



**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Projeto e desenvolvimento de um dispositivo para abertura de cápsulas de  
alumínio irradiadas no reator IEA-R1 do IPEN**

**FABIO GURIAN CASTANHO**

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

**Orientador:  
Prof. Dr. Osvaldo Luiz da Costa**

**São Paulo  
2021**

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Autarquia Associada à Universidade de São Paulo**

**Projeto e desenvolvimento de um dispositivo para abertura de cápsulas de  
alumínio irradiadas no reator IEA-R1 do IPEN**

**Versão Corrigida**

**Versão Original disponível no IPEN**

**FABIO GURIAN CASTANHO**

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

**Orientador:  
Prof. Dr. Osvaldo Luiz da Costa**

**São Paulo  
2021**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

CASTANHO, F. G. **Projeto e desenvolvimento de um dispositivo para abertura de cápsulas de alumínio irradiadas no reator IEA-R1 do IPEN.** 2021. 67p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br>>.

Castanho, Fabio Gurian

Projeto e desenvolvimento de um dispositivo para abertura de cápsulas de alumínio irradiadas no reator IEA-R1 do IPEN / Fabio Gurian Castanho; orientador Osvaldo Luiz da Costa. -- São Paulo, 2021.

67 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Aplicações) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2021.

1. Dispositivo de abertura. 2. Cápsula irradiada. 3. Abridor de cápsulas. 4. Coelho. I. Costa, Osvaldo Luiz da, orient. II. Título.

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

Autor: Fabio Gurian Castanho

Título: Projeto e desenvolvimento de um dispositivo para abertura de cápsulas de alumínio irradiadas no reator IEA-R1 do IPEN.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia Nuclear da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Data: 23/09/2021

### **BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr.: Osvaldo Luiz da Costa

Instituição: IPEN

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr.: Pedro José Pompeia

Instituição: ITA

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr.: David Mendez Soares

Instituição: UNICAMP

Julgamento: Aprovado

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho:

Ao meu pai, Eduardo,

À minha mãe, Elenir,

À minha esposa, Denise, e

Ao meu filho, Murilo.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço,

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares pela oportunidade de retomada da minha atividade acadêmica, resultando na produção deste trabalho.

À Universidade de São Paulo, e corpo docente, pela formação de excelência que me ofereceram, e pelos ótimos momentos vividos durante minhas passagens por esta instituição.

Ao meu orientador e amigo, Dr. Osvaldo Luiz da Costa, um agradecimento especial pelo incentivo, pela motivação, pela serenidade e atenção dispensadas a mim e ao decorrer do trabalho. Gratidão eterna!

Ao meu pai e minha mãe, que sempre acreditaram e incentivaram, e que ainda se orgulham de cada pequena coisa que os filhos aprontam. Muito, muito, muito obrigado por todo o carinho!

À minha esposa e filho, pela parceria, companheirismo, incentivo e felicidade, que me fazem sempre querer melhorar. Amo vocês!!

Aos meus amigos, que também contribuíram positivamente durante esse trabalho, principalmente pelas sempre presentes manifestações de incentivo.

## RESUMO

CASTANHO, F. G. ***Projeto e desenvolvimento de um dispositivo para abertura de cápsulas de alumínio irradiadas no reator IEA-R1 do IPEN.*** 2021. 67p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br>>.

Este trabalho propõe um novo dispositivo para abertura de cápsulas de alumínio irradiadas em reator nuclear, implementando melhorias ao procedimento de abertura, com foco na segurança do operador. As principais deficiências identificadas no dispositivo de abertura atual são: a) os detritos radioativos gerados pelo corte contaminam o ambiente de operação; b) o movimento de rotação da cápsula durante a abertura pode causar danos ao material alvo e ao seu invólucro, levando à liberação de materiais radioativos. O novo dispositivo de abertura foi projetado com as seguintes características: a) facilidade na inserção e remoção das cápsulas por meio de telemanipuladores; b) o tipo de corte foi modificado de abrasivo para lâmina tipo disco de corte, reduzindo a geração de pequenos detritos radioativos; c) a rotação da cápsula foi substituída por um movimento na cabeça de corte, mantendo a cápsula fixa; d) aperfeiçoamento de controle, precisão do processo e, parada de emergência, por meio de sistemas melhorados de operação do dispositivo, com comando remoto em painel de controle. Os testes comparativos mostraram que o sistema atual produz em média 0,3(2) mg de detritos por corte, enquanto o sistema proposto de lâmina tipo disco de corte apresentou uma redução de mais de 99 % na geração de detritos. Além disso, a imobilização da cápsula durante a abertura evita danos aos materiais alvo radioativos.

Palavras chave: dispositivo de abertura, abridor de cápsulas, cápsula irradiada, coelho.

## ABSTRACT

CASTANHO, F. G. ***Design and development of a device for the opening of irradiated aluminum capsules in the IPEN IEA-R1 nuclear reactor.*** 2021. 67p. Dissertation (Master in Nuclear Technology), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN / SP, São Paulo. Available in: <<http://www.teses.usp.br>>

This work proposes a new device for opening irradiated aluminum capsules, with the implement of a better opening procedure, focusing on operator safety. The main deficiencies which were identified about the current opening procedure are: a) the radioactive debris generated by the cutting contaminate the environment of manipulation; b) the rotation movement of the capsule during opening may cause damage to the target material and its casing, leading to the release of radioactive target materials. The new opening device was designed with: a) easy insertion and removal of the capsules being done by telemanipulators; b) the type of cutting modified from abrasive to cutting wheel blade, allowing minimal generation of small size radioactive debris; c) the rotation of the capsule being replaced by a movement in the cutting head, keeping the capsule still; d) greater control, process accuracy and emergency stop, through improved remote operating system. Comparative tests showed that the current system produces average 0.3(2) mg of debris per cut, while the proposed system of cutting wheel blade presented a reduction of more than 99 % in the generation of debris. In addition, the immobilization of the capsule during the opening prevents damage to the radioactive target materials.

Keywords: capsule opener, opening device, irradiated capsule, rabbit.



## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 – Cápsula de alumínio padrão para irradiação no reator IEA-R1, exemplos representativos: (a) dimensional, (b) cápsula padrão e (c) cápsula com tampa selada por solda TIG (Tungsten Inert Gas) .....	14
Figura 2 – Blindagem de transporte de material radioativo utilizada no IPEN .....	15
Figura 3 – Representação esquemática do processo envolvendo a cápsula .....	16
Figura 4 – Dispositivo de abertura de cápsulas – (i) no interior da hot cell do Laboratório de Produção de Fontes para Radioterapia do Centro de Tecnologia de Radiações – IPEN, em destaque (a) pistão pneumático, (b) ferramenta de corte, (c) abertura para inserção das cápsulas e (d) pinças telemanipuladoras; (ii) no interior da capela da área de manipulação de radionuclídeos do Reator Nuclear IEA-R1 .....	17
Figura 5 - Exemplos de detritos resultantes do corte da cápsula .....	18
Figura 6 – (a) Ampola de quartzo com alvos sólidos; (b) sequência de encapsulamento com: tubo de quartzo, ampola de quartzo, folha de alumínio envolvendo a ampola, inserção em cápsula de alumínio e cápsula de alumínio selada .....	19
Figura 7 - (a) Ampolas de alumínio com sulco, para irradiação de gás; (b) arranjo contendo três ampolas de alumínio dentro da cápsula; (c) ampolas de quartzo contendo material alvo em pó, prontas para serem colocadas na cápsula .....	19
Figura 8 – Dispositivo para abertura de cápsulas, proposto por Chistov .	22
Figura 9 – Planta do dispositivo proposto por Douis et al. para abertura de cápsulas .....	23

Figura 10 – Vista em corte lateral (I-I da figura 9) do dispositivo de abertura de cápsulas .....	24
Figura 11 – Planta do abridor de cápsulas, vista superior .....	26
Figura 12 – Vista em corte lateral (II-II Figura 11) do abridor de cápsulas .....	27
Figura 13 – Ampliação da vista lateral do suporte do cortador .....	27
Figura 14 – Vista em corte lateral (IV-IV Figura 11) do abridor de cápsulas .....	28
Figura 15 – Planta do abridor de cápsulas onde é mostrado o mecanismo de fixação .....	29
Figura 16 – Visão lateral da ferramenta, mostrada em uma posição operacional típica para corte de tubulação horizontalmente posicionada. Em tracejado estão indicados o cabeçote de corte e os suportes dos discos de corte .....	30
Figura 17- Corte transversal da ferramenta, com maior detalhamento das partes internas .....	31
Figura 18 – Corte lateral da ferramenta, com detalhamento das partes internas .....	31
Figura 19 – Detalhe do passo de avanço e retração da lâmina de corte ..	32
Figura 20 – Dispositivo cortador de tubos de Lazarevic .....	34
Figura 21 – Perspectiva do dispositivo apresentando sua montagem e mecanismos internos .....	35
Figura 22 – Mecanismo de corte, vista explodida (esq.), vista superior (dir.) .....	36
Figura 23 – Perspectiva do cortador de tubulação com partes internas expostas .....	37
Figura 24 – Detalhe do conjunto de tração e do cabeçote de corte .....	38
Figura 25 – Detalhes do cabeçote de corte, com carcaça (A), carcaça removida (B) expondo peças internas .....	39
Figura 26 – Desenho técnico esquemático em corte lateral do dispositivo em uso no IPEN .....	40
Figura 27 – Imagem de dispositivo de corte a plasma (a) e laser (b) operando o corte de tubos .....	41

Figura 28 – Detalhe de mecanismo de equipamento comercial para corte de tubos .....	42
Figura 29 – Cortador de tubos manual .....	43
Figura 30 – Lâminas tipo disco de corte e montagem em suporte com fuso de posicionamento .....	43
Figura 31 – Teste de corte com ferramenta atual, ferramenta acoplada ao torno (esq.), cortando a cápsula (dir.) com utilização de cavilha de madeira como suporte .....	45
Figura 32 – Cápsula colapsada devido ao corte impreciso .....	47
Figura 33 – Teste de corte com lâmina tipo disco, montagem da ferramenta no torno (esq.), cortando a cápsula (dir.) com cavilha de madeira como suporte .....	48
Figura 34 – Detalhe de cápsula aberta por ferramenta atual (bits) (esq.) e cápsula aberta por lâmina tipo disco de corte (dir.) .....	48
Figura 35 – Detalhe da deformação da parede da cápsula na região do corte, causada pela velocidade excessiva de avanço do disco de corte .....	49
Figura 36 – Desenho do dispositivo proposto, com indicação das partes .	50
Figura 37 – Desenho do dispositivo proposto, vista superior (esq.), vista lateral (dir.) .....	50
Figura 38 – Desenhos do dispositivo proposto, perspectivas laterais com a presilha aberta e a cápsula posicionada .....	51
Figura 39 – Presilhas tipo aba, em posição fechada (esq.) e aberta com a cápsula posicionada (dir.) .....	52
Figura 40 – Exemplo de montagem do sistema de fixação da cápsula com atuador pneumático para movimentação da presilha .....	52
Figura 41 – Exemplo de montagem do sistema de fixação da cápsula com servo motor para movimentação da presilha .....	53
Figura 42 – Exemplo de montagem do sistema de fixação da cápsula com trava eletromecânica para as presilhas .....	53
Figura 43 – Exemplo de montagem do sistema de fixação da cápsula com trava eletromagnética para as presilhas .....	54
Figura 44 – Detalhe do acoplamento direto do motor ao cabeçote de corte .....	55

Figura 45 – Detalhe do suporte dos discos de corte, parte inferior (esq.), parte superior (dir.) .....	56
Figura 46 – Cabeçote de corte em dois arranjos possíveis, com um disco de corte e um apoio (esq.), e com um disco de corte e dois apoios (dir.) .....	57
Figura 47 – Cabeçote de corte com três lâminas de disco, como sugerido nas imagens completas do dispositivo .....	57
Figura 48 – Indicação das dimensões verticais do dispositivo .....	58
Figura 49 – Diagrama da operação do dispositivo proposto .....	61

