai. É importante mencionar que a maioria dos exames de diagnósticos na área nuclear são realizados com $^{99\text{m}}\text{Tc}$.

Grande parte dos radioisótopos usados na Medicina Nuclear é hoje importada, fracionados no IPEN e distribuídos em todo o território nacional. Com o intuito de nacionalizar toda a produção de radioisótopos, o IPEN realizou reformas no reator IEA-R1 para que a sua potência alcance 5 MW em operação contínua. A aquisição de outro ciclotron com energia de prótons de 30 MeV e dois feixes simultâneos de irradiação possibilitou o aumento da produção de ^{123}I , a produção de ^{67}Ga , ^{111}In , ^{201}Tl para estudos do miocárdio e de ^{18}F para estudos do metabolismo cerebral e de tumores.

Com o reator operando continuamente e em alta potência haverá possibilidade de se produzir ^{99}Mo necessário aos geradores.

A necessidade e o acerto dos produtos, no que se refere à qualidade, variedade e preço, está possibilitando a expansão e o desenvolvimento de um importante ramo da medicina, que é a nuclear, e contribuindo para que novos profissionais atuem nesta especialização com um diagnóstico precoce e alta qualidade na informação, possibilitando dessa maneira um tratamento eficaz.

O CR implementou o Sistema da Qualidade com a certificação ISO 9.000 com a certificação desde o 24 agosto de 1.999, sendo recertificado na versão 2000, 13.12.2003, pela Fundação Vanzolini, com reconhecimento da International Certification Network, ⁽¹⁾

As suas atividades atendem, também às normas, nacionais e internacionais, de Proteção Radiológica e Segurança do Meio

Ambiente e às Boas Práticas de Fabricação-BPF, anexo 1 da resolução RDC nº134 de 13 de julho de 2001 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária.

1.1.4 Produtos para medicina nuclear

A Medicina Nuclear é definida como a aplicação de materiais radioativos no diagnóstico e terapia de pacientes. Os radioisótopos são escolhidos pelas suas características físicas de decaimento favoráveis à utilização in vivo, e podem ser aplicados na sua forma química mais simples ou então incorporados em uma variedade de compostos químicos para uso em medicina nuclear, escolhidos pelas suas propriedades bioquímicas, fisiológicas e metabólicas.

Os radioisótopos são átomos instáveis de elementos químicos que decaem por emissão de partículas e fótons. Podem ser produzidos por via direta em reator ou em aceleradores de partículas e por via indireta a partir de geradores. O radiofármaco pode ser constituído apenas do radioisótopo primário ou do radioisótopo acoplado à molécula de uma substância.

No Centro de Radiofarmácia são produzidos os seguintes tipos de produtos:

1.1.4.1. Radioisótopos primários

A maioria dos produtos de radioisótopos primários é importada do Canadá como:

O cromo -51 e molibdênio-99 (^{99}Mo) utilizado na construção de um gerador para obtenção de outro radioisótopo, que é o tecnécio-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$).

Outros produtos de radioisótopos primários são produzidos no IPEN, como:

O samário - 153 é produzido no reator IEA-R1 do IPEN para obtenção do ^{153}Sm -EDTMP;

O iodo-131 (^{131}I) é um dos radionuclídeos que primeiramente foi utilizado, tanto para diagnóstico, quanto para terapia. Na forma de iodeto de sódio é utilizado no estudo das

funções da tireóide, como tratamento do hipertireodismo ou carcinoma de tireóide e na detecção de metástase da tireóide;

O gálio-67 (^{67}Ga), produzido no ciclotron, é utilizado na detecção de sítios de infecção, metástase de câncer de pulmão, linfomas, doença de Hodgkin, carcinoma hepatocelular e melanoma maligno; e

O tálio-201 (^{201}Tl), produzido no ciclotron, é utilizado na detecção de defeitos de perfusão no miocárdio no repouso e após stress em pacientes com doenças da artéria coronariana, bem como em pacientes com angina pectoris atípica, na detecção de estenose arterial individual no miocárdio, detecção de tumores solitários e localização de adenoma de paratireóide.

1.1.4.2 Moléculas marcadas

São produtos em que o radioisótopo é acoplado a outra substância não radioativa. O Centro de Radiofarmácia produz 100% das necessidades da classe médica, sendo os mesmos:

A ^{131}I -metaiodobenzilguanidina (^{131}I -MIBG) é utilizada na localização e tratamento de feocromocitoma, neuroblastoma, tumor carcinóide, diagnóstico de cardiomiopatia e rejeição de transplante cardíaco;

O ^{131}I -ortoiodohipurato de sódio (^{131}I -Hippuran) é utilizado na medida do fluxo plasmático renal e necrose tubular;

A ^{131}I -soro albumina humana (^{131}I -SAH) para determinação de volume plasmático e sanguíneo;

O ^{51}Cr -ácido etilenodiaminotetraacético (^{51}Cr -EDTA) para determinação da taxa de filtração glomerular;

O ^{18}F -fluorodeoxiglicose (^{18}F -FDG) é um produto que possui um tempo de meia-vida muito curto apenas 110 minutos e é utilizado em estudos de metabolismo de miocárdio e estudos do cérebro; e

O ^{153}Sm -EDTMP, como paliativo para dores de metástase óssea.

1.1.4.3 Conjunto de reagentes liofilizados para radiodiagnóstico (KITS)

Os reagentes liofilizados (kits) não são radioativos, são diferentes formulações contidas em frascos, em que o próprio cliente acrescenta o material radioativo, no caso o ^{99m}Tc eluído do gerador. São produzidos atualmente 14 tipos de Kits. Através do reagente liofilizado acoplado ao tecnécio-99m ele poderá fazer o diagnóstico de diversos órgãos como cérebro, fígado, pâncreas, glândulas salivares, tireóides, sistema ósseo, rins, pulmão e linfografia. Estas formulações dependem do órgão em que o médico tem a necessidade de examinar, se for para o diagnóstico do fígado poderá ser utilizado Estanho Coloidal, Enxofre Coloidal, Fitato, Diisopropil Iminodiacético. Hoje o IPEN produz e distribui cerca de 14 diferentes kits.

1.1.4.4 Geradores de Molibdênio/tecnécio.

A partir do ^{99}Mo importado, são construídos geradores em que o produto obtido (produção indireta) por eluição é o radioisótopo ^{99m}Tc .

1.2 Geradores de Tecnécio-99m

1.2.1 Tecnécio-99 meta estável (^{99m}Tc)⁽²⁾

Um dos radioisótopos mais utilizados na medicina nuclear é o tecnécio-99 meta estável (^{99m}Tc). O tecnécio, elemento 43 da tabela periódica, não ocorre naturalmente, tendo sido descoberto por Perrier e Ségre, em 1937, por meios artificiais, e continua, até hoje, sendo uma curiosidade científica. Entretanto, quando uma seleção criteriosa de radioisótopos é feita para uso "in vivo", a rara combinação de propriedades do ^{99m}Tc torna-o o mais indicado para imagens de órgãos. Ele tem uma meia-vida física de 6,02 h, decai 100 % por transição isomérica para o ^{99}Tc de meia-vida longa. isto é, no seu decaimento emite fóton monocromático de 140Kev e são prontamente colimados para fornecer imagem de resolução com resultado superior a outro tipo de procedimento. A ausência de emissão de radiação corpuscular permite a administração de maiores

doses com segurança, as quais proporcionam um maior número de fótons por miliSievert (mSv)

Foi possível a sua produção, somente após do desenvolvimento do reator nuclear, pela fissão do urânio. Desta maneira recebeu o nome de Tecnécio, por ser produzido artificialmente.

Em 1950, a medicina nuclear foi modificada com o desenvolvimento do gerador $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$.

O primeiro gerador de $^{99\text{m}}\text{Tc}$ foi idealizado por Walter Tucker e Margaret Guine, responsáveis por um programa de isótopos desenvolvido pelo grupo de Tucker⁽³⁾.

Com o aumento de interesse pelos médicos, o grupo aumentou os esforços com a finalidade de melhora na pureza do produto de fissão do ^{99}Mo e no arranjo do gerador. Modificou, também, a solução de eluição do ácido nítrico para solução fisiológica. Este esforço diminuiu o nível de contaminação dos eluídos do $^{99\text{m}}\text{Tc}$ com ^{99}Mo para abaixo de 10^{-5} .

O gerador consiste em uma coluna de vidro, contendo alumina como suporte, sobre a qual é absorvido o ^{99}Mo de fissão. Esse nuclídeo pai (meia-vida de 66h) decai para o filho $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (meia-vida de 6h). Como a afinidade do filho pela alumina é pequena, este pode ser eluído, facilmente mediante solução fisiológica. Esta solução estéril vem acondicionada em frascos tipo penicilina.

O pertecnetato de sódio $^{99\text{m}}\text{Tc}$ é usado como agente cintilográfico para a visualização de imagens do cérebro, glândulas salivares e tireóide. Quando incorporado a substâncias orgânicas, permite a obtenção de imagens dos ossos, fígado, pulmão, rins, etc.

1.2.2 Produção de ^{99}Mo

O ^{99}Mo pode ser produzido por diversas reações nucleares em reatores nucleares e em ciclotrons. Em reatores nucleares, a produção se dá de duas maneiras: pela fissão do ^{235}U ou pela ativação direta de alvos de Mo natural ou enriquecido.

1.2.2.1 Produção de ^{99}Mo em ciclotron

A produção em ciclotron é possível pela irradiação de Mo altamente enriquecido em ^{100}Mo com prótons ou dêuterons ou pela ativação do Zr.