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	13
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	20
<b>2.1</b>	<b>Objetivos específicos</b>	20
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	21
<b>3.1</b>	<b>Dispositivo para abertura de alvos irradiados de Chistov</b>	21
<b>3.2</b>	<b>Dispositivo de abertura de tubos irradiados de Douis et al.</b>	22
<b>3.3</b>	<b>Dispositivo de abertura de cápsulas de Nakajima</b>	25
<b>3.4</b>	<b>Ferramenta cortadora de tubos de Wrate</b>	30
<b>3.5</b>	<b>Dispositivo cortador de tubos de Lazarevich</b>	33
<b>3.6</b>	<b>Ferramenta para corte de tubos de Milwaukee tools</b>	37
<b>3.7</b>	<b>Dispositivo de abertura de cápsulas do IPEN</b>	40
<b>3.5</b>	<b>Outras formas de cortes de tubos de alumínio</b>	41
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	42
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	44
<b>5.1</b>	<b>Sistema de fixação da cápsula</b>	51
<b>5.2</b>	<b>Sistema de corte da cápsula</b>	55
<b>5.3</b>	<b>Sistema de comando, controle e segurança</b>	59
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	62
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	64

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de reatores nucleares de pesquisa para a produção de radionuclídeos usados na indústria, agricultura, medicina e pesquisa científica constitui uma atividade importante de programas nacionais em energia nuclear. Entre inúmeros radionuclídeos produzidos destacam-se o molibdênio-99, o iodo-131 e o fósforo-32. A irradiação simultânea de várias amostras, a economia na produção, a irradiação de grandes volumes — comparados com volumes irradiados em aceleradores de partículas — e a possibilidade de produzir uma grande variedade de radionuclídeos são alguns dos aspectos positivos que a irradiação em reatores nucleares oferecem (KIM et al., 2011).

No Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares — IPEN, o reator nuclear de pesquisas IEA-R1 tem sido, desde 1957, o principal ativo da instituição na área de produção de radionuclídeos. O reator IEA-R1 é do tipo piscina, moderado e refrigerado a água leve, com elementos de berílio e grafite como refletores. Projetado para operar com uma potência máxima de 5 MW, opera atualmente com 3,5 MW, com um fluxo de nêutrons térmicos até  $8,5 \times 10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , e nêutrons epitérmicos e rápidos da ordem de  $10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , num arranjo de 24 elementos combustíveis. Há disponíveis 144 posições de irradiação no núcleo, distribuídas em 15 elementos de irradiação (INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, 2021).

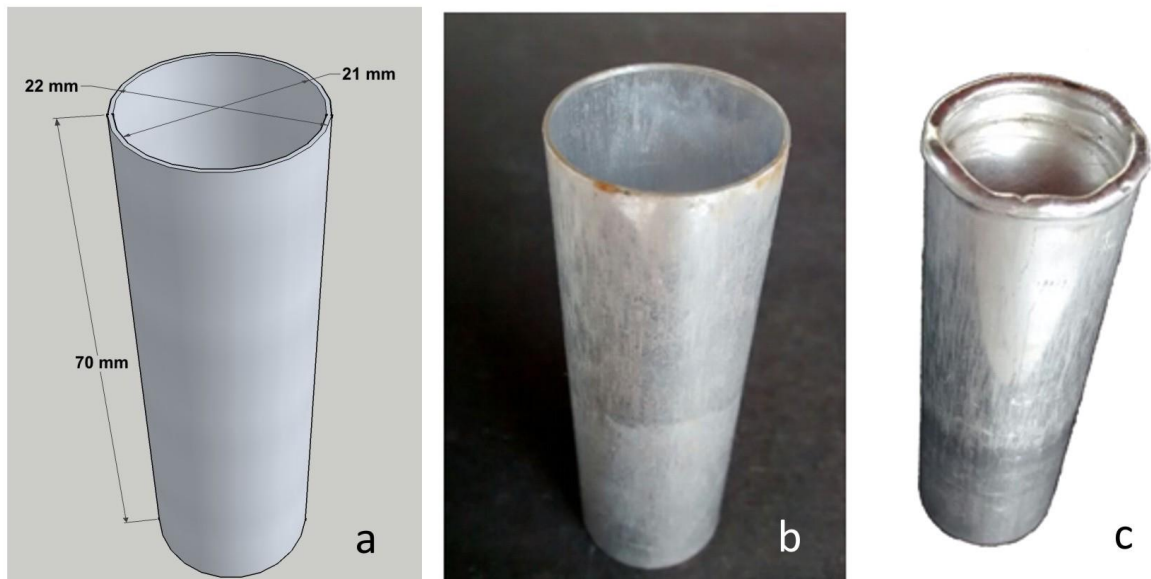
Os radionuclídeos são produzidos por meio da exposição do material alvo a um determinado fluxo de nêutrons, em uma das posições de irradiação do reator nuclear. Para serem irradiados, os materiais alvos devem ser contidos em cápsulas estanques, prevenindo a liberação de radionuclídeos que contaminem a instalação do reator nuclear.

Estas cápsulas são usualmente chamadas de “coelhos” (rabbit) (PETRIE et al., 2017; CHOO et al., 2014; SUTISNA, 2013). Em certas situações é necessário que o material alvo seja contido previamente em

recipientes que o isolem internamente da cápsula e promovam outros níveis de segurança. Esses recipientes, que são dispostos dentro da cápsula, passarão a ser denominados ampolas, durante a dissertação, para melhor distinção dos dois objetos.

O reator IEA-R1 usa cápsulas de alumínio em formato tubular, medindo 70 mm de comprimento por 22 mm de diâmetro (Figura 1). Estas cápsulas são fabricadas com liga de alumínio 1050 ou 1100 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010). Como razões para escolha do alumínio como material da cápsula é possível citar: baixa seção de choque de absorção para nêutrons, produção de radionuclídeos provenientes da liga de alumínio de meia vida curta, boa condutividade térmica e possibilidade de selamento a frio da cápsula (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010; INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2003).

Figura 1 – Cápsula de alumínio padrão para irradiação no reator IEA-R1, exemplos representativos: (a) dimensional, (b) cápsula padrão e (c) cápsula com tampa selada por solda TIG (Tungsten Inert Gas).



Fonte: autor da dissertação.

As cápsulas usadas para irradiação no reator IEA-R1 são seladas com uma tampa por meio de solda do tipo TIG (Tungsten Inert Gas), similar a procedimentos utilizados em outros reatores nucleares de pesquisa (ADELI et al., 2018; FLLAOUI et al., 2016; SHEVEL, 2014), e finalmente testados quanto à estanqueidade, antes da irradiação, por teste de borbulhamento em líquido quente (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY

AGENCY, 2003; INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1992).

Após a irradiação do material alvo no reator nuclear, e terminado o período de decaimento adequado, que é definido no planejamento da produção do radionuclídeo, a cápsula é inserida em uma blindagem de transporte, o nível de radiação é medido na superfície da blindagem e a um metro de distância da superfície da blindagem, posteriormente a blindagem é rotulada com a indicação do nome do radionuclídeo, centro destinatário e técnico responsável pela medição (Figura 2).

Figura 2 – Blindagem de transporte de material radioativo utilizada no IPEN.



Fonte: autor da dissertação.

Após o transporte, a cápsula irradiada é manipulada no interior de uma *hot cell* (célula quente) com blindagem de chumbo de 50 mm ou mais de espessura. Para abrir a cápsula e acessar o material irradiado, utiliza-se um “dispositivo de abertura de cápsulas” (SHARMA et al., 2016; SHEVEL, 2014, CHOO et al., 2014; PETRIE et al., 2011; KUDO et al., 1987).

Os dispositivos de abertura de cápsulas constituem um importante equipamento auxiliar usado no processo de obtenção das fontes radioativas (Figura 3), o equipamento e sua utilização sendo citados comumente em artigos, tais como Sharma et al. (2016), Shevel (2014), Petrie



et al. (2011) e Kudo et al. (1987), também sendo objetos de patentes como em Nakajima (1994) e Douis et al. (COMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE, 1963).

Figura 3 – Representação esquemática do processo envolvendo a cápsula.



Fonte: autor da dissertação.

Estes dispositivos consistem em sistemas de corte de cilindros de alumínio, que tradicionalmente podem ser realizados por abrasão, ou por usinagem, como o atualmente em uso no IPEN e outros (COMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE, 1963).

As vantagens destes sistemas são sua simplicidade, robustez, custos baixos dos equipamentos e relativa facilidade de manutenção (ASM INTERNATIONAL, 1990). Por outro lado, a forma como se dá o corte no dispositivo atual, com a cápsula sendo girada em alta velocidade, pode lançar material radioativo para fora do tubo (CHISTOV, 1964), bem como espalhar detritos do corte na *hot cell*. É importante frisar que os detritos do corte estão radioativos e constituem fonte de contaminação da *hot cell*.

O dispositivo do IPEN funciona como um pequeno torno mecânico (Figura 4). A cápsula irradiada é inserida no interior de um cilindro metálico vazado, que gira em alta velocidade. Uma ferramenta de corte, movimentada por um pistão pneumático, é direcionada perpendicularmente contra a cápsula, esta ferramenta de corte, de maior dureza do que o material da

cápsula, extrai material ao longo da circunferência da cápsula, criando um sulco, que aumenta de profundidade conforme a ferramenta de corte avança, até que a profundidade do sulco atinge o limite de espessura da parede da cápsula, realizando o corte total da parte superior da cápsula irradiada.

Figura 4 — Dispositivo de abertura de cápsulas — (i) no interior da *hot cell* do Laboratório de Produção de Fontes para Radioterapia do Centro de Tecnologia de Radiações — IPEN, em destaque (a) pistão pneumático, (b) ferramenta de corte, (c) abertura para inserção das cápsulas e (d) pinças telemanipuladoras; (ii) no interior da capela da área de manipulação de radionuclídeos do Reator Nuclear IEA-R1.



Fonte: autor da dissertação.

O dispositivo de abertura de cápsulas do reator nuclear IEA-R1, que é utilizado no Centro de Tecnologia das Radiações – CTR, atualmente, foi fabricado no próprio IPEN, em 1989. Apesar de ter servido bem ao seu propósito ao longo dos anos, possui características que podem ser aprimoradas, sendo:

- 1) a abertura das cápsulas, pelo método de usinagem do dispositivo, espalha resíduos (cavacos, lascas e limalhas) da liga de alumínio ao redor do dispositivo, contaminando o interior da *hot cell* com material radioativo particulado (Figura 5);

Figura 5 - Exemplos de detritos resultantes do corte da cápsula.

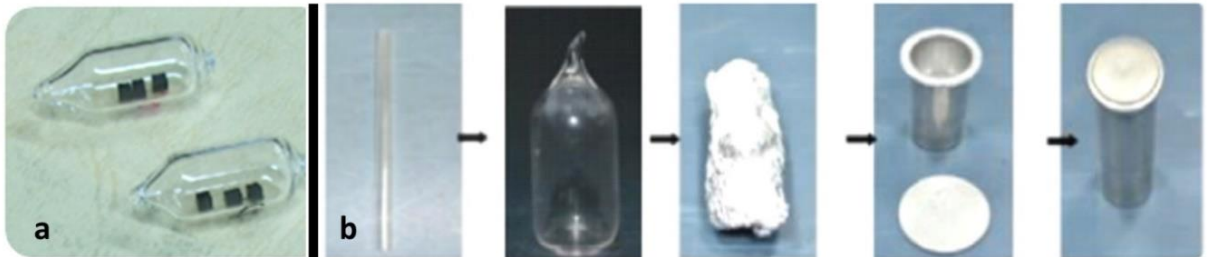


Fonte: autor da dissertação.

- 2) o pistão pneumático que move a ferramenta de corte possui apenas as etapas de avanço e retração completas, impedindo o operador de controlar com precisão o processo de corte;
- 3) o cilindro de rotação que faz a cápsula girar tem apresentado problemas no mecanismo de centralização, e não há como verificar visualmente o correto funcionamento da castanha que fixa a cápsula, pois está ocultado pela caixa do dispositivo;
- 4) a área útil das *hot cells* é restrita e o dispositivo de abertura poderia ter dimensões menores otimizando as montagens de equipamentos em seu interior;
- 5) resíduos de corte, bem como pequenas fontes radioativas manipuladas, podem entrar no mecanismo do dispositivo através do orifício para inserção da cápsula, inibindo seu perfeito funcionamento e contaminando o interior da *hot cell*;
- 6) vibrações produzidas pelo intenso movimento de rotação, problemas de centralização no suporte, falta de controle preciso do avanço da ferramenta de corte e do processo de abertura podem causar ruptura da cápsula, liberando material alvo e contaminando o interior da *hot cell*; e
- 7) alguns materiais alvo sensíveis são previamente encapsulados em ampolas (Figuras 6 e 7), que são posteriormente inseridas na cápsula. Estes recipientes são mais frágeis, geralmente compostos de quartzo ou alumínio (FLLAOUI et al., 2016; SHARMA et al., 2016; COSTA,

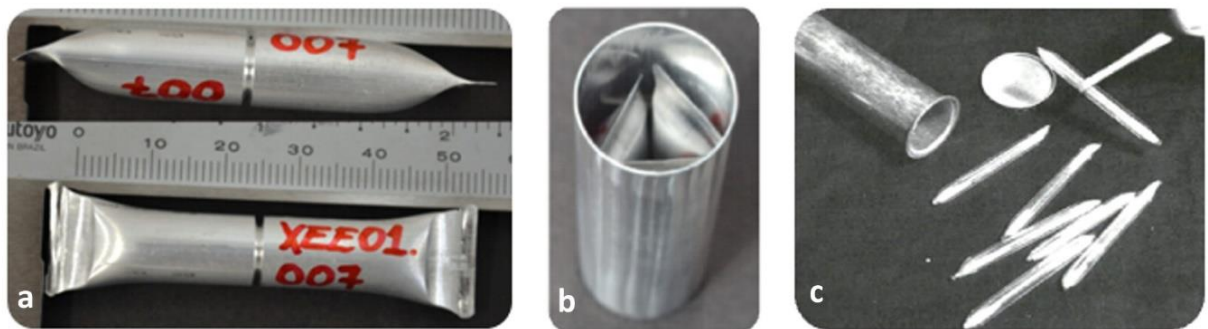
2015; KIM et al., 2013; KEISCH, 1972), necessitando de maior cuidado durante a operação, manipulação e abertura da cápsula.

Figura 6 – (a) Ampola de quartzo com alvos sólidos; (b) sequência de encapsulamento com: tubo de quartzo, ampola de quartzo, folha de alumínio envolvendo a ampola, inserção em cápsula de alumínio e cápsula de alumínio selada.



Fontes: (a) KIM, H. et al., 2011; (b) SHARMA et al., 2016.

Figura 7 - (a) Ampolas de alumínio com sulco, para irradiação de gás; (b) arranjo contendo três ampolas de alumínio dentro da cápsula; (c) ampolas de quartzo contendo material alvo em pó, prontas para serem colocadas na cápsula.



Fontes: (a) e (b) COSTA, O. L., 2015; (c) KEISCH, B., 1972.

Uma movimentação intensa durante a abertura da cápsula, problemas de centralização no cilindro e a falta de controle preciso do avanço da ferramenta e do processo de abertura, podem provocar a ruptura da ampola, liberando material alvo radioativo, contaminando o interior da *hot cell*, com a possibilidade de perda e inutilização do material irradiado.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é a realização de projeto e desenvolvimento de um dispositivo de abertura de cápsulas de alumínio irradiadas no reator IEA-R1 do IPEN.

### 2.1 Objetivos específicos

Como objetivos específicos podemos citar:

- a) O dispositivo deve ser projetado com o mínimo possível de componentes eletrônicos baseados em circuitos semicondutores integrados, pois esses componentes são muito suscetíveis a danos por radiação;
- b) A inserção e a retirada das cápsulas serão feitas por pinças de manipulação da *hot cell*, portanto o projeto do dispositivo deve contemplar facilidade de acesso e manipulação por meio de pinças telemanipuladoras;
- c) O processo de abertura da cápsula deve gerar um nível de detritos tão pequeno quanto razoavelmente exequível, visando minimizar a contaminação no interior da *hot cell*;
- d) O dispositivo deve ser projetado para minimizar a movimentação da cápsula durante o processo de abertura, visando a preservação dos recipientes mais frágeis de materiais alvos líquidos, gasosos e em pó, mais sensíveis ao processo de abertura, cuja quebra resultaria em perda de material alvo e contaminação da *hot cell*;
- e) O dispositivo deve ser projetado sem qualquer vão que permita, por acidente, o alojamento de fonte radioativa no seu interior, ou sob o dispositivo, e possibilite acesso e remoção de fontes ou detritos que se alojem em seu interior; e
- f) O dispositivo deve ser projetado com sistemas que possibilitem maior controle do processo, com acionamento remoto, que permita ao operador melhor precisão no processo de abertura bem como parada de emergência do dispositivo quando necessário.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

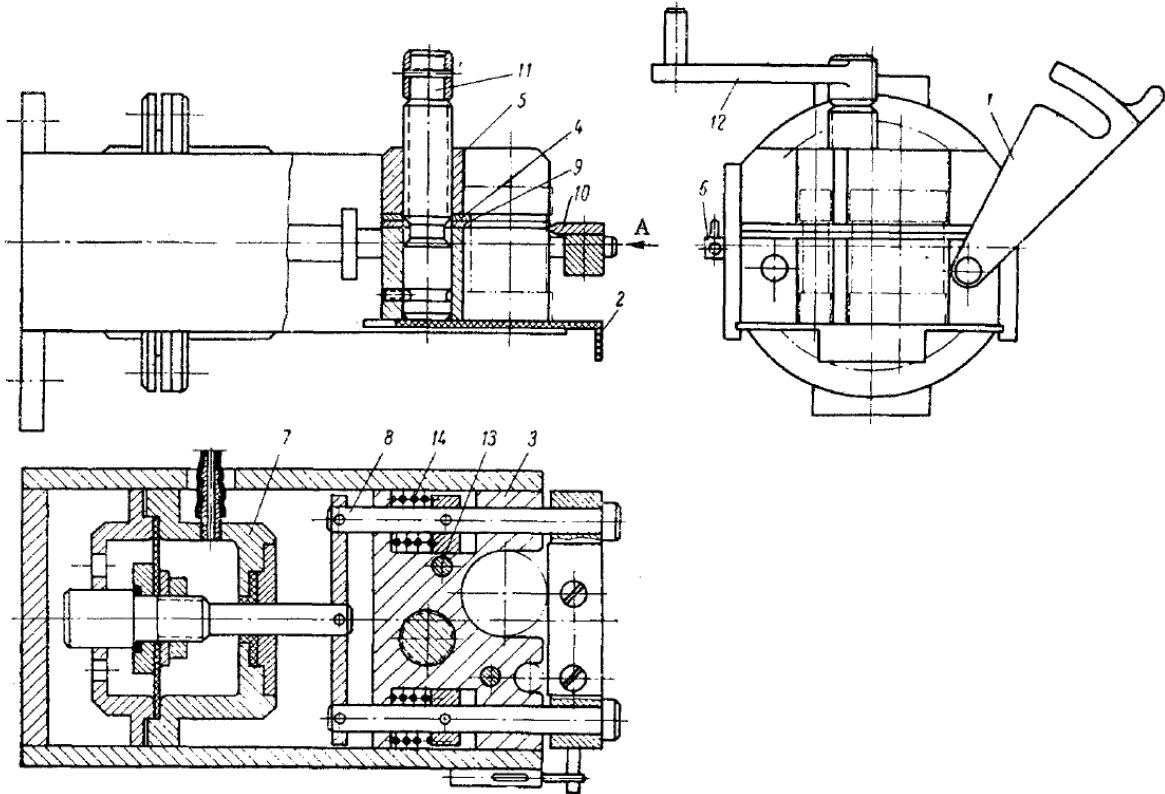
#### 3.1 Dispositivo para abertura de alvos irradiados de Chistov

Chistov (1964) apresenta, em trabalho publicado, um dispositivo para abrir alvos irradiados – cápsulas. As cápsulas, geralmente feitas de tubos de alumínio fechados nas duas extremidades, são abertas por controle remoto, em ambientes blindados. Porém, a abertura por meio de discos de corte rotativos pode causar a perda de matéria-prima, que pode ser lançada para fora do tubo, contaminando o equipamento do interior da *hot cell*. O dispositivo desenvolvido foi testado sob condições de produção, e resultou na minimização da possibilidade de perda de material durante o processo de abertura. O dispositivo pode ser estacionário ou portátil, e é manuseado por um operador trabalhando com telemanipuladores simples ou do tipo mestre-escravo. A abertura da cápsula se dá por extração de uma das tampas da cápsula.

O dispositivo de Chistov (1964) é mostrado na Figura 8, e o processo de abertura ocorre da seguinte forma, com o clipe **1** levantado, os tubos de alumínio são colocados, em posição vertical, sobre a plataforma rolante **2**, que se move nas chavetas de perfil tubular do chassi **3**. A plataforma rolante **2**, com os tubos de alumínio, é empurrada no sentido do corpo do dispositivo, de tal maneira que as faces das tampas dos tubos encostem na contrachaveta **4** da peça deslizante **5**. O clipe **1** é girado para a posição horizontal e fixado pela presilha **6**. O atuador pneumático **7** é pressurizado, puxando a haste **8**, e o corpo dos tubos são presos entre as contrachavetas **9** e **10**. As contrachavetas **9** e **10** são afiadas para garantir a aplicação de alta pressão aos tubos, e evitar o deslizamento entre as superfícies. Ao rodar o parafuso **11**, por meio da alavanca **12**, a peça deslizante **5** é elevada ao longo dos pinos guia **13** (na Figura 8 é indicado apenas um pino guia, o desenhista não atentou para a indicação do segundo pino), enquanto as tampas são simultaneamente removidas dos tubos. Quando o atuador pneumático **7** é despressurizado, a mola **14**

desengata o clipe **1** do corpo dos tubos. Devido ao uso de tubos de diferentes diâmetros e alturas em irradiação de alvos, dois lugares de diferentes diâmetros são fornecidos no chassi **3** e na peça deslizante **5**.

Figura 8 – Dispositivo para abertura de cápsulas, proposto por Chistov.



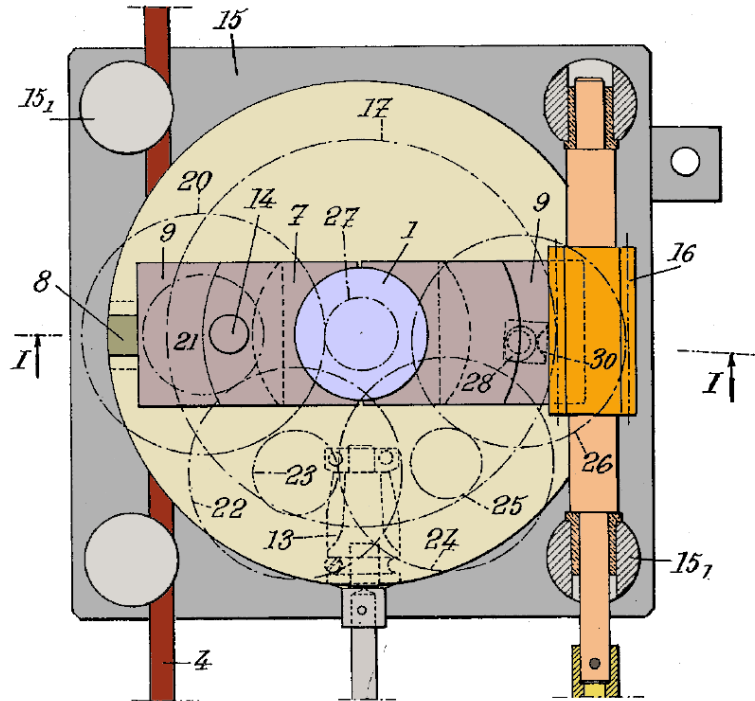
Fonte: CHISTOV, 1964.