1.2.2.2 Produção de ^{99}Mo em reator nuclear pela fissão de ^{235}U .

A fissão do urânio produz uma série de isótopos e radioisótopos de diferentes elementos, entre eles o Mo com rendimento de fissão de 6,1%.⁽⁴⁾

Esse processo demanda elaboradas instalações de processamento, e cuidados extremos para evitar a contaminação do ^{99}Mo com os outros produtos desenvolvidos no método.

1.2.2.3 Produção de ^{99}Mo em reator nuclear pela ativação de alvos de Mo

O ^{99}Mo de baixa atividade específica, produzido a partir da reação (n, γ), pode ser incorporado por absorção a uma estrutura insolúvel de gel, a qual, após granulação, libera, eficientemente, o ^{99m}Tc na eluição.

A formação do gel consiste na reação química do molibdênio com outros elementos tais como zircônio, titânio, estanho e cério, para a formação de molibdato metálico precipitado. Seu aproveitamento com carregamento de coluna cromatográfica envolve etapas de filtração, secagem e fragmentação espontânea em partículas com tamanho inferior a 1mm, carregamento das colunas e eluição.

O gel preparado com zircônio mostra um desempenho melhor em relação ao que foi preparado com titânio, principalmente por ter menos contaminação do ^{99m}Tc eluído com ^{99}Mo . Por razões técnicas e econômicas, o sistema de gerador tipo gel de molibdato de zircônio é a primeira escolha desenvolvida para produzir o gerador de ^{99m}Tc para uso na medicina nuclear em larga escala.

Esta técnica apresenta uma grande vantagem, pois são geradas apenas pequenas quantidades de rejeitos e as exigências para o processamento do ^{99}Mo são mínimas.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo analisar a relação de custos e benefícios dos geradores de ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$. O primeiro tem por elemento ativo o molibdênio-99 obtido pela fissão do Urânio-235, que é um produto importado, e o outro utiliza o gel de MoZr produzido por meio da irradiação de óxido de molibdênio (MoO_3) no reator IEA-R1 no IPEN.

3. METODOLOGIA

3.1 Produção de ^{99}Mo a partir da fissão do ^{235}U

Enrico Fermi, na Itália, bombardeou o urânio com nêutrons logo após a sua descoberta dos neutrons, num esforço de produzir elementos com números atômicos maiores que 92 (elementos transurânicos). Sua teoria previa que o bombardeamento com nêutrons produziria reações (n, γ) no urânio. Este urânio mais pesado decairia com emissão de uma partícula α , para elementos mais altos. Esta tentativa eventualmente ocorreu, mas foi difícil a interpretação dos seus primeiros experimentos em virtude de um inesperado resultado. Fermi descobriu que o urânio irradiado com nêutrons ficava radioativo e que as meias-vidas dos nuclídeos radioativos presentes não correspondiam a qualquer meia-vida dos elementos pesados até então conhecidos. Por esta razão, Fermi acreditou que elementos transurânicos teriam sido produzidos por este processo. Entretanto, em 1939, os cientistas alemães Hahn e Strassman separaram quimicamente do Urânio radionuclídeos e provaram que eles eram na realidade isótopos do Bário ($^{139}_{56}\text{Ba}$) e Lantânio ($^{140}_{57}\text{La}$) ao invés de elementos transurânicos como previsto inicialmente. Os resultados poderiam somente ser explicados admitindo que o núcleo do urânio se quebrasse em duas partes durante a reação com nêutron.

Este processo de quebra de núcleos pesados em duas partes foi chamado de "FISSÃO".

O anúncio da fissão do urânio levou os cientistas de todo mundo a uma intensa pesquisa no assunto. Mostrou-se também na ocasião, que o processo de fissão era acompanhado de liberação

intensa de quantidade de energia e este fato levou ao desenvolvimento da bomba atômica e de reatores capazes de gerar energia elétrica. Desde esta época, o processo de fissão tem sido aplicado em geração comercial de energia elétrica.

Por intermédio da curva de energia de ligação por núcleon, esperar-se-ia que os fragmentos de fissão formados seriam mais estáveis do que o estado fundamental do núcleo ^{236}U e assim não existiriam elementos pesados na natureza, pois todos espontaneamente já teriam se transformado em núcleos leves. No entanto, a fissão espontânea só ocorre raramente. Para que ocorra fissão com uma razoável probabilidade é necessário que se forneça energia ao núcleo de uma forma ou de outra.

Um estudo detalhado da fissão por nêutrons térmicos do urânio-235 mostrou que o núcleo composto (urânio-236) divide-se em mais de 40 maneiras diferentes, produzindo mais de 80 produtos primários de fissão. A faixa dos números de massa é de 72, provavelmente um isótopo do zinco ($Z = 30$), a 160, possivelmente um isótopo do gadolínio ($Z = 64$). Na Figura 1, os números de massa dos produtos de fissão do urânio-235 estão dispostos graficamente em função das produções de fissão. Esta produção é definida como sendo a porcentagem do número total de fissões nucleares que formam produtos de um dado número de massa. Analisando a Figura 1, nota-se que as massas de quase todos os produtos de fissão caem em dois grandes grupos, um grupo "leve", com números de massas desde 80 até 110 e um grupo pesado, com números de massas desde 125 até 155. O tipo de fissão mais provável, compreendendo aproximadamente 6,4 % do total, refere-se a produtos com número de massas 95 e 139. Todavia, é aparente que na grande maioria dos casos, a fissão do U-235 não é simétrica. Pu-239 e U-233 possuem curvas de fração de produção de produtos de fissão semelhantes.

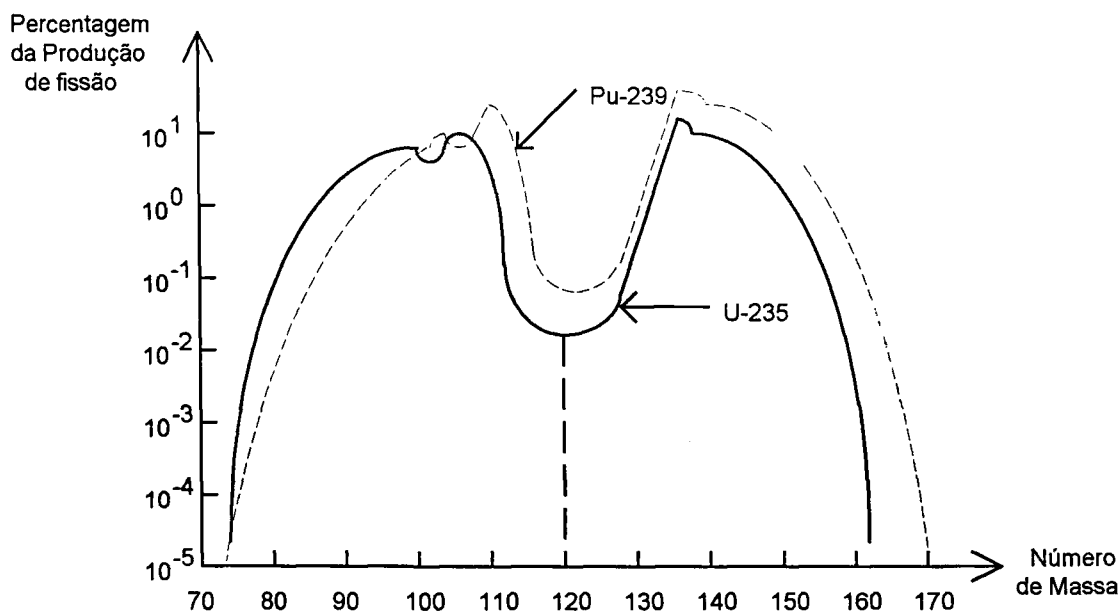


Figura 1: Rendimento de Produção de Fissão Térmica versus Número de Massa.

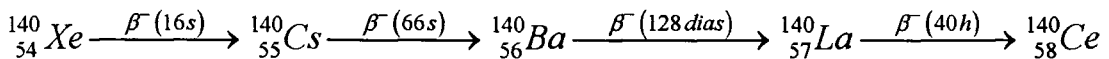
No instante da fissão, os núcleos dos produtos de fissão são arremessados com uma velocidade tão alta que eles tendem até em deixar para trás seus elétrons orbitais. Todavia, os produtos de fissão agem como partículas altamente carregadas passando através da matéria.

Os fragmentos mais leves carregam consigo, em média, cerca de 20 unidades de carga positiva, enquanto os fragmentos mais pesados carregam, em média, cerca de 22 unidades.

Os fragmentos de fissão produzem em seus caminhos, fortes ionizações e seus alcances são relativamente curtos para estes fragmentos tão energéticos. Os alcances no ar de grupos de fragmentos leves e pesados são, aproximadamente, de 2,5 cm e 1,9 cm, respectivamente. Isto é ligeiramente menor do que o alcance de uma partícula alfa de uma fonte de calibração radioativa típica.

Quase todos os produtos de fissão são radioativos e emitem partículas betas. A razão para isto é evidente sob as considerações das relações dos nêutrons para os prótons envolvidos, lembrando que isótopos pesados requerem cerca de 1,6 nêutrons para cada próton a fim de compensar a tremenda força eletrostática (coulombiana) de repulsão.

Os produtos de fissão, desde que sejam formados do urânio, também têm uma relação de nêutrons para prótons de cerca de 1,6. Isótopos de tamanhos intermediários. No entanto, necessitam uma relação de nêutron para próton de 1,3 para a sua estabilidade. É evidente, então, que os produtos de fissão possuirão excesso de nêutrons. Isótopos fortemente neutrônicos normalmente decaem por emissão γ -. Os produtos de fissão são tão ricos em nêutrons que, em média, eles necessitam cerca de três emissões beta para atingir a estabilidade. Isto dá origem a cadeias de decaimento. Um exemplo típico é o decaimento do Isótopo Xe-140 para um isótopo estável de Césio:



Desde que haja cerca de 80 diferentes radioisótopos produzidos em fissão e cada um produz, através de sua cadeia de decaimento, em média, dois radioisótopos adicionais, há, então, mais de 200 espécies radioativas presentes em um curto intervalo de tempo após as fissões.⁽⁵⁾

O Molibdênio -99 também é um produto da fissão do urânio-235. Sendo assim, é produzido pela reação ${}^{235}\text{U} (n, f) {}^{99}\text{Mo}$.

Seu rendimento de fissão é ao redor de 6,1%, encontrando-se, portanto, entre os produtos de fissão de maior rendimento. O ${}^{99}\text{Mo}$ é diluído pelos isótopos estáveis, Mo-97, Mo-98 e Mo-100, gerados na fissão, com rendimento de 18,1%. Apesar disto, sua atividade específica é 1.000 vez maior do que aquela obtida pela reação (n, γ) , levando-se em conta o resfriamento e o tempo de processamento químico.

Como material alvo, pode-se usar urânio natural ou enriquecido em ${}^{235}\text{U}$, na forma de urânio metálico. Entretanto, quando se usam alvos altamente enriquecidos são necessárias precauções especiais quanto à dissipação do calor nuclear, o qual

pode ser localizado e então muito intenso. Este problema pode ser contornado com segurança utilizando-se ligas de U-Al⁽⁶⁾.

Para urânio com baixo enriquecimento em ^{235}U , os alvos mais adequados são os dióxidos. Este material, depois de comprimido e sinterizado na forma cerâmica, é estável e também um bom condutor de calor.

A maior parte do ^{99}Mo produzido no mundo é obtido através do processo de fissionamento do ^{235}U . Este urânio apresenta-se com alto grau de enriquecimento, que denominamos HEU "High Enriched Uranium" (geralmente com a concentração isotópica do ^{235}U atingindo 93%). Este valor alto da concentração isotópica leva ao entendimento como sendo um fator de facilitação da proliferação nuclear.

Entretanto, quando se usam alvos altamente enriquecidos, são necessárias precauções especiais quanto à dissipação do calor nuclear, o qual pode ser localizado e, então, muito intenso. Este problema pode ser contornado, com segurança, utilizando-se ligas de U-Al.

Desta maneira, estão sendo realizadas pesquisas, em todo o mundo, para se conseguir a produção de ^{99}Mo com a utilização de reatores de pesquisa, tendo como base o urânio de baixo enriquecimento, que é denominado de LEU "Low Enriched Uranium" (geralmente com a concentração isotópica menor que 20% de ^{235}U).

Os processos atuais de HEU podem ser classificados em dois principais grupos baseando-se, sempre, em alvo irradiado e na sua dissolução que pode ser ácida ou básica.

O programa "Reduzir o Enriquecimento para Desenvolvimento e Reator de Teste" (RERTR) foi estabelecido em 1978 no Departamento de Energia do Laboratório Nacional de Argonne-(ANL), que continua fundamentando e gerenciando o programa, em coordenação com o Departamento de Estado, a Agência de controle de armas e desarmamento (ACDA) dos EUA e a Comissão Nuclear Regulatória (NRC). O objetivo primário do programa é desenvolver tecnologia que necessite usar LEU ao invés

do HEU em desenvolvimento em reatores de teste, considerando os seguintes parâmetros; sem perdas significativas relativas ao desempenho, economia, e segurança do reator.

Uma das conseqüências da produção de Mo usando-se o LEU é a grande quantidade de ^{239}Pu que é gerado por captura de nêutron pelo ^{238}U .

Cerca de 30 vezes mais ^{239}Pu é gerado em um alvo LEU quando comparado com um alvo HEU para produzir uma quantia equivalente de ^{99}Mo .

Ácidos e Bases são utilizadas na dissolução dos alvos, dependendo do produto e do processo.

3.1.1 Métodos de separação do ^{99}Mo dos produtos de fissão.⁽⁷⁾

Existem registros e trabalhos, desde 1962, para a separação do ^{99}Mo dos produtos de fissão. O primeiro processamento químico foi desenvolvido por Tucker e colaboradores⁽³⁾ em 1962. Diferentes tipos de métodos para a extração do molibdênio podem ser citados:

- A) Processos nos quais se usa a cromatografia em coluna;
- B) Métodos utilizando-se a extração por solventes;
- C) Métodos de separação empregando-se a sublimação;
- D) Processo de separação envolvendo a técnica de precipitação; e
- E) Metodologia de purificação de ^{99}Mo desenvolvida por Sameh.

Pode-se observar que não se chegou a um sistema de purificação do molibdênio ideal no ponto de vista de pureza, necessidade de recursos, tempo e o custo final econômico do método.

O processo de produção do ^{99}Mo através do urânio gera outros produtos de fissão e radionuclídeos transurânicos emissores α , altamente tóxicos.

Entre os produtos de fissão, também se encontram produtos gasosos onde o seu controle é mais complexo.

É necessário, também, incluir a reciclagem do material, tratamento e disposição final dos rejeitos, que são altamente radioativos.

Para a obtenção do produto final puro, é necessária, então, a utilização de processos mais elaborados com maior controle, pessoal especializado na operação e utilização de plantas de processamento mais sofisticadas e que, com os regulamentos de salvaguarda, resultam em um processo bastante complexo também na parte burocrática, aumentando, deste modo, seu custo.

3.2 Produção de ^{99}Mo a partir da ativação neutrônica de Mo

O ^{99}Mo pode ser produzido pela irradiação do Mo com nêutrons, de acordo com a reação: $^{98}\text{Mo} (n, \gamma) ^{99}\text{Mo}$.

A seção de choque na ativação de nêutrons térmicos é de 0,14 barns; entretanto a seção de choque pode ser muito maior, quando há um fluxo de nêutrons epitérmicos, causando a captura de nêutrons por ressonância.

A irradiação do Mo natural num reator produz ^{99}Mo com baixa atividade

As vantagens são as facilidades de irradiação e do preparo do alvo e a baixa quantidade de impurezas, resultando uma dose total de radiação bem inferior a do processo de fissão e, conseqüentemente, uma pequena quantidade de rejeitos.

As desvantagens estão nos valores da seção de choque, que são baixos para os isótopos naturais, o que pode ocasionar uma necessidade de fluxos de neutros elevados e o uso de isótopos enriquecidos.

Os alvos utilizados freqüentemente são MoO_3 e o Mo metálico, sendo que ambos necessitam de irradiações em fluxo alto.

Atualmente, existem quatro tipos diferentes de preparo de geradores de ^{99m}Tc , baseados nas técnicas de separação:^[8]

- ◆ cromatografia em coluna usando alumina;
- ◆ extração por solvente usando metiletilcetona;
- ◆ sublimação do heptaóxido de tecnécio;
- ◆ eluição de gel contendo Mo: MoZr e MoTi.

A técnica de gerador por sublimação é utilizada apenas com ^{99}Mo de baixa atividade específica. O ^{99m}Tc é separado com alta concentração radioativa e livre de impurezas químicas e radioquímica, porém requer aparatos complicados, o que eleva o tempo de separação e a eficiência de separação é menor.

Já a técnica de extração por solvente é utilizada com o ^{99}Mo de baixa atividade específica e o ^{99m}Tc é eficientemente separado com a concentração radioativa e pureza radionuclídica altas. Esta técnica requer aparatos sofisticados e complicados, além de um pessoal altamente qualificado e treinado. Existem riscos de incêndio devido aos vapores de MEK (metiletilcetona), além da possibilidade de interferência devido à formação de resíduos poliméricos orgânicos.

Para se obter geradores viáveis com baixa atividade específica de ^{99}Mo , pesquisadores desenvolveram um gerador no qual o ^{99}Mo é incorporado a um gel insolúvel, que quando pronto e eluído, apresenta eficiente perfil de eluição de ^{99m}Tc .

Quando o ^{99}Mo é produzido pela reação (n, γ) , a técnica de preparo do gerador mais empregada é a eluição de um gel de Mo. Estes geradores são fáceis de operar e livres dos problemas inerentes aos produzidos com ^{99}Mo de fissão. O ^{99m}Tc é separado com boa eficiência (70 – 80%), pureza radionuclídica alta e perfil de eluição bom (≈ 10 mL), que é um pouco maior do que no gerador cromatográfico com alumina que usa ^{99}Mo de fissão^(9,10,11,12.).

A pesquisa inicial foi conduzida na Austrália e, mais recentemente, na China. Mostrou-se que o ^{99m}Tc pode ser separado do gel da mesma maneira, através da solução salina, e com o nível de qualidade idêntica ao obtido do gerador ^{99}Mo por fissão.

3.2.1 Gerador tipo gel no IPEN

Para a obtenção do gel de MoZr, faz-se necessário, inicialmente, preparar o alvo, MoO_3 . Esta preparação é feita colocando-se o MoO_3 em cápsula de alumínio, que são chamadas de "coelhos", e que são seladas hermeticamente e levadas ao Reator IEA-R1m do IPEN para irradiação com fluxo de nêutrons.

Nos experimentos iniciais foram utilizados o MoO_3 na forma de pó. Para melhorar a efetividade da irradiação, aumentou a massa irradiada nas posições definidas, isto é; nas posições próximas ao núcleo do reator.

Foi desenvolvido um processo de compactação do pó, obtendo-se no final um material sólido e rígido, significando o máximo aproveitamento do material em relação à posição especificada no reator. Esses "coelhos" comportam no máximo, 30g de MoO_3 em pó. Porém quando compactado comportam até 50g obtendo assim, o ^{99}Mo com maior atividade específica.