### 3.2 Dispositivo de abertura de tubos irradiados de Douis et al.

Douis et al. (COMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE, 1963) propõem uma patente sobre um dispositivo para abertura e manuseio a distância de um recipiente, e em particular um tubo irradiado. O dispositivo funciona da seguinte forma. A cápsula irradiada **1** (Figuras 9 e 10) é colocada na plataforma **3** (Figura 10), por meio de pinças telemanipuladoras. Com a cápsula posicionada na plataforma **3**, a cremalheira horizontal **4** é movida longitudinalmente, por meio de pinças manipuladoras, o movimento da cremalheira **4** gira o pinhão **5** (Figura 10), o giro do pinhão **5** movimenta a cremalheira vertical **6** (Figura 10), a cremalheira vertical **6** está fixada à plataforma **3** (Figura 10), deste modo, o movimento da cremalheira horizontal **4** produz o deslocamento vertical

desejado para a cápsula irradiada **1**, posicionando-a na altura adequada para o corte.

Figura 9 – Planta do dispositivo proposto por Douis et al. para abertura de cápsulas.

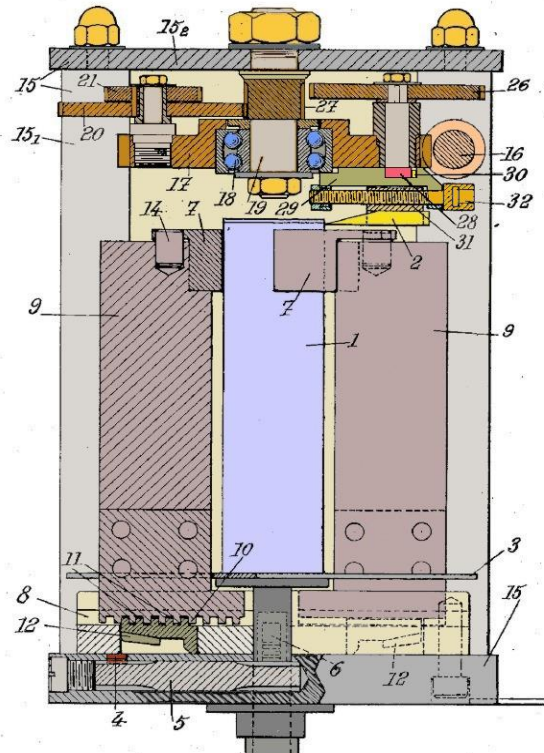


Fonte: COMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE, 1963, colorido pelo autor da dissertação.

Após a cápsula estar na altura adequada para o corte, o eixo horizontal do pinhão cônico **13** (Figura 9) é girado, transmitindo movimento para a engrenagem circular cônica **12** (Figura 10). A engrenagem circular cônica **12** possui, em sua face superior, ranhuras de seção quadrada **11** (Figura 10), formando uma rosca espiral, nesta se adaptam os dentes **10** (Figura 10), que fazem parte da estrutura de suporte **9**, onde estão fixadas as mandíbulas **7**. Quando a engrenagem circular cônica **12** (Figura 10) gira, as ranhuras de seção quadrada **11** (Figura 10), por meio de sua rosca espiral, transmitem o movimento para os dentes **10** (Figura 10), provocando um movimento de deslizamento radial das estruturas de suporte **9**, apertando as mandíbulas **7**, contra a cápsula **1**. Mantendo a cápsula fixa e centralizada para o corte.



Figura 10 – Vista em corte lateral (I-I da figura 9) do dispositivo de abertura de cápsulas.



Fonte: COMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE, 1963, colorido pelo autor da dissertação.

Com a cápsula fixa e centralizada, as ações para o corte são as seguintes. O eixo com a rosca sem fim **16** é girado, transmitindo movimento para a engrenagem de rosca sem fim **17**, que está acoplada ao rolamento **18** (Figura 10). O rolamento **18** está acoplado à haste fixa **19** (Figura 10), que se estende ao longo do eixo vertical do dispositivo e é suportado pela placa superior **15**, (Figura 10). Um conjunto de engrenagens planetárias **20**, **21**, **22**, **23**, **24**, **25** e **26** (Figuras 9 e 10) são suportadas pela engrenagem de rosca sem fim **17**, todas em eixo vertical, formando três pares, **20-21**, **22-23** e **24-25** respectivamente. As duas engrenagens de cada par são coaxiais. A engrenagem de rosca sem fim **17** transmite movimento para o pinhão **27**, que transmite o movimento para o conjunto de engrenagens planetárias que inicia na engrenagem **20** e termina na engrenagem **26**. O disco excêntrico **28**, gira na mesma rotação da engrenagem **26**, e está delimitado pelas paredes do suporte da ferramenta **29** (Figura 10). O suporte da ferramenta **29** (Figura 10) está suportado pela engrenagem de rosca sem fim **17**, e desliza ao longo do raio desta engrenagem. O disco excêntrico **28** sofre a ação constante de uma mola de folha **30** ou mola helicoidal, interposta entre o suporte da ferramenta **29**

(Figura 10) e a engrenagem de rosca sem fim **17**. Com esta configuração do dispositivo, a ferramenta de corte **2** (Figura 10) avança 0,05 mm a cada rotação da engrenagem de rosca sem fim **17**. A posição inicial da ferramenta de corte **2** (Figura 10) pode ser ajustada por meio do giro do parafuso **32** (Figura 10), que movimenta radialmente a porca **31** (Figura 10), onde está fixada a ferramenta de corte **2** (Figura 10).

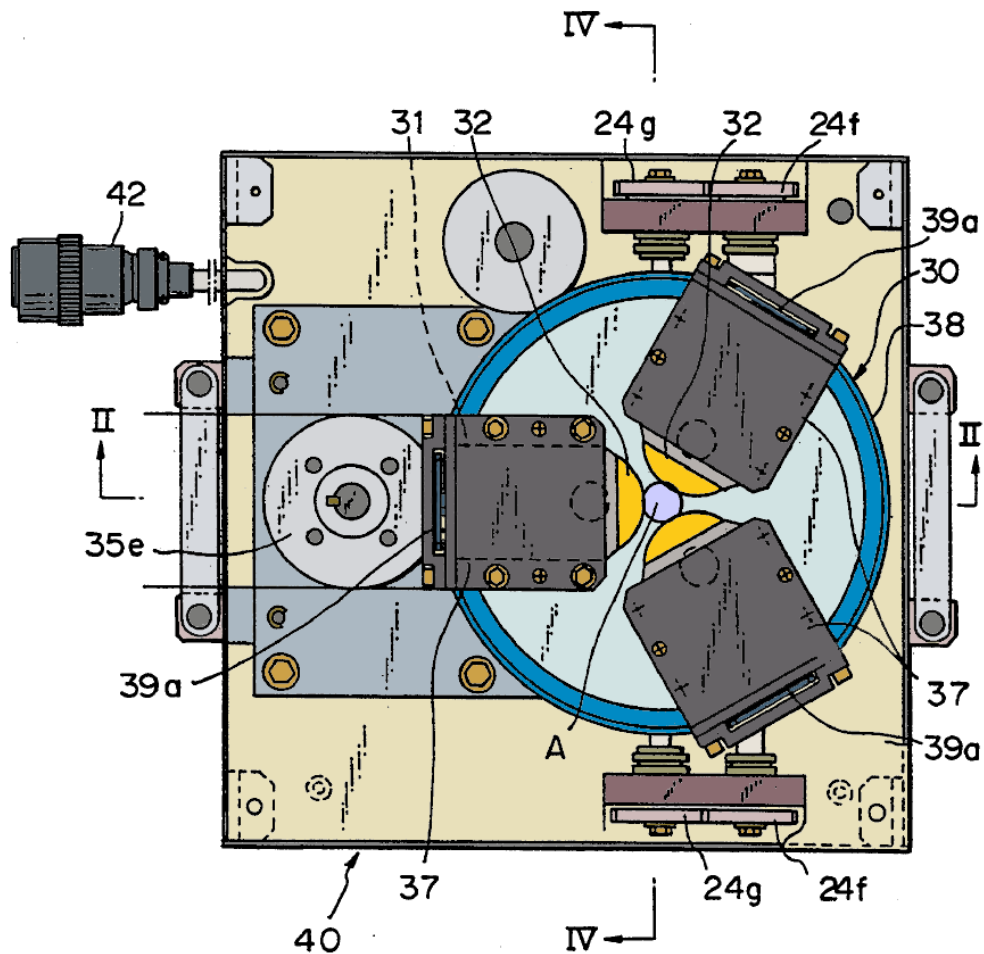
Entre os pontos positivos do dispositivo proposto por Douis et al. é possível citar a imobilização da cápsula de irradiação durante o corte, visto que, deste modo, a vibração na cápsula é minimizada durante a operação de corte, garantindo maior integridade para as amostras mais sensíveis, como líquidos e gases, diferentemente do que ocorre no dispositivo do IPEN, onde a rotação da cápsula gera vibração nas amostras irradiadas.

Há um controle do avanço da ferramenta de corte, cuja velocidade de avanço depende da velocidade de rotação do eixo com a rosca sem fim **16** (Figuras 9 e 10). A produção de poucos detritos durante o procedimento de corte também é citada na patente de Douis et al. (COMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE, 1963) como aspecto positivo, além disso, estes detritos não interferem no mecanismo, que se encontra acima da ferramenta de corte.

### **3.3 Dispositivo de abertura de cápsulas de Nakajima**

Nakajima (1994) propõe uma patente de um abridor para cápsulas irradiadas (Figuras 11, 12, 13, 14 e 15). Este abridor para cápsulas compreende um mecanismo de deslocamento vertical, para mover a cápsula para a posição de abertura (Figuras 12 e 14), um mecanismo de fixação da cápsula (Figuras 14 e 15) e um mecanismo de corte da cápsula (Figuras 11, 12, 13 e 14). O mecanismo de corte inclui três cortadores rotativos **32** (Figuras 11, 12 e 13), cada cortador rotativo é posicionado para girar ao redor da cápsula **A** (Figura 11), e move-se radialmente, para cortar a cápsula. A cápsula, o mecanismo de deslocamento vertical, o mecanismo de fixação e o mecanismo de corte estão todos contidos dentro de um invólucro e são acionados por um telemanipulador dentro de uma *hot cell*.

Figura 11 – Planta do abridor de cápsulas, vista superior.