O método estabelecido para a obtenção do gel de MoZr, o material de interesse, teve como base inicial os experimentos desenvolvidos na China. O experimento inicial de vários lotes possibilitou a obtenção de valores, cuja média destes servissem como padrão.

Preparação do gel de MoZr.

1. - Dissolver o MoO_3 com Na OH e ajustar o pH com HNO_3 2M para 4,0. Obtendo-se Na_2MoO_4 .

2.- Dissolver o $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ com H_2O destilada (1g/14ml) e elevar o pH $\geq 1,5$ com Na_2CO_3 3M, resultando ZrOH_2Cl_2 .

3- A reação de 1 com 2 resultará no $\text{ZrO MoO}_4\text{H}_2\text{O}$

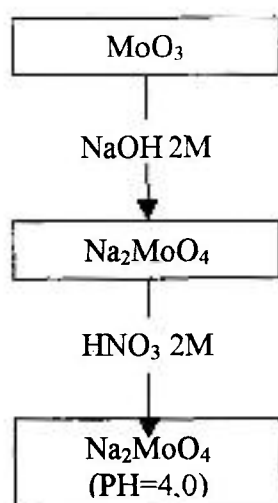
4. - Adiciona-se NaOH. 2M e teremos $\text{ZrNaMoO}_4\text{H}_2\text{O}$ com pH 4,5.

5. - Aquecer a solução de molibdato a 50° C com agitação mecânica.
6. - Adicionar a solução (1) à solução de Zr, gota a gota.
7. - Agitar por 10 minutos.
8. - Ajustar o pH final a $4,5 \pm 0,2$, em agitação e com aquecimento desligado.
9. - Agitar por 15 minutos
- 10.- Filtrar o gel.
- 11.- Secar a 105°C por 4-6 horas
- 12.- Quebrar o gel com solução salina a frio, contendo 0,5% H₂O₂, 4 vezes. Separando os finos.
- 13.- Secar a 105°C por 1-2 horas.

O gel seco apresenta-se normalmente na forma compactada, com grãos muito grandes. Estes são facilmente fragmentados em grãos com tamanhos de até 0,3 mm (ideal para o uso do gel nos geradores), pelo processo de quebra.

A quebra se processa pela simples adição de solução salina, e as partículas mais finas do gel resultante, que não podem ser aproveitadas, são separadas por decantação. A figura 2 mostra um diagrama da formulação básica do preparo do gel de MoZr.

SOLUÇÃO DE Mo



SOLUÇÃO DE Zr

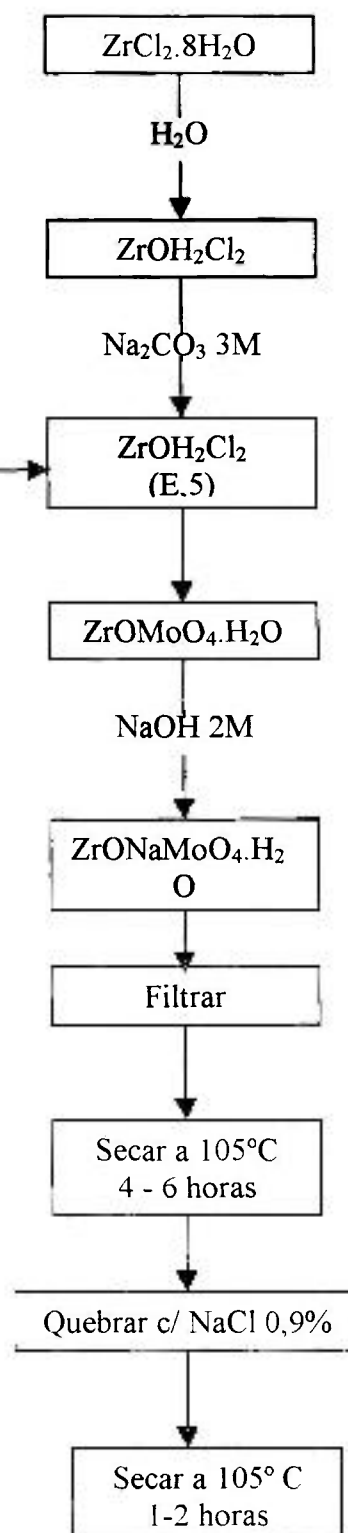


Figura 2: Diagrama da formulação básica do preparo do gel de MoZr.

3.2.2 Preparo do gerador contendo o gel MoZr

O gerador é preparado utilizando-se coluna de vidro de 16mm de diâmetro e 68 mm de comprimento, que são dotadas de placas porosas de vidro na parte inferior (são as mesmas colunas utilizadas no IPEN, na produção rotineira dos geradores contendo ^{99}Mo de fissão. Como mostra a figura 3).

Em cada coluna, coloca-se, inicialmente, 1g de óxido de alumínio, acondicionado a um pH de 3,5, com o objetivo principal de reter o ^{99}Mo livre e, também, ajustar o pH do eluído.

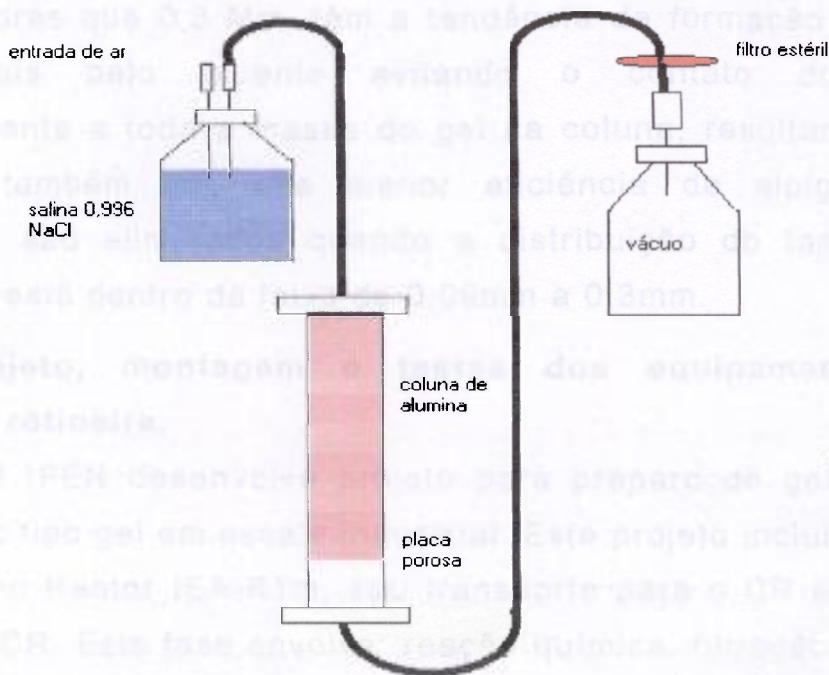


Figura 3: Diagrama do gerador de ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ tipo cromatográfico

3.2.3 Identificação da estrutura do gel.

O gel destinado ao gerador de tecnécio precisa ter a estrutura amorfa. Esta estrutura permite o caráter de trocador iônico, fundamental para a função. O outro tipo de estrutura possível é a cristalina, mas o caráter de trocador iônico fica totalmente comprometido, resultando na diminuição do rendimento de eluição do $^{99\text{m}}\text{Tc}$.

A identificação foi realizada pela difração de raios X com a radiação CuK alfa, disponível no departamento de metalurgia do IPEN.

Outro fator importante para se obter um bom rendimento de eluição é o tamanho da partícula que afeta, também, a qualidade do produto final.

As partículas consideradas muito finas, com tamanho de grãos menores que 0,09mm, podem ser arrastadas da coluna para o eluente contaminando o produto final.

As partículas consideradas muito grossas, com tamanho de grãos maiores que 0,3 Mm, têm a tendência da formação de canais preferenciais pelo eluente evitando o contato do eluente uniformemente a toda a massa do gel na coluna, resultando, dessa maneira, também em uma menor eficiência de eluição. Estes problemas são eliminados quando a distribuição do tamanho das partículas está dentro da faixa de 0,09mm a 0,3mm.

3.2.4 Projeto, montagem e testes dos equipamentos para produção rotineira.

O IPEN desenvolve projeto para preparo de geradores de $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ tipo gel em escala industrial. Este projeto inclui irradiação de alvos no Reator IEA-R1m, seu transporte para o CR e o preparo do gel no CR. Esta fase envolve: reação química, filtração, secagem, quebra e envase de material, confinado numa célula de produção no CR (Centro de Radiofarmácia). Para isso, projetaram-se e confeccionaram-se equipamentos em aço inoxidável tipo AISI 316, com maior capacidade, tais como vaso de reação, suporte para filtros, filtros e tubulações para transporte de materiais. A figura 4 representa o diagrama dos equipamentos no interior da célula de processamento.

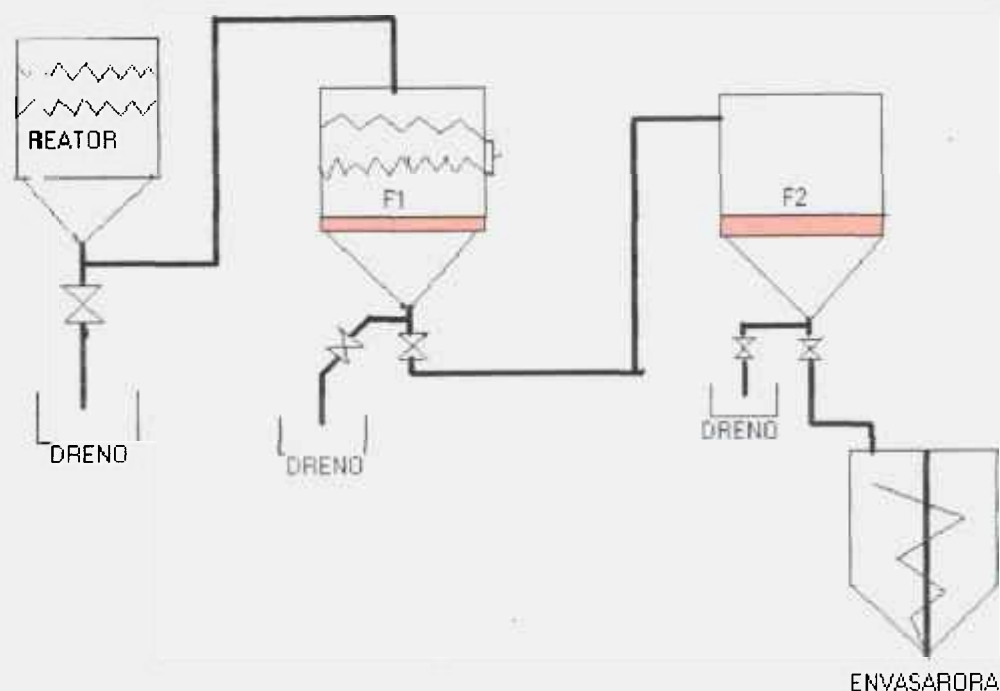


Figura 4: Diagrama dos equipamentos para o processamento do gel de MoZr

No primeiro vaso (reator) ocorrem as seguintes etapas:

- Entrada de reagentes (utilizando bomba peristáltica);
- Dissolução do alvo de MoO_3 , controles de agitação, pH e temperatura;
- Formação do gel de MoZr;
- O gel formado é transferido, utilizando bomba peristáltica, para o segundo vaso (F1 - dotado de um filtro, confeccionado de material sinterizado), onde ocorrem as etapas:
 - Filtração (utilizando ar comprimido);
 - Secagem controlada, (pela passagem de ar comprimido, aquecido em um sistema de resistências); e
 - Quebra do gel, pela adição da mistura: solução salina e peróxido, através de bomba peristáltica.

Nesta fase, o gel é transferido (utilizando ar comprimido) para o terceiro vaso (F2 - dotado de um filtro, confeccionado de material sinterizado), onde ocorrem a filtração e a remoção das partículas com diâmetro inferior (pelo arraste com excesso de solução salina) e a secagem do mesmo pela passagem de ar comprimido aquecido em um sistema de resistências.

O gel seco é, então, transferido (utilizando ar comprimido), para o quarto vaso (a envasadora), onde é fracionado por massa e carregado nas colunas cromatográficas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

4.1 Custos incorrentes.

4.1.1 Molibdênio obtido através da fissão de Urânio.

O molibdênio de alta atividade específica é importado. Devido a este fator, é necessária uma programação bem elaborada e antecipada com a finalidade de atender às necessidades da medicina nuclear no país.

O preço unitário da atividade tem sido negociado, constantemente, para que o custo do produto final não precise ser ajustado. O valor atual, por unidade de atividade em Bequerel (Bq), é de U\$ 189,00.

A necessidade semanal é de 1254,3Bq e com tendência de aumento de demanda de 10% ao ano. Considerando as diversas taxas como; Colect fee, Armazenagem Capatazia, os Fretes internacional e nacional, o custo da importação, semanal, é de U\$ 68.248,00.

A produção é de 260 geradores de tecnécio por semana, resultando em um custo unitário de US\$ 284,37. Se a cotação do dolar for de R\$ 3,00 por US\$1.00, temos o custo de R\$ 853,10 por unidade de gerador.

O pagamento é efetuado 30 dias após a data de embarque, utilizando-se a cotação do dolar comercial à taxa do dia, portanto podemos ter uma pequena variação nos custos

O IPEN disponibiliza à medicina nuclear 7 geradores de tecnécio que são produzidos conforme pedido médico, o que

diferencia entre um tipo e outro é a atividade do gerador de tecnécio que são os seguintes:

9,25x10⁹Bq, 1,85x10¹⁰Bq, 2,77x10¹⁰Bq (750mCi), 3,7x10¹⁰Bq (1000mCi), 4,6x10¹⁰Bq (1250mCi), 4,6x10¹⁰Bq (1500mCi) e 7,4x10¹⁰Bq (2000mCi).

A tabela 1 mostra a distribuição típica semanal de geradores tipo fissão do IPEN.

Tabela 1: Geradores de ⁹⁹Mo-^{99m}Tc - Distribuição semanal

| Gerador (10 ⁹ Bq) | Número de geradores | Σ geradores | % número total de geradores | Σ atividade (Bq) | % atividade total |
|------------------------------|---------------------|-------------|-----------------------------|------------------|-------------------|
| 9,25 | 08 | 08 | 3,08 | 74 | 0,7 |
| 18,5 | 29 | 37 | 14,23 | 639,40 | 5,7 |
| 27,7 | 32 | 69 | 26,53 | 1525,80 | 13,6 |
| 37,0 | 59 | 128 | 49,23 | 3708,80 | 33,0 |
| 46,0 | 34 | 162 | 62,30 | 5272,80 | 46,9 |
| 55,0 | 68 | 230 | 88,46 | 9012,80 | 80,2 |
| 74,0 | 30 | 260 | 100,0 | 12232,80 | 100,0 |

A Tabela 2 mostra o custo total de geradores considerando o valor do custo do ⁹⁹Mo importado:

Tabela 2: Custo total do gerador Custo: 189 US\$/ Ci ⁹⁹Mo

| Gerador (10 ⁹ Bq) | Número de geradores | Σ geradores | Custo (US\$) | Σ Custo (US\$) |
|------------------------------|---------------------|-------------|--------------|----------------|
| 9,25 | 08 | 08 | 430,00 | 430,00 |
| 18,5 | 29 | 37 | 3285,55 | 3715,55 |
| 27,7 | 32 | 69 | 5149,98 | 8865,53 |
| 37,0 | 59 | 128 | 12683,23 | 21548,76 |
| 46,0 | 34 | 162 | 9086,84 | 30635,60 |
| 55,0 | 68 | 230 | 21729,40 | 52365,00 |
| 74,0 | 30 | 260 | 12898,20 | 65263,20 |

A Tabela 3 abaixo mostra o custo da matéria prima dos geradores de fissão:

Tabela 3: Custo da matéria prima dos geradores de fissão

| Atividade (10 ⁹ Bq) | Custo da matéria prima, R\$ | Custo total, R\$ | Gerador (10 ⁹ Bq) | % relativa |
|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------------------|---------------|
| 9,25 | 194,30 | 636,00 | 20 | 0,305 |
| 18,5 | 388,59 | 850,84 | 20 | 0,457 |
| 27,7 | 582,89 | 1064,61 | 20 | 0,547 |
| 37,0 | 777,18 | 1278,91 | 20 | 0,608 |
| 46,0 | 971,48 | 1493,22 | 20 | 0,650 |
| 55,0 | 1165,77 | 1707,52 | 20 | 0,683 |
| 74,0 | 1554,36 | 2136,13 | 20 | 0,728 |

Pode-se observar um fenômeno atípico em relação ao custo de um produto.

Com o cálculo de todos os custos, temos os seguintes:

a. - Custo fixo é todo o custo que mantém constante quando a produção varia. Tem a relação de independência com a produção, mas pode variar com o tempo ex. Imposto predial. Característica, custo por unidade cai a medida que a quantidade produzida aumenta, é o tipo de custo que não pode ser evitado^(13,14).

b. - Custo variável, é um custo que é que é proporcional ao nível de atividade. Característica, custo total aumenta à medida que a atividade aumenta. é o tipo de custo que pode ser evitado^(13,14).

c. - Custo da matéria prima ativa, este custo é diferente em relação aos dois tipos de custos acima descrito, pois varia com o valor da atividade da matéria prima que compõe o gerador.

Portando quanto maior for à atividade do gerador a porcentagem relativa do custo de atividade em relação ao outros produtos aumenta. Iniciando de 30% do custo em 9,25x10⁹Bq, até 73% do custo em 7,4x10¹⁰Bq.

Os custos do gerador de tecnécio com o ^{99}Mo de fissão tem a seguinte distribuição:

| | |
|------------------------------|-----------|
| Mão de obra direto | 41,18% |
| Material de embalagem | 38,47% |
| Material de consumo | 20,28% |
| Depreciação do equipamento | 0,07% |
| <u>Controle da qualidade</u> | |
| Mão de obra direta | 58.829,80 |
| Material de consumo | 44,06 |
| Depreciação de equipamentos | 3.758,48 |
| Total | 62.632,33 |

Os elementos dos custos estão listados a seguir:

1. Abertura de blindagem dos geradores

| |
|--|
| 1.1 Mão de Obra |
| 1.2 Materiais |
| 1.2.1 Fita filamentosa 25 mm |
| 1.2.2 Luva de látex forrada |
| 1.3 Higiene e limpeza |
| 1.3.1 Álcool isopropílico 70% estéril |
| 1.3.2 Pano para limpeza procelam 35x38 |

2. Limpeza da ala quente e cela de geradores e preparação da ala quente.

| |
|--|
| 2.1 Mão de Obra |
| 2.2 Materiais |
| <p>2.2.1 Embalagem para gerador</p> <p>2.2.1.1 RPG - recipiente de polipropileno</p> <p>2.2.1.2 Etiqueta das latas</p> <p>2.2.1.2 Etiqueta código de barra 70x35mm</p> |
| 2.2.2 |
| <p>2.2.2.1 Luva de látex forrada</p> <p>2.2.2.2 Fita crepe 25mm x 50 m.</p> |
| 2.2.3 Higiene e Limpeza |
| <p>2.2.3.1 Pano para limpeza Proclean 35x38</p> <p>2.2.3.2 Álcool isopropílico 70% estéril</p> |