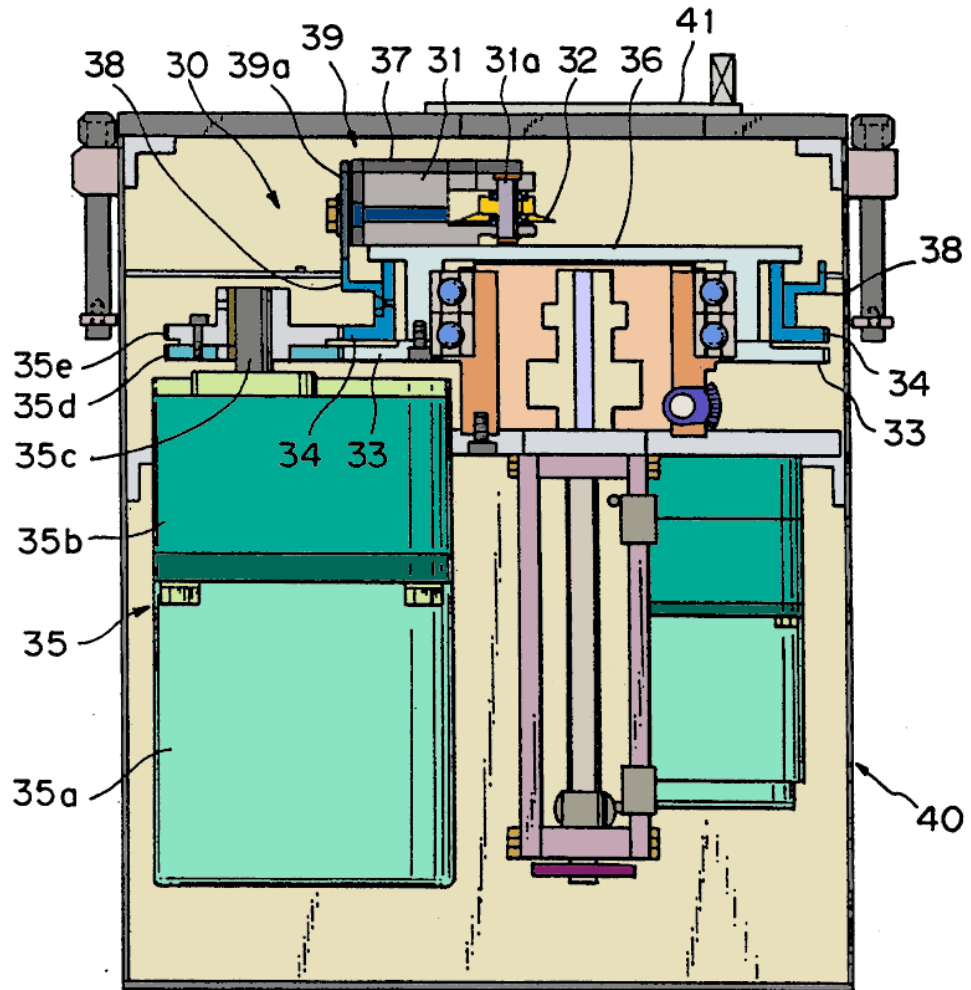


Fonte: NAKAJIMA, 1994, colorido pelo autor da dissertação.

O abridor de cápsulas irradiadas da patente de Nakajima (1994) funciona da seguinte forma. Dentro de uma *hot cell*, por meio de um telemanipulador, a cápsula irradiada **A** (Figuras 12 e 14) é inserida no abridor e posicionada no suporte **15b** (Figura 14) do mecanismo de deslocamento vertical **10** (Figura 14). O motor **12** (Figura 14) é acionado, movendo a cápsula **A** para uma posição de alinhamento com o cortador **32** (Figuras 11, 12, 13 e 14).

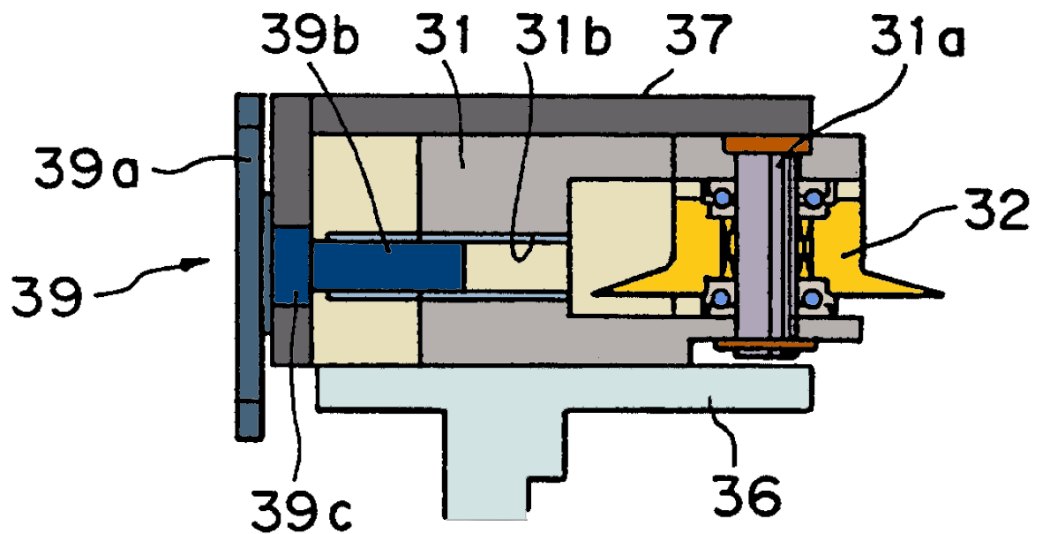
O motor **24a** (Figura 14), do mecanismo de fixação da cápsula **20** (Figura 14), é acionado, apertando o grampo **21** (Figura 15) contra a cápsula **A**. Quando a chave de fim de curso **25** (Figura 15) atinge o limitador **22b** (Figura 15), o motor **24a** (Figura 14) é desligado e a cápsula está fixada na posição de corte.

Figura 12 – Vista em corte lateral (II-II Figura 11) do abridor de cápsulas.



Fonte: NAKAJIMA, 1994, colorido pelo autor da dissertação.

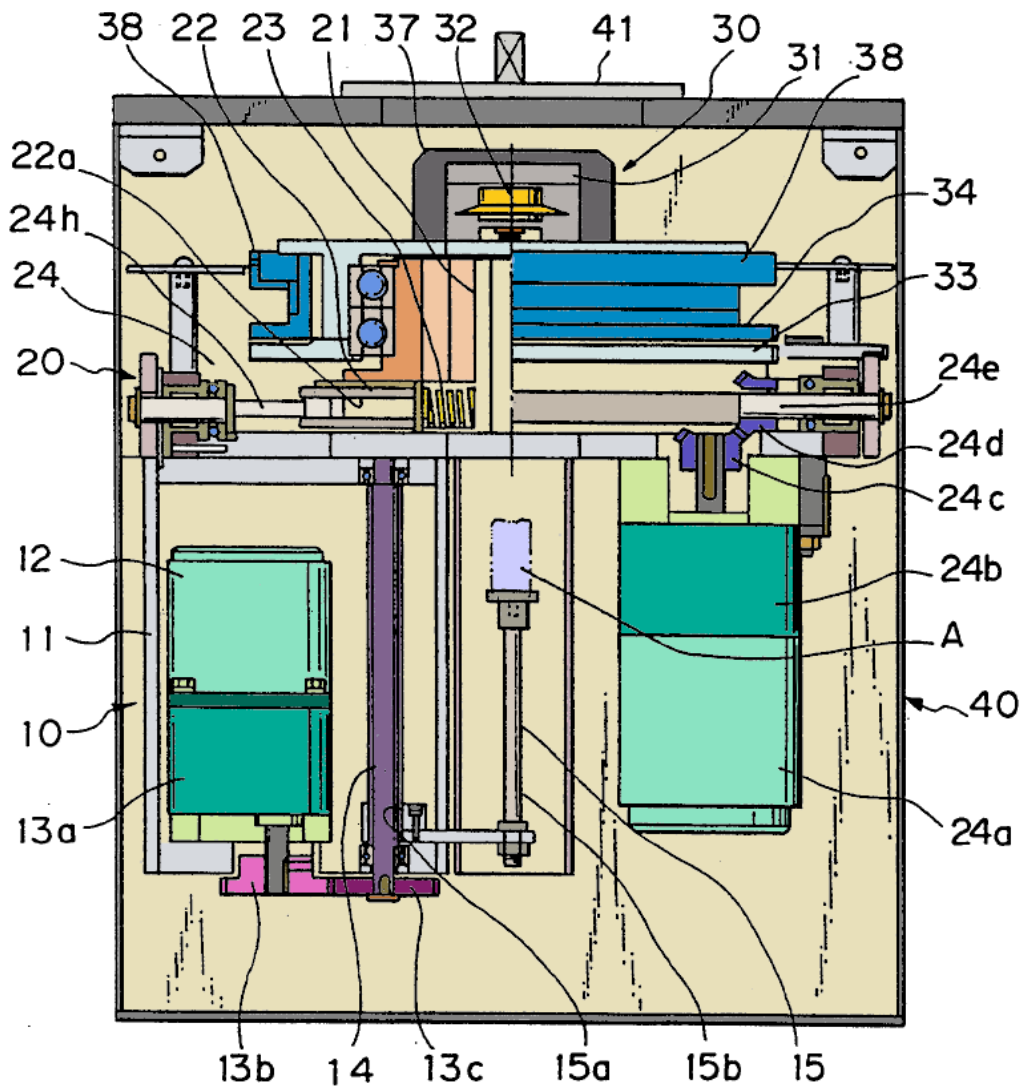
Figura 13 – Ampliação da vista lateral do suporte do cortador.



Fonte: NAKAJIMA, 1994, colorido pelo autor da dissertação.

Após a fixação da cápsula, o motor **35a** (Figura 12), do mecanismo de corte **30** (Figuras 11, 12 e 14), é acionado. O acionamento do motor **35a** (Figura 12) provoca a rotação da mesa giratória **36** (Figuras 12 e 13), e do mecanismo de deslocamento radial **39** (Figuras 12 e 13). Deste modo, os três cortadores **32** (Figuras 11, 12, 13 e 14) giram em torno da cápsula **A** (Figuras 11 e 14) e avançam radialmente no sentido da cápsula, cortando toda a espessura de parede da cápsula, provocando sua abertura. Como exemplo de velocidade de rotação da mesa giratória **36** (Figuras 12 e 13) é citado 108 rpm ( $3,6\pi \text{ rad s}^{-1}$ ), enquanto para os cortadores **32** (Figuras 11, 12, 13 e 14) é citada a velocidade de avanço de  $2,7 \text{ mm min}^{-1}$ .

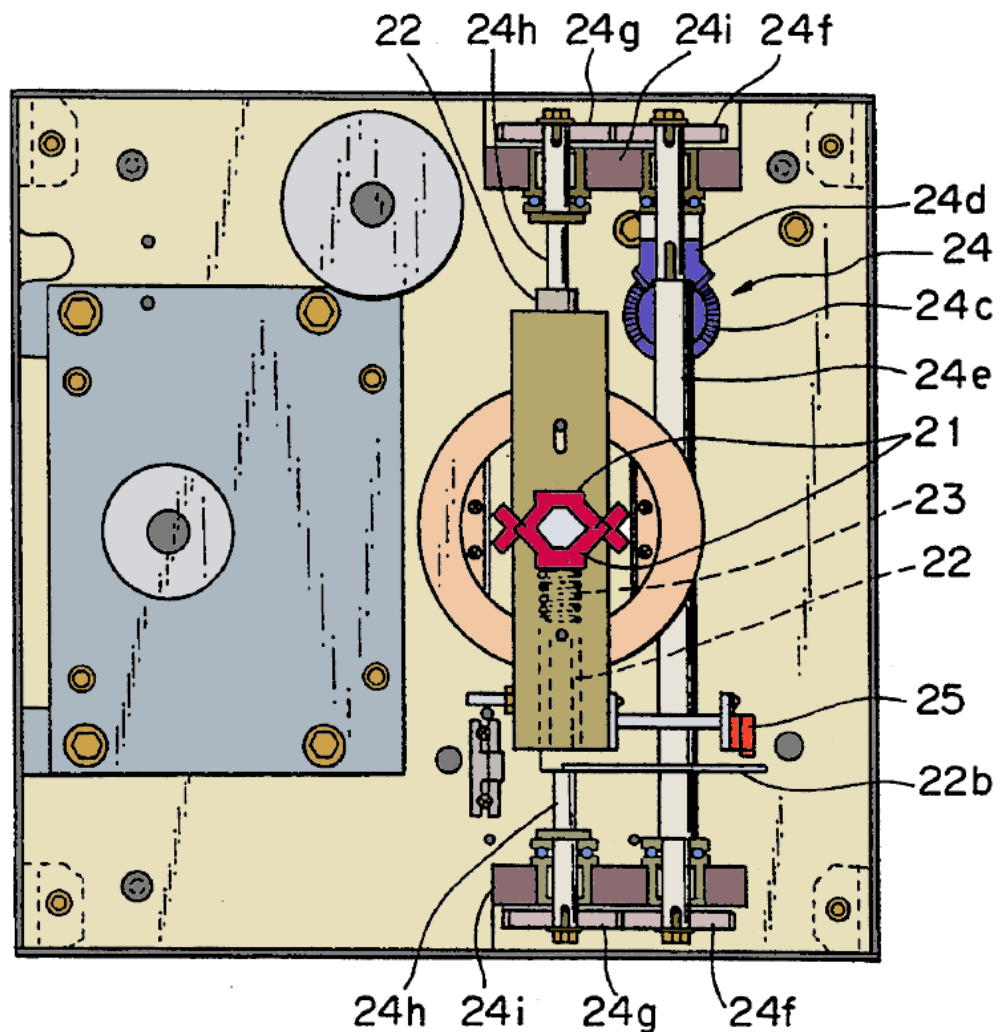
Figura 14 – Vista em corte lateral (IV-IV Figura 11) do abridor de cápsulas.



Fonte: NAKAJIMA, 1994, colorido pelo autor da dissertação.

O dispositivo proposto na patente de Nakajima (1994) possibilita a imobilização da cápsula de irradiação, minimizando a vibração das amostras irradiadas durante o procedimento de corte e, deste modo, garantindo maior integridade para as amostras mais sensíveis à vibração, como as ampolas de líquido e de gases. A velocidade de avanço dos cortadores **32** (Figuras 11, 12, 13 e 14) podem ser ajustadas, na patente é dado o exemplo de 0,025 mm de avanço, durante uma volta da mesa giratória **36** (Figuras 12 e 13). A produção de poucos detritos, devido às características do projeto, e o isolamento destes detritos dentro do invólucro do dispositivo também são características positivas do dispositivo.

Figura 15 – Planta do abridor de cápsulas onde é mostrado o mecanismo de fixação.



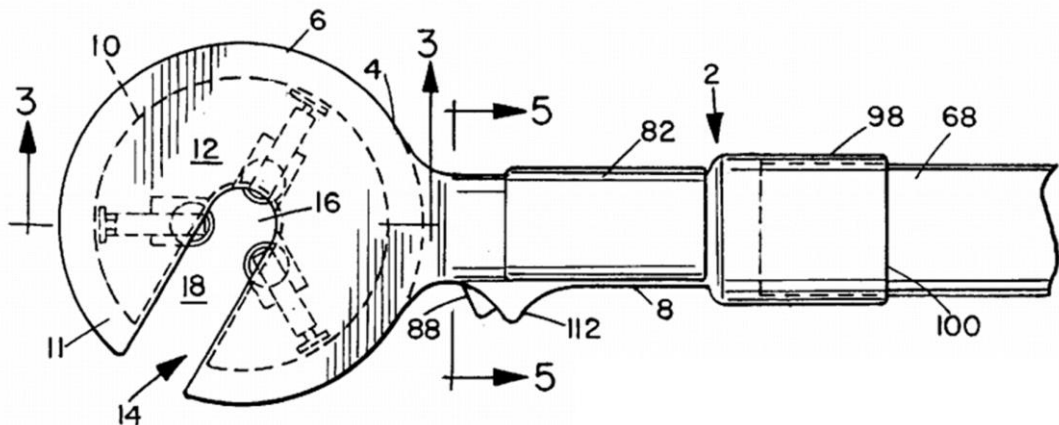
Fonte: NAKAJIMA, 1994, colorido pelo autor da dissertação.

### 3.4 Ferramenta cortadora de tubos de Wrate

Wrate (2001) propõe uma patente de um cortador portátil para tubulação de metal e plástico, podendo ser usada para cortar quaisquer tubos de metal ou plástico, incluindo tubos de cobre, latão, alumínio, policarbonato, aço, fenólico, etc.

A ferramenta (Figura 16) possui um cabeçote de corte rotativo acionado por motor elétrico, na qual o tubo a ser cortado é inserido, uma ou mais lâminas tipo disco de corte são impelidas a cortar, fazendo contato com a parede do tubo pela rotação do cabeçote acoplado ao avanço das lâminas, e, uma vez que o tubo é cortado, a reversão do motor faz com que as lâminas sejam retraídas no cabeçote, preparando a ferramenta para um novo corte.

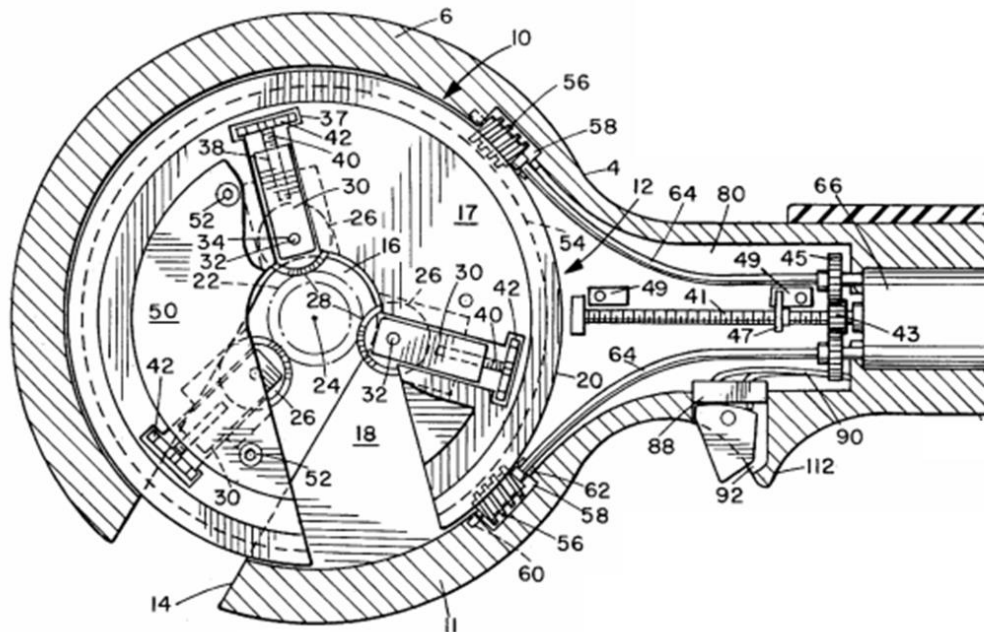
Figura 16 – Visão lateral da ferramenta, mostrada em uma posição operacional típica para corte de tubulação horizontalmente posicionada. Em tracejado estão indicados o cabeçote de corte e os suportes dos discos de corte.



Fonte: WRATE, 2001.

A Figura 17 ilustra a estrutura e o funcionamento do cabeçote de corte. Uma vez que as larguras das aberturas **14** e **18** são as mesmas, quando estão alinhadas, o tubo **22** a ser cortado pode ser encaixado na área central do cabeçote de corte **17**, alinhado coaxialmente com o eixo central **24**, e sendo travado pelas lâminas de corte **26**, ilustradas como um conjunto de três lâminas igualmente espaçadas. Cada lâmina de corte **26** tem uma borda de corte periférica afiada **28**, do tipo convencionalmente usado para cortar tubos metálicos ou plásticos.

Figura 17- Corte transversal da ferramenta, com maior detalhamento das partes internas.

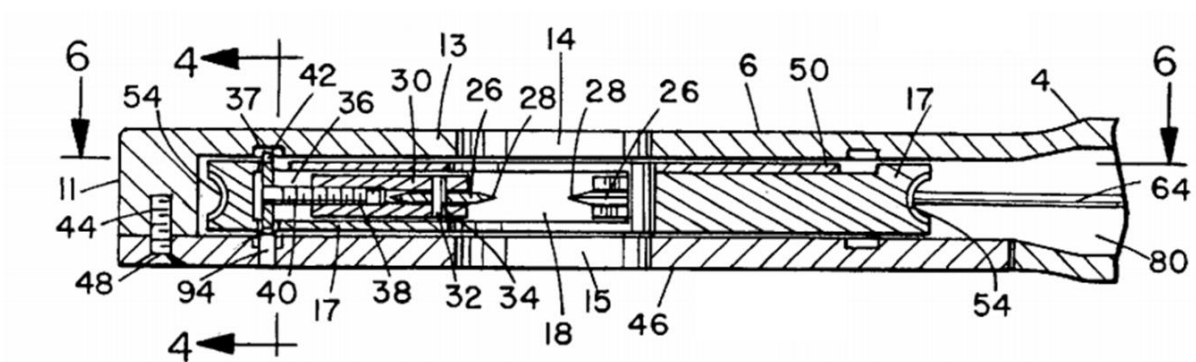


Fonte: WRATE, 2001.

Cada lâmina de corte **26** gira livremente e é fixada em um bloco deslizante **30**, de modo que a lâmina **26**, progressivamente, corta a parede da tubulação à medida que se move em torno do tubo **22**.

Na figura 18, observa-se que os blocos deslizantes **30** ficam alojados em recessos **36**, no cabeçote **17**, permitindo que as lâminas de corte **26** possam ser totalmente retraídas no cabeçote **17** e fora da área central.

Figura 18 – Corte lateral da ferramenta, com detalhamento das partes internas.

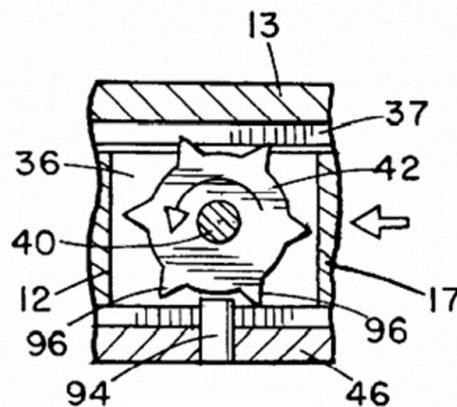


Fonte: WRATE, 2001.



Cada bloco deslizante **30** tem um orifício roscado ou soquete **38** na extremidade oposta à da lâmina de corte **26**. Encaixado em cada orifício **38**, encontra-se um parafuso de acoplamento **40**, ao qual é fixada uma roda dentada **42**. A roda dentada **42** projeta-se ligeiramente para fora da superfície superior e inferior do cabeçote de corte **17**, mostrado com detalhe na figura 19.

Figura 19 – Detalhe do passo de avanço e retração da lâmina de corte.



Fonte: WRATE, 2001.

O funcionamento das rodas dentadas **42** e sua indexação do movimento dos blocos deslizantes **30** se dá por um pino **94**, que se projeta para cima através da ranhura circular **37**, em que a roda dentada se move, de modo que, à medida que o cabeçote de corte **17** gira, a cada rotação, um dente sucessivo **96**, da roda **42**, encontra o pino **94**, indexando em uma unidade de rotação a roda **42**, girando o parafuso **40** da mesma quantidade e movendo o bloco deslizante **30**. A quantidade de avanço ou retração do bloco deslizante **30** por volta depende do número de dentes da roda **42** e do passo da rosca do parafuso **40**.

Incorporada na borda periférica **20**, do cabeçote de corte **17** (figura 17), está uma engrenagem contínua **54**, tipo coroa. Esta engrenagem se acopla a duas engrenagens tipo roscas sem fim **56**, posicionadas em recessos **58**, formados na parede **11** do quadro. Cada rosca sem fim **56** é movimentada por um eixo flexível **64** que, por sua vez, é impelido por um motor **66**, alojado no cabo da ferramenta.

O motor **66** aciona a engrenagem **43**, que está acoplada com duas engrenagens de acionamento **45**, cada uma das quais gira um dos eixos

flexíveis **64**, aos quais as roscas sem fim **56** estão conectadas, girando o cabeçote de corte **17**. Também montado na engrenagem **43**, está um eixo roscado **41**, que movimenta um contato deslizante **47**, o contato se move ao longo do eixo **41** à medida que o eixo gira e o tubo é cortado. Nas extremidades opostas do eixo, estão posicionados interruptores de fim de curso **49**.

Como qualidades do dispositivo de Wrate (2001), pode se destacar a simplicidade de operação, bastando encaixar o dispositivo no tubo e pressionar um botão de acionamento para o corte. Uma forma de operação acontece mantendo-se o botão pressionado até o encerramento do corte, quando o botão é liberado o dispositivo cessa o funcionamento. Outra forma de operação pode ser com sensor ou chave de fim de curso, o pressionamento do botão inicia o corte e a interrupção após o corte é automática pelo acionamento do sensor ou chave de fim de curso. A recomposição do cabeçote de corte para sua posição inicial pode ser feita automaticamente quando da liberação do botão de acionamento, ou com um botão de reversão.