3. Recebimento das blindagens de molibdênio

| |
|-----------------|
| 3.1 Mão de Obra |
|-----------------|

4. Abertura e preparação do material para produção

| |
|--|
| 4.1 Mão de Obra |
| 4.2 Materiais |
| <p>4.2.1 Materiais de consumo</p> <p>4.2.1.1 Ácido Clorídrico</p> <p>4.2.1.2 Frasco de vidro 26,5x 51 mm</p> <p>4.2.1.3 Frasco de vidro 29,5x 67 mm</p> <p>4.2.1.4 Frasco tipo penicilina 50 ml</p> <p>4.2.1.5 Papel indicador de 0 a 5,5</p> <p>4.2.1.6 Selo de alumínio rasgável</p> <p>4.2.1.7 Rolha butílica sextavada</p> <p>4.2.1.8 Touca cirúrgica descartável</p> <p>4.2.1.9 Luva de látex forrada</p> <p>4.2.1.10 Luva de polietileno</p> |
| 4.2.2 Higiene e Limpeza |
| 4.2.2.1 Álcool isopropílico 70% estéril |

5. Carga das colunas de geradores

5.1 Mão de Obra

5.2 Materiais

5.2.1 Materiais de Consumo

- 5.2.1.1 Coluna de vidro pyrex
- 5.2.1.2 Alumina cromatográfica
- 5.2.1.3 Fita teflon ¼
- 5.2.1.4 Cânula de aço inox
- 5.2.1.5 Tampa batoque inferior
- 5.2.1.6 Rolha butílica comum
- 5.2.1.7 Selo de alumínio rasgável

6. Fechamento das colunas do gerador nas blindagens

6.1 Mão de Obra

6.2.1 Materiais de Consumo

- 6.2.1.1 Tampa batoque superior
- 6.2.1.2 Cânula de aço inox
- 6.2.1.3 Rolha butílica comum
- 6.2.1.4 Selo de alumínio rasgável.

7. Carga e descarga das blindagens dos geradores.

7.1 Mão de Obra

7.2 Materiais

7.2.1 Consumo

- 7.2.1.1 Touca cirúrgica descartável
- 7.2.1.2 Luva de látex forrada
- 7.2.1.3 Fita filamentosa 25mm

7.2.2 Higiene e limpeza

- 7.2.2.1 Esfregaço
- 7.2.2.2 Álcool isopropílico 70% estéril
- 7.2.2.3 Pano proclean 35x38

8. Lavador das colunas do gerador

8.1 Mão de Obra

8.2 Materiais

8.2.1 Embalagem

- 8.2.1.1 Frasco de vidro 29,5x67mm
- 8.2.1.2 Selo de alumínio rasgável
- 8.2.1.3 Rolha butílica comum
- 8.2.1.4 Conjunto do sistema de lavagem

8.2.3 Consumo

- 8.2.3.1 Ácido acético glacial PA
- 8.2.3.2 Cloreto de sódio
- 8.2.3.3 Luva de látex
- 8.2.3.4 Luva de polipropileno
- 8.2.3.5 Touca cirúrgica descartável

8.3.3 Higiene e limpeza

- 8.3.3.1 Pano para limpeza Proclean 35x38
- 8.3.3.2 Álcool isopropílico 70% estéril

9. Montagem da tampa do gerador e colocação na lata

9.1 Mão de Obra

9.2 Materiais

9.2.1 Embalagem

9.2.1.1 Tampa de polietileno azul

9.2.1.2 Tampa de polietileno cristal

9.2.1.3 Filtro esterilizante 25mm

9.2.1.4 Filtro tipo seringa 4mm

9.2.1.5 Suporte plástico com agulha

9.2.1.6 Parafusos auto atarrachante

9.2.1.7 Mangueira PVC 15cmx 1,0mm

9.2.1.8 Saco plástico 24x35

9.2.2 Consumo

9.2.2.1 Luva de látex

9.2.2.2 Luva de polietileno

9.2.2.3 Touca cirúrgica descartável

9.2.3 Higiene e limpeza

9.2.3.1 Pano para limpeza proclean 35x 38

9.2.3.2 Álcool isopropílico 70% estéril

10. Fixação da trava de segurança

10.1 Mão de Obra

10.2 Materiais

10.2.1 Embalagem

10.2.1.1 Conjunto de trava de segurança

10.2.2 Consumo

10.2.2.1 Luva de látex

10.2.2.2 Luva de polietileno

10.2.2.3 Touca cirúrgica descartável

10.2.3. Higiene e limpeza

10.2.3.1 Pano para limpeza Proclean 35x38

10.2.3.2 Álcool isopropílico 70% estéril

11. Teste de eluição

11.1 Mão de Obra

11.2 Materiais

11.2.1. Embalagem

- 11.2.1.1 Frasco de vidro 26,5x51mm
- 11.2.1.2 Rolha butílica comum
- 11.2.1.3 Rolha butílica sextavada
- 11.2.1.4 Selo de alumínio não rasgável

11.2.2 Consumo

- 11.2.2.1 Luva de látex
- 11.2.2.2 Luva de polietileno
- 11.2.2.3 Touca cirúrgica descartável

11.2.3. Higiene e limpeza

- 11.2.3.1 Pano para limpeza Sontar
22,4x22,4
- 11.2.3.2 Álcool isopropílico 70% estéril

12. Fechamento do gerador

12.1 Mão de Obra

12.2 Materiais

12.2.1 Embalagem

- 12.2.1.1 Alça plástica flexível

12.2.2 Consumo

- 12.2.2.1 Luva de látex
- 12.2.2.2 Touca cirúrgica descartável

12.2.3 Higiene e limpeza

- 12.2.3.1 Panopar limpeza Proclean 35x38
- 12.2.3.2 Álcool isopropílico 70% estéril

13. Embalagem

13.1 Mão de Obra

13.2. Materiais

13.2.1 Embalagem

- 13.2.1.1 Etiqueta a.a. do gerador
- 13.2.1.2 Embalagem de polistireno
- 13.2.1.3 Balde plástica 20l
- 13.2.1.4 Copo de proteção das agulhas
- 13.2.1.5 Etiqueta a.a. de cloreto
- 13.2.1.6 Etiqueta a.a. de vácuo
- 13.2.1.7 Etiqueta a.a. solução bactericida
- 13.2.1.8 Etiqueta código de barra 75x71mm
(grande)
- 13.2.1.9 Etiqueta a.a. índice de radiação
- 13.2.1.10 Espuma branca
- 13.2.1.11 Frasco de vidro 23,5 x 47 mm
- 13.2.1.12 Frasco de vidro 26,5 x 51 mm
- 13.2.1.13 Rolha butílica comum
- 13.2.1.14 Selo de alumínio rasgável
- 13.2.1.15 Rolha butílica sextavada
- 13.2.1.16 Formulário para devolução de gerador

13.2.2. Consumo

- 13.2.2.1 Cloreto de sódio
- 13.2.2.2 Luva de polietileno
- 13.2.2.3 Formulário tipo embarcador (2v)
- 13.2.2.4 Formulário tipo expeditor (3v) Luva de látex
- 13.2.2.5 Nota Fiscal
- 13.2.2.6 Ficha de emergência

14. Controle da Qualidade

1. etapa – Controle Radioquímico

| |
|--|
| 1.1 Mão de Obra |
| 1.2 Materiais |
| 1.2.1 Acetona |
| 1.2.2 Cloreto de sódio cristalizado |
| 1.2.3 Papel de cromatografia (whatman no 3). |
| 1.2.4 Papel toalha |
| 1.2.5 Extra |
| 1.2.6 Papel para contador ASR |
| 1.2.7 Seringa descartável 10ml |
| 1.2.8 Agulha hipodérmica descartável 25x8mm |
| 1.3 Equipamentos |

2 Etapas – CONTROLE BIOLÓGICO I

3.1 Mão de Obra

3.2 Materiais

- 3.2.1 Meio De Cultura Saboraud
- 3.2.2 Meio De Cultura Triplicase De Soja
- 3.2.3 Tioglicolato
- 3.2.4 Formol
- 3.2.5 Seringa Descartável 10ml
- 3.2.6 Pano P/ Limpeza Proclean 35x38
- 3.2.7 Papel Toalha
- 3.2.8 Fita Crepe 25mmx50m
- 3.2.9 Papel Toalha
- 3.2.10 Detergente Líquido
- 3.2.11 Seringa Descartável 1ml C/ agulha
- 3.2.12 Agulha hipodérmica descartável 25x8mm
- 3.2.13 Álcool isopropílico 70% estéril
- 3.2.14 Ampola água aprotogênica 10ml
- 3.2.15 Kit Pyrogen Teste
- 3.2.16 Luva descartável
- 3.2.17 Máscara descartável tipo cirúrgica

4 ETAPA – CONTROLE FÍSICO

4.1 Mão de Obra

4.2 Materiais

- 4.2.1 Papel indicador de pH

4.1.2 Gerador tipo gel produzido no IPEN

A Tabela 4 mostra os valores de atividade específica de ^{99}Mo obtidos nas diversas posições do irradiador de Be, localizado no núcleo do Reator. A irradiação foi feita a 5MW, extrapolando-se os valores para 120 horas de irradiação.