A robustez do dispositivo, feito para ser usado repetidamente em reformas de instalações prediais, pouca produção de detritos de corte, ajuste automático a diferentes diâmetros de tubos, e sua construção compacta, possibilitando o uso de forma portátil, são características que vão ao encontro dos objetivos dessa dissertação.

Por outro lado, como este dispositivo é projetado para corte de tubos, não há um mecanismo intrínseco de fixação, os tubos estão fixados a uma estrutura predial já instalada, ou podem ser contidos manualmente, ou ainda, ficam presos por meio de alguma ferramenta simples.

### **3.5 Dispositivo cortador de tubos de Lazarevich**

O dispositivo de Lazarevich (2012) é apresentado como um cortador de tubos portátil e acionado eletricamente. Este dispositivo conta com ajuste automático para diferentes diâmetros de tubos e possui guias autocentrantes, que atuam centralizando o mecanismo de corte.

O avanço da lâmina de corte para cada revolução pode ser selecionado, por meio de uma embreagem, e a velocidade de avanço pode ser alterada durante o corte. O corte acontece sem detritos (lascas e cavacos) em vários materiais, como plástico, cobre, aço e titânio.

O mecanismo de corte possui uma cabeça giratória, uma lâmina de corte e rolos de apoio com os tubos. A lâmina de corte e os rolos de apoio possuem movimento radial automático e contínuo, para o centro ou para fora. Antes que o mecanismo de alimentação radial seja acionado, na primeira parte da revolução da cabeça de corte, o dispositivo se ajusta rapidamente e de forma automática ao diâmetro do tubo.

Depois de cada tubo cortado, a ferramenta inverte a rotação do cabeçote e para em uma posição com a lâmina de corte e rolos de suporte retraídos, ficando assim, pronta para o próximo corte.

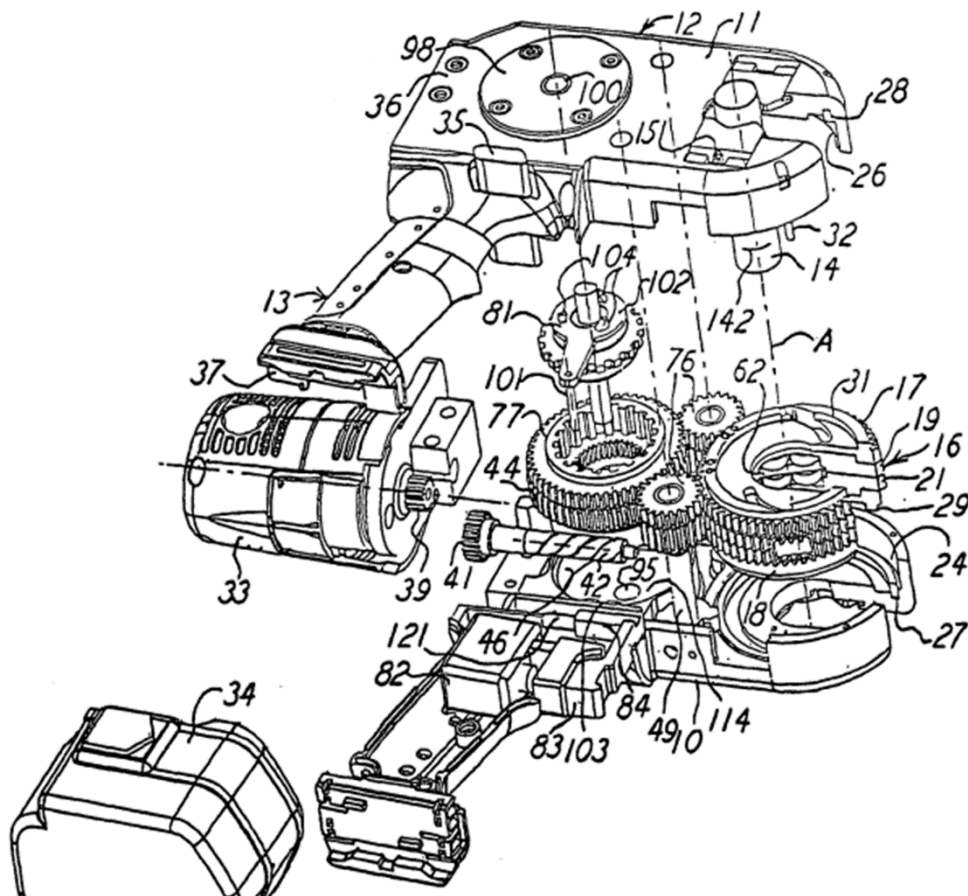
Figura 20 – Dispositivo cortador de tubos de Lazarevic.



Fonte: TESLA POWER TOOLS, 2021.

Os detalhes das partes internas e montagem do dispositivo estão mostrados na Figura 21. A carcaça **12** possui os encaixes e suportes para os conjuntos mecânicos do dispositivo. Acoplada à carcaça **12**, fica um motor elétrico reversível **33**. Também acoplada à carcaça **12**, está uma empunhadura **13**, onde se pode operar o dispositivo, e que sustenta uma bateria elétrica **34** para alimentar o motor **33** nas duas direções de rotação.

Figura 21 – Perspectiva do dispositivo apresentando sua montagem e mecanismos internos.



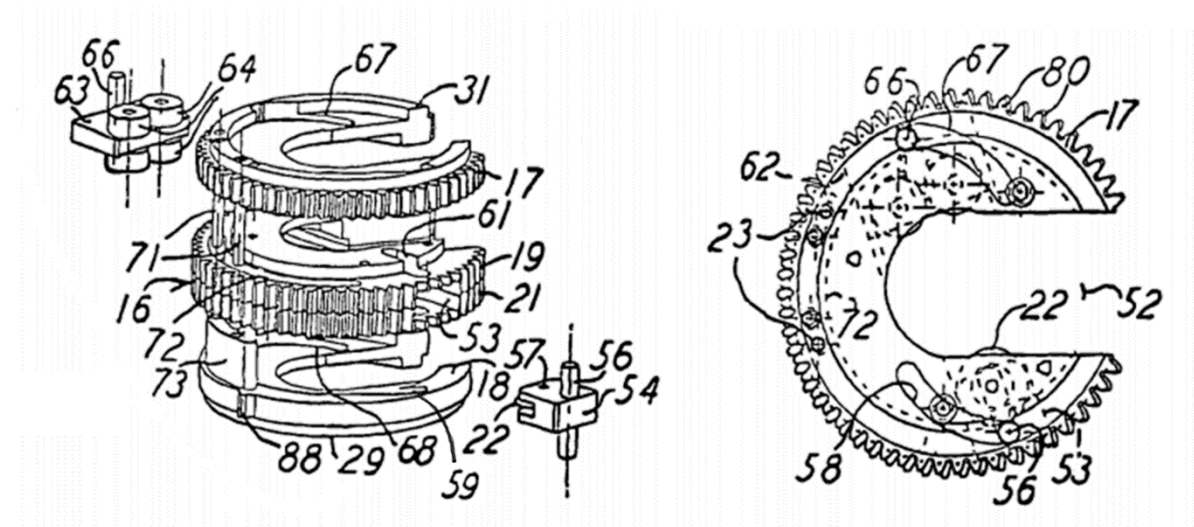
Fonte: LAZAREVIC, 2012.

A engrenagem **39** acoplada ao motor **33** impele o eixo **41**, que possui uma engrenagem tipo rosca-sem-fim **42**. A engrenagem **44** é movimentada pela rosca-sem-fim **42** e transmite sua rotação para o par de engrenagens **76**, que rotacionam o conjunto do mecanismo de corte **16**. A engrenagem **44** também transfere rotação para o sistema de embreagem formado pelo conjunto de engrenagens e peças **81**, **101**, **102** e **104**, que transfere velocidade de rotação diferente da engrenagem **44** para a engrenagem **77**. A engrenagem **77** produz rotação no par de engrenagens

**76**, que está acoplado ao sistema de engrenagem **17** e placa **18**, responsáveis pelo ajuste radial do mecanismo de corte.

A Figura 22 mostra o conjunto de engrenagens do mecanismo de corte. A engrenagem de acionamento **16**, formada por duas metades, superior **19** e inferior **21**, e um conjunto de movimentação do cortador com uma engrenagem **17** e uma placa de controle **18**. As engrenagens **17**, **19**, **21** e a placa de controle **18** são montadas em sobreposição, permanecendo alinhadas axialmente por meio dos pinos **71**.

Figura 22 – Mecanismo de corte, vista explodida (esq.), vista superior (dir.).



Fonte: LAZAREVIC, 2012.

A engrenagem composta **16**, suporta e carrega, na abertura **53**, uma lâmina de corte tipo disco **22**, devidamente acoplado ao seu suporte **54**, que possui um pino-guia **56**. As duas extremidades do pino **56** são encaixadas em ranhuras **58** e **59**, respectivamente, na engrenagem **17** e na placa **18**. Uma abertura radial **62**, na engrenagem **16**, é diametralmente oposta à abertura **53**, e carrega um suporte **63**, que contém quatro rolos **64** de apoio para o corte do tubo. A rotação da engrenagem **16** faz com que a lâmina **22** corte a parede do tubo e que os rolos **64** apoiem sobre a circunferência do tubo.

O suporte **63** tem um pino-guia **66** encaixado em duas ranhuras **67** e **68** na engrenagem **17** e placa **18** respectivamente. O pino **66** também se encaixa por uma ranhura radial (não mostrada) na engrenagem **16**, assim como o pino **56**, do suporte **54**, o faz pela ranhura **61**. A rotação da engrenagem **17**, juntamente com a placa **18**, onde essa rotação está em

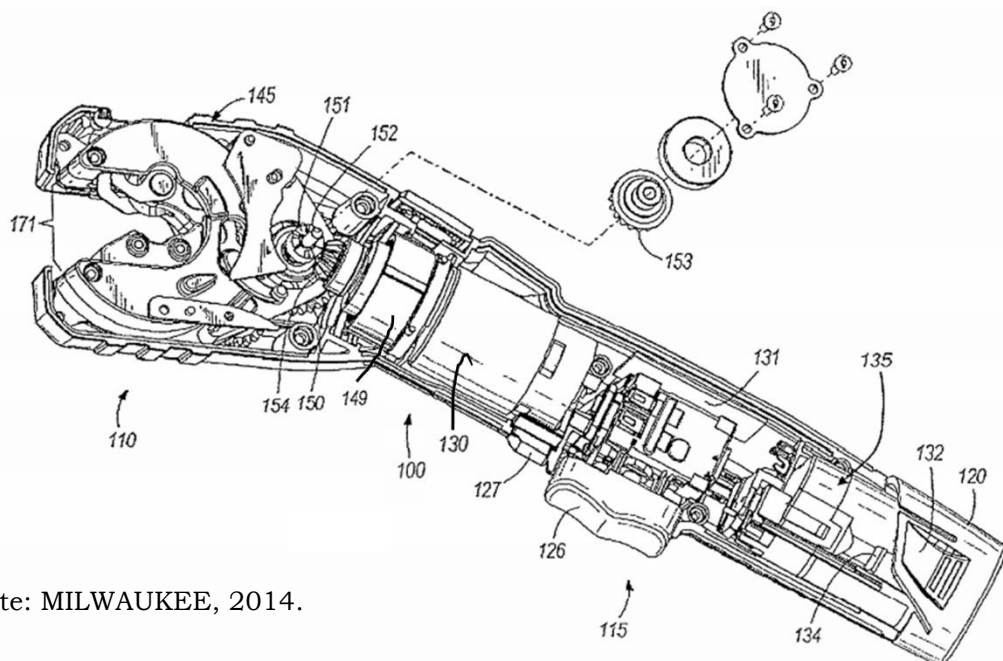
uma velocidade diferente da rotação da engrenagem **16**, fará com que os pinos **56** e **66** deslizem nas respectivas ranhuras **58** e **59**, **67** e **68**, para mover radialmente os suportes **54** e **63**, com a lâmina de corte **22** e os rolos **64**, respectivamente.