Tabela 4: Atividade específica de ^{99}Mo no irradiador de Be

| CANAL | POSIÇÃO | $10^9\text{Bq } ^{99}\text{Mo} / \text{g Mo}$ |
|-------|---------|---|
| 1 | 1 | 11,72 |
| | 2 | 25,74 |
| | 3 | 33,62 |
| | 4 | 40,37 |
| | 5 | 42,72 |
| | 6 | 40,88 |
| | 7 | 33,72 |
| | 8 | 18,65 |
| 2 | 1 | 8,72 |
| | 2 | 20,18 |
| | 3 | 32,15 |
| | 4 | 39,50 |
| | 5 | 40,52 |
| | 6 | 37,88 |
| | 7 | 29,51 |
| | 8 | 17,03 |

A atividade específica média foi cerca de $3,7 \times 10^{10} \text{Bq } ^{99}\text{Mo/g Mo}$. Este valor restringe a atividade do gerador tipo gel possível de ser produzida no IPEN.

A Tabela 5 mostra a massa de gel necessária para produzir os geradores nas condições de irradiação de 2 e 5 MW.

Tabela 5: massa de gel para produzir geradores

| Gerador (10^9Bq) | 60 h contínuo 5MW | 120 h contínuo 5MW | 60 h contínuo 2MW | 120 h contínuo 2MW |
|--------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| | massa do gel (g) | massa do gel (g) | massa do gel (g) | massa do gel (g) |
| 9,25 | 5,19 | 3,12 | 12,97 | 7,80 |
| 18,50 | 10,37 | 6,24 | 25,92 | 15,60 |
| 27,70 | 15,56 | 9,36 | 38,90 | 23,40 |
| 37,00 | 20,74 | 12,48 | 51,85 | 31,20 |

É possível produzir geradores de $9,25 \times 10^9$ e $19,5 \times 10^9$ Bq irradiando-se 160 g de MoO_3 (4 coelhos) nas posições centrais do irradiador de Be por 64 horas em regime contínuo, a 5MW. Para os geradores de $27,7 \times 10^9$ Bq, a massa do gel é maior do que a estabelecida para uma boa eluição do gerador (10 g).

A figura 5 mostra uma curva de eficiência de eluição do gerador tipo gel.

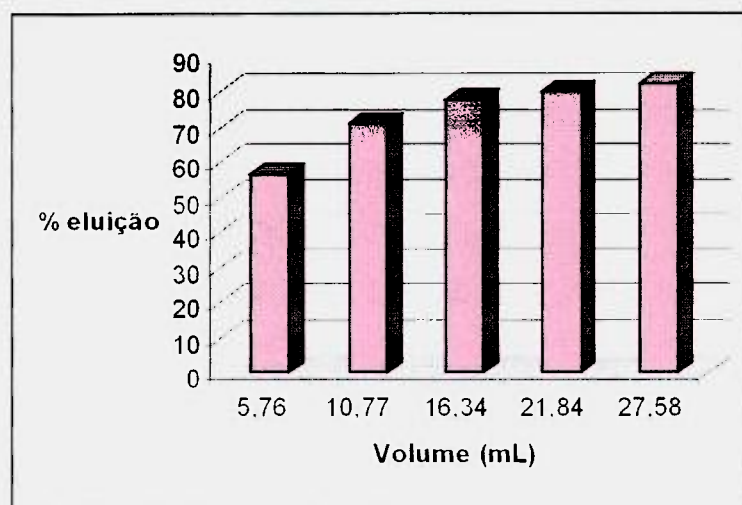


Figura 5: Curva de rendimento de eluição do gerador tipo gel

Os resultados são reprodutivos, com cerca de 71% do ^{99m}Tc eluído em cerca de 10 mL, superior aos obtidos pela China.

O primeiro custo que advém neste processo é o do molibdênio irradiado pelo reator. Para isso, é necessário, que o Mo seja colocado em uma cápsula, hermeticamente fechada, para ser irradiado no reator por 60 horas.

O custo de irradiação é de R\$ 0,40 por hora, com um fluxo de 10^{12} neutrons/cm².s.

Cada preparação da cápsula, para se irradiar o Molibdênio, necessita de muito cuidado por precisa estar estanque, necessitando, depois, da preparação do teste hidrostático. O seu custo é de R\$ 32,00 por cápsula.

O fluxo necessário do reator, para o preparo do Mo gel, para a atividade utilizada hoje, é de $4 \cdot 10^{13}$ neutrons/cm²s. Portanto, o custo de irradiação é de R\$ 1.200,00 por cápsula.

Acrescentando o custo do preparo das cápsulas, fica em R\$ 1.232,00. Como são 4 cápsulas, teremos um custo total de R\$ 4.928,00.

Com as quatro cápsulas é possível a fabricação de 60 geradores de tecnécio, portanto resultará em um custo unitário de R\$ 82,13. Este custo é muito menor do que o do gerador com Mo de fissão.

Os outros custos, como mão de obra, embalagem, preparo de acessórios é basicamente o mesmo para os 2 tipos de geradores.

4.1.3 Gerador tipo gel produzido no IPEN – alvo enriquecido

Uma das alternativas para poder se produzir mais geradores tipo gel no IPEN, diminuindo a importação total de ⁹⁹Mo, é o uso de ⁹⁸Mo enriquecido a 96,0%.

A Tabela 6 mostra os cálculos de custo para a produção destes geradores com alvos enriquecidos.

Tabela 6: Custo para a produção de geradores

| Gerador (10 ⁹ Bq) | Alvo | 64 h massa do gel (g) | 64 h custo (US\$) | 120 h massa do gel (g) | 120 h custo (US\$) |
|---------------------------------|--------------------|-----------------------------|----------------------|------------------------------|--------------------------|
| 9,25 | natural | 5,05 | 0.34 | 3,43 | 0.23 |
| 9,25 | 75%nat. 25%enr. | 2,90 | 167.90 | 2,00 | 115.60 |
| 9,25 | 50%nat. 50%enr. | 2,04 | 236.16 | 1,43 | 165.05 |
| 9,25 | enriquecido | 1,29 | 297.00 | 0,90 | 209.00 |
| 18,50 | natural | 10,10 | 0,68 | 6,86 | 0,46 |
| 18,50 | 75%nat. 25%enr. | 5,81 | 335.79 | 4,00 | 231.20 |
| 18,50 | 50%nat. 50%enr. | 4,08 | 472.32 | 2,86 | 330.11 |
| 18,50 | enriquecido | 2,57 | 594.00 | 1,81 | 418.00 |
| 27,70 | natural | 15,15 | 1.02 | 10,29 | 0.69 |
| 27,70 | 75%nat. 25%enr. | 8,71 | 503.69 | 6,00 | 346.80 |
| 27,70 | 50%nat. 50%enr. | 6,12 | 708.48 | 4,29 | 495.16 |
| 27,70 | enriquecido | 3,86 | 891.00 | 2,71 | 627.00 |

Para estes cálculos foram utilizados os preços dos materiais naturais e enriquecidos: Custo de MoO₃ natural: R\$ 587,00/500 g → R\$ 1,17 / g MoO₃ → R\$ 0,78 / g Mo → US\$ 0.26 / g Mo → (1US\$ = 3,00 R\$); Custo do MoO₃ enriquecido a 96%: US\$ 1,400.00/g MoO₃ → US\$ 924.00/g Mo.

O custo do MoO₃ enriquecido torna inviável a produção dos geradores tipo gel irradiando-se este tipo de alvo, mesmo misturado ao material natural, sem que esteja desenvolvido o método de recuperação de Mo do gel de molibdato de zircônio. Esta tecnologia é objetivo de uma pesquisa dentro do projeto do gerador tipo gel.

4.2 Análise crítica dos processos de produção

Pode-se observar que os dois processos de obtenção de molibdênio, atualmente utilizados, tem os seus fundamentos de produção bem distintos, podendo-se destacar vários pontos em que, para a finalidade do gerador de tecnécio, podem ser considerados de positivos e negativos. Na análise comparativa dos dois processos de obtenção de molibdênio destacam-se os seguintes aspectos:

4.2.1 Molibdênio por fissão

Vantagens:

- Mo com alta atividade específica. O molibdênio obtido através da fissão do urânio-235 tem uma atividade específico maior, portanto permitindo o preparo do gerador cromatográfico com alumina.
- Alta atividade do Mo. Devido à alta atividade do Mo o gerador de tecnécio também resultará em uma atividade maior possibilitando produzir gerador de tecnécio até $74 \cdot 10^9 \text{Bq}$
- Baixo volume de eluição. Devido à alta atividade específica do Mo, que garante montagem de pequenos geradores, pode obter o produto final com menor volume do eluente.

Desvantagens:

- Alto Custo. A obtenção do Mo, através da fissão do urânio, é realizado no reator, também, gerando vários outros produtos, que necessariamente, são retirados através de processos químicos complexos e resultando em rejeitos radioativos.
- Grande gerenciamento de rejeitos. Os rejeitos, sólidos, líquidos e gasosos, gerados na obtenção do Mo, necessitam de um complexo processamento.
- Altas doses de radioatividade do Mo, obtido por este processo, pois apresenta uma alta atividade radioativa. Portanto, faz se necessário um cuidado maior para a sua manipulação e blindagem, aumentando o custo também.

- Muitos contaminantes resultantes do processo, exigindo um complicado e cuidadoso controle de qualidade.
- Tempo de processamento alto.
- Equipamentos complexos para o processamento químico. Devido à complexidade do processamento químico, faz-se necessário à utilização de grande número de equipamentos.
- Separação química complexa. A separação complexa, devido ao grande número de contaminantes e a necessidade do grau de pureza necessária.
- Número maior de recursos humanos alocados ao empreendimento.
- Dificuldade na operação de importação. Podemos verificar que existem diferentes tipos de dificuldades: a dificuldade burocrática para poder importar o produto, sendo necessário à obtenção de várias licenças, acordos bancários, contato com fornecedores que estão sob égide de outras leis, da garantia de se conseguir o produto especificado no tempo correto, e uma equipe de especialistas que venha possibilitar a importação.
- Licenciamento para a importação é mais específico e burocrático por ser material radioativo;
- Todo o sistema de transporte é especial;
- Obtenção de autorização não necessário em outros tipos de importação;
- Controle com muito rigor do material.
- Exigência de mais documentos.
- Possível falha no fornecimento contratado. Sendo o fornecedor de um país diferente, podem acontecer fatores totalmente alheios a nossa realidade, que possam impossibilitar que o fornecedor possa não cumprir o acordo.
- Preço do produto pode variar com diversos interesses comerciais e políticos (venda da matéria prima e não do produto, somos concorrentes). Interesses políticos podem influenciar na exportação de qualquer produto "estratégico" para outro país,

desde tornar excessivamente caro ou simplesmente proibir a exportação.

- Decaimento de radioatividade após o processamento de fabricação, durante o transporte.

4.2.2 Molibdênio gel

Vantagens:

- Baixo Custo de obtenção: Processo simples de obtenção, irradiação do molibdênio no reator não gera contaminantes.
- Processo simples: Reação química de baixa complexidade.
- Menor dose de radiação: Facilidade de manuseio.
- Menos rejeitos: Como o processo trabalha diretamente com o molibdênio, não há geração de contaminantes e os rejeitos são próprios do processo químico do gel.
- Domínio da tecnologia: Não dependência de importação.
- Versatilidade nos atendimentos emergenciais: Um aumento ocasional de demanda do produto.
- Geração de empregos no país: Formação de mão de obra altamente especializada.
- Desenvolvimento tecnológico: Incentivo à pesquisa no país e retorno à sociedade. O grande avanço científico do projeto foi preparar geradores do tipo gel com desempenho na eluição do ^{99m}Tc similares aqueles obtidos com ^{99}Mo de fissão. O único país que mantém uma produção rotineira de geradores tipo gel é a China. Dominada a tecnologia, esta poderá ser repassada a outros países em desenvolvimento, além de significar no futuro uma auto suficiência do Brasil em relação ao mais importante produto na área de diagnóstico em Medicina Nuclear.

Desvantagens:

- Baixa atividade específica: O produto final apresenta atividade específico menor que o molibdênio utilizado produzido pela fissão de urânio.

- Maior volume do eluído, limite aceito é de 12 mL. Como a atividade específica do molibdênio gel é mais baixa, o ^{99m}Tc é eluído em volume maior.

Nas condições atuais do IPEN, pode-se estimar uma economia anual se o Reator operar a 5MW, para a produção de geradores tipo gel. A tabela 7 mostra o custo do consumo de elementos combustíveis para a operação anual do Reator do IPEN, assumindo o custo de 01 elemento combustível como sendo de US\$ 28,000.00.

Tabela 7: Custo dos elementos combustíveis

| Ritmo de operação | $\text{U}_3\text{O}_8\text{Al}$ d = 2,3 g/cm ³ quantidade | $\text{U}_3\text{O}_8\text{Al}$ d = 2,3 g/cm ³ US\$ | $\text{U}_3\text{Si}_2\text{Al}$ d = 3,0 g/cm ³ quantidade | $\text{U}_3\text{Si}_2\text{Al}$ d = 3,0 g/cm ³ US\$ |
|-------------------|---|--|--|---|
| 5 MW, 120 h | 22 | 616,000.00 | 16 | 448,000.00 |
| 5 MW, 60 h | 11 | 308,000.00 | 08 | 224,000.00 |
| 2 MW, 60 h | 05 | 140,000.00 | 04 | 112,000.00 |

A tabela 8 mostra o balanço econômico entre o custo dos elementos combustíveis durante 1 ano de operação e a economia gerada pela diminuição da importação de ^{99}Mo , sem contar com a receita gerada pela venda.

Tabela 8: Balanço anual de consumo de elementos combustíveis e economia de divisas

| Ritmo de operação | Custo [*] , US\$ ($\text{U}_3\text{O}_8\text{Al}$) | Custo [*] , US\$ ($\text{U}_3\text{Si}_2\text{Al}$) | Economia ^{**} US\$ gerador gel |
|-------------------|--|---|--|
| 5 MW, 60 h | 308,000.00 | 224,000.00 | 148,027.50 |
| 5 MW, 120 h | 616,000.00 | 448,000.00 | 426,667.50 |

A economia se torna sensível a partir da irradiação a 120 horas, mas não se pode esquecer que com o aumento da potência do Reator para 5 MW, outros radioisótopos podem ser nacionalizados, como ^{131}I e ^{192}Ir , que se somados ao gerador tipo gel, trariam um balanço muito positivo neste estudo, como mostra a Tabela 9.

Tabela 9: Balanço anual de consumo de elementos combustíveis e economia de divisas

| Ritmo de operação | Custo, US\$ ($\text{U}_3\text{O}_8\text{Al}$) | Custo, US\$ ($\text{U}_3\text{Si}_2\text{Al}$) | Economia** US\$ | | |
|-------------------|--|---|---------------------|-------------|-------------------|
| | | | ^{131}I | gerador gel | ^{192}Ir |
| 5 MW, 60 h | 308,000.00 | 224,000.00 | 275,890.05+ | 148,027.50+ | 162,081.00 |
| | | | 585,998.55 | | |
| 5 MW, 120 h | 616,000.00 | 448,000.00 | 496,461.15+ | 426,667.50+ | 162,081.00 |
| | | | 1,085,209.65 | | |

5 CONCLUSÃO

A análise crítica dos dados coletados neste trabalho evidencia que o custo de fabricação do gerador de tecnécio, que tem por base a utilização do Molibdênio por fissão de urânio é na média de R\$ 853,10 por gerador, e é maior que do que o custo do Molibdênio gel, produzido no IPEN, que é de R\$ 82,13. Portanto, se considerarmos somente o fator econômico, é mais vantajoso à utilização do molibdênio aqui produzido, pois o seu custo é 10 vezes menor do que o custo do importado. Por outro lado, temos características técnicas e limites de produção que restringem o atendimento para todas as necessidades médicas; isto é: são necessários diferentes produtos para cada situação médica, resultando nos produtos com vários graus de atividade, $9,25 \cdot 10^9$; $18,5 \cdot 10^9$; $27,7 \cdot 10^9$; $37 \cdot 10^9$; $46 \cdot 10^9$; $55 \cdot 10^9$ e $74 \cdot 10^9$ Bq, que o Mo gel não pode atender, por ora.

Pela razão acima exposta, o resultado final mais viável seria a de produzir, internamente o gerador tipo gel com atividades de $9,25 \cdot 10^9$ e $18,5 \cdot 10^9$ Bq, pois permite o desenvolvimento, a capacitação técnica e a geração de empregos.

Para os geradores com capacidades acima de $18,5 \cdot 10^9$ Bq, deverá ser dada continuidade da importação da matéria prima para atender a gama de necessidades do país.

A produção interna é de suma importância ao país, mesmo não se considerando os fatores econômicos, os aspectos sociais, a independência tecnológica $18,5 \cdot 10^9$ no contexto de política internacional.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 RELATÓRIO DE GESTÃO 2002 IPEN, Intranet/ institucional/ projeto de excelência.
- 2 SILVA, N. C.do Estudo e Otimização das Condições de Preparo do Gel de Molibdato de Zircônio Usado nos Geradores de ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$, São Paulo: 2001. Dissertação de Mestrado – IPEN-CNEN/SP
- 3 TUCKER, W. D.; GREENE, M. W.; MURRENHOF, A. Production of carrier-free tellurium-132, iodine-133, molybdenum-99 and technetium-99m from neutron-irradiated uranium by fractional sorption on aluminum oxide. Atompraxis, v.8, p.163, 1962
- 4 LAVINAS, T., Dissertação apresentada para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Aplicações. P. 14-32, 1998.
- 5 FUGA, R.; PASQUALETTO, H. , Curso preparatório de operadores do reator, COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, DEPARTAMENTO DE OPERAÇÃO DE REATORES, SP, 1988
- 6 VANDEGRIFT, G.F; SNELGROVE, J.L. AASE, S.; BRETSCHER, MM.; BUCHHOLZ, B.A.; CHAKO, D.J.; CHAMBERLAIN, D.B.; CHEN, L.; CONNER, C.; DONG, D.; HOFMAN, G.L.; HUTTER, J.C.; KNIGHTON, G.C., Converting

targets and processes for fission-product molybdenum-99 from high-to low-enriched uranium, production technologies for molybdenum-99 and technetium-99m, IAEA, -TECDOC-1065, 1999

- 7 MAOLIANG, L.: Production of gel-type ^{99m}Tc generator for nuclear medicine, 12 KAIF/KNS annual conference, Seoul (Korea, Republic of) 3-4 April 1997.
- 8 Boyd, R.E. Molybdenum-99: Technetium-99m generator, *Radiochimica Acta*, v. 30, p. 123-145, 1982.
- 9 Boyd, R.E., Technetium - 99m generators - the available options, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, v.33, p. 801- 809, 1982.
- 10 YU, CHEN, Production of gel ^{99m}Tc generator for nuclear medicine. Lecture of IAEA expert mission for Brazil, São Paulo, 1996.
- 11 YU, CHEN, Gel ^{99m}Tc generator quality control. Nuclear Power Institute of China
- 12 SARASWARTHY, P.; SARKAR, S.K.; PATEL, R.R.; AROROA, S.S.; NARASIMHAN, D.V.S., ^{99m}Tc gel generators based on zirconium molybdate Mo-99. Pt. 1. Process standardisation for production *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, v.83, p. 97- 102, 1998
- 13 Leone, George S.G., Custos planejamento, implantação e controle, ed. Atlas, 1ª ed, 1982
- 14 Ministério do Planejamento Orçamento e Gestão, Curso ENAP, gerenciamento de custos no setor público, Brasília 1999