### 3.6 Ferramenta para corte de tubos de Milwaukee tools

A invenção de MILWAUKEE (2014) refere-se a uma ferramenta elétrica para cortar um tubo. O cortador de tubulação inclui um conjunto de peças formando um cabeçote de corte que realiza o corte girando em torno da circunferência do tubo. Um motor elétrico impulsiona o conjunto do cabeçote de corte. Um controlador eletrônico está configurado para detectar quando o conjunto de corte terminou de cortar um tubo e, em seguida, girar o conjunto de corte para a posição inicial, bem como monitorar o estado de carga da bateria. O cortador de tubos é portátil, operado por bateria, se ajusta a vários diâmetros de tubos e pode cortar tubos de diversos materiais.

O diagrama de sua montagem interna pode ser visto na Figura 23, com a indicação da região do cabeçote de corte **110** e a abertura **171** para inserção do tubo, região do motor **100**, região da manopla **115**, onde são alojados o controlador eletrônico **131**, a bateria **135** e o botão de acionamento **126**.

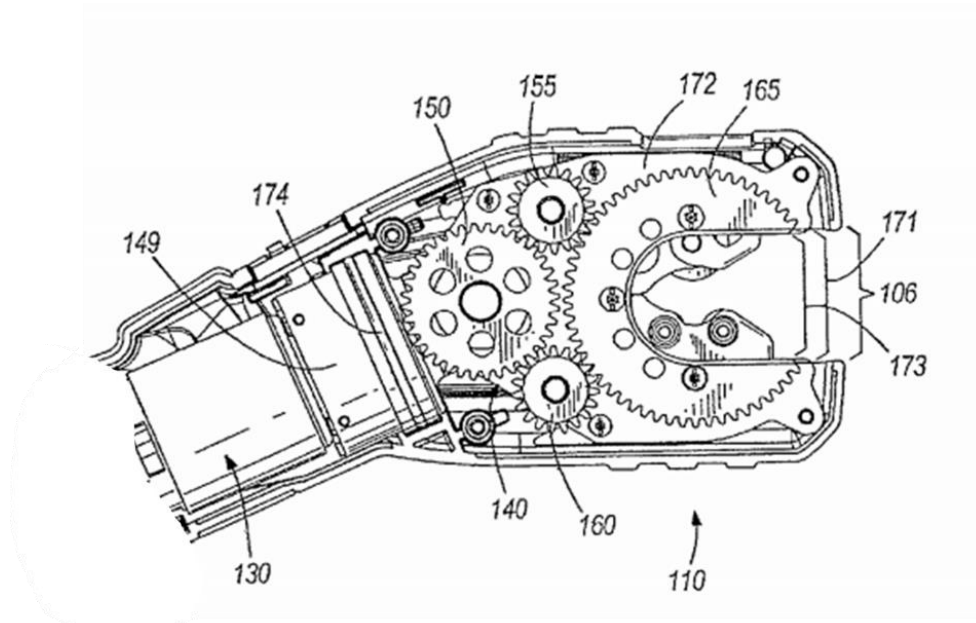
Figura 23 – Perspectiva do cortador de tubulação com partes internas expostas.



Fonte: MILWAUKEE, 2014.

O motor **130** é acoplado a uma caixa de redução **149**, que transfere movimento através de um pinhão **154** para um par de engrenagens cônicas **151** e **153**, que por sua vez movimentam o eixo **152**. Acoplado ao eixo **152** está a engrenagem **150**, que por sua vez impulsionará o conjunto de engrenagens do sistema de tração do cabeçote de corte, apresentado na Figura 24.

Figura 24 – Detalhe do conjunto de tração e do cabeçote de corte.

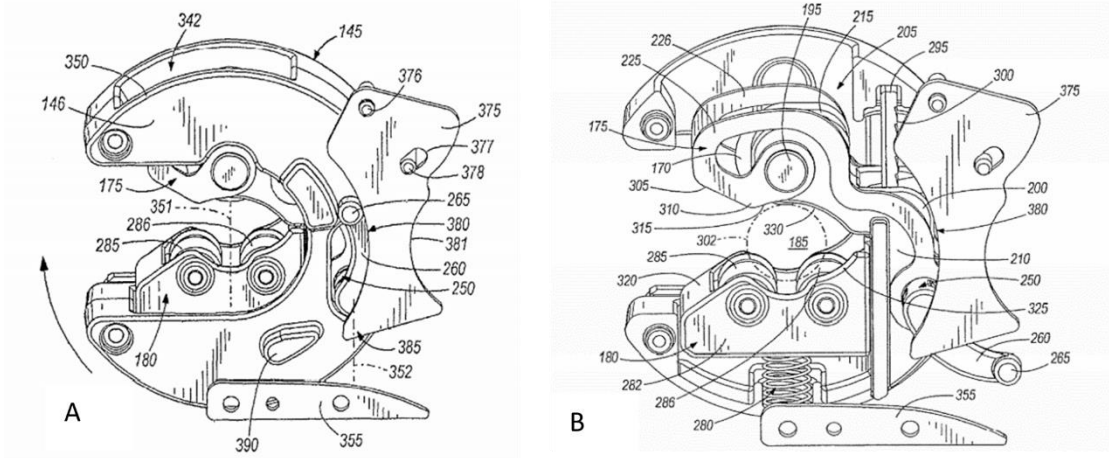


Fonte: MILWAUKEE, 2014.

A engrenagem **150** impulsiona as engrenagens **155** e **160**, que por sua vez giram a engrenagem **165**, fixada por parafusos ao cabeçote de corte, e que possui uma abertura **173** com o mesmo formato da abertura do cabeçote de corte **171**, para o encaixe do tubo a ser cortado. O par de engrenagens **155** e **160** estão espaçados a uma distância suficiente para que quando a abertura **173**, na engrenagem **165**, passe por uma delas, a outra mantenha-se o tempo todo acoplada e tracionando o conjunto.

A Figura 25 ilustra o conjunto do cabeçote de corte em duas vistas, com a carcaça montada (A) e com a carcaça removida (B) expondo a configuração interna. O espaço entre o suporte superior **175** e o suporte inferior **180** forma a área de corte **185**, na qual tubos de vários tamanhos são inseridos (Figura 25 (B))

Figura 25 – Detalhes do cabeçote de corte, com carcaça (A), carcaça removida (B) expondo peças internas.



Fonte: MILWAUKEE, 2014.

Uma lâmina tipo disco de corte **170**, está fixada por um eixo **195**, a duas molas **225-226**, que por sua vez estão fixadas a um carro **200**, formando o suporte superior **175**. O suporte superior **175** pode mover-se por meio de uma haste de alinhamento **295**, resultando em um movimento radial da lâmina de corte **170**. As molas **225** e **226** possuem uma abertura, na extremidade oposta ao disco de corte **170**, por onde passa um eixo excêntrico **250**, acoplado a uma alavanca **260**. A alavanca **260** atua com o eixo excêntrico **250** em entalhes **300** da guia **295**, travando os movimentos dos suportes superior **175** e inferior **180**, ajustados ao diâmetro do tubo a ser cortado.

O suporte inferior **180** inclui um corpo **282** com rolos de suporte **285-286**, que definem uma superfície de suporte para o tubo a ser cortado. O suporte inferior **180** é forçado em direção ao suporte superior **175** por uma mola **280**, e desliza por meio da guia **295**, que mantém os rolos **285-286**, radialmente alinhados à lâmina de corte **170** fixada ao suporte superior **175**. A mola **280** fornece uma carga adicional ao suporte inferior **180** contra o tubo e o disco de corte, contribuindo para o processo de corte. Os movimentos deslizantes dos suportes superior e inferior **175** e **180**, permitem que tubos de variados diâmetros possam ser inseridos na área de corte **185**, ficando os tubos centralizados **302**, por meio da geometria dos suportes, com as rampas **305** e **320**, facilitando a inserção e os apoios **330** e **325** como limites.

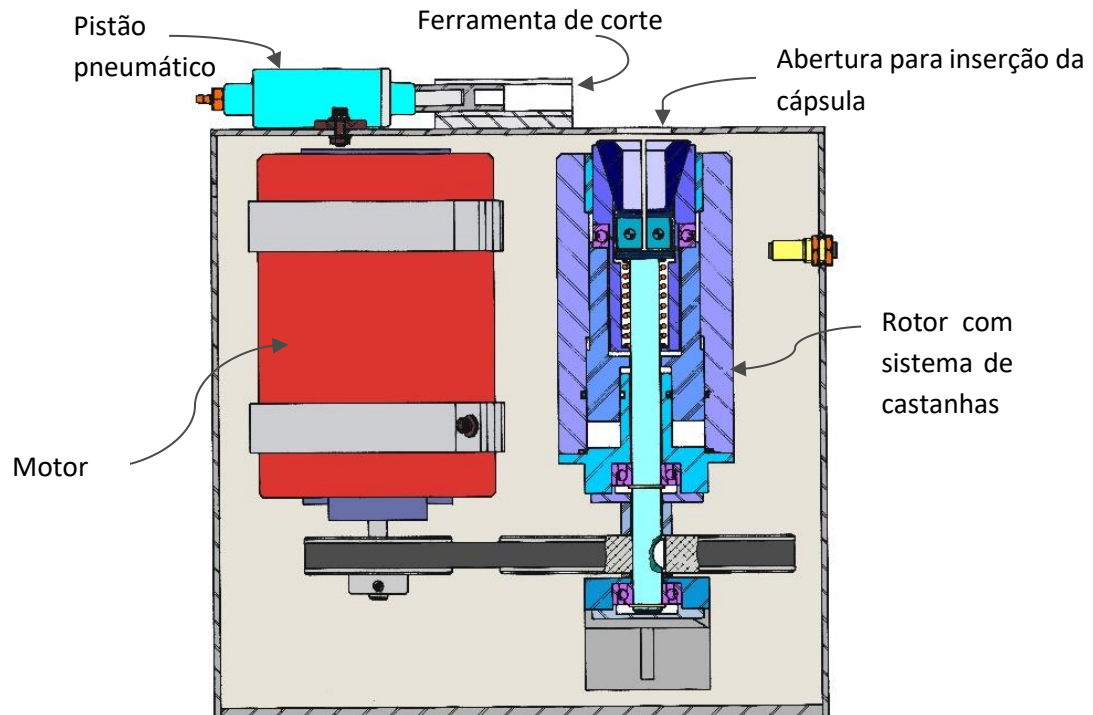


A placa guia **375** interage com a alavanca **260** por meio de uma borda curva **380**, por onde a alavanca **260** pode passar em uma posição de travamento, como mostrado na Figura 24 (A). A alavanca **260** permanece nesta posição travada durante o número de revoluções necessários ao corte do tubo. Um dente **385** em posição inferior da placa guia **375**, opera para mover a alavanca **260** para a posição de liberação, quando a rotação do conjunto da cabeça de corte se inverte, mostrado na figura 24 (B), removendo a carga nas molas **225**, **226**, e desbloqueando dos suportes superior e inferior **175**, **180**, a deslizarem pela haste guia **295**. Ainda neste sentido de rotação contrário ao corte, uma cunha de bloqueio **390** trava no dente **385** interrompendo a rotação invertida do cabeçote de corte, finalizando o processo e deixando a ferramenta pronta para um novo corte.

### 3.7 Dispositivo de abertura de cápsulas do IPEN

O dispositivo de abertura de cápsulas atual, foi projetado e fabricado no próprio IPEN, em 1989.

Figura 26 – Desenho técnico esquemático em corte lateral do dispositivo em uso no IPEN.



Fonte: IPEN, 1989, colorido pelo autor da dissertação.

Diferentemente de outros dispositivos, como em Nakajima (1994) e Douis et al. (COMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE, 1963), a parte mecânica móvel situa-se imediatamente abaixo da ferramenta de corte,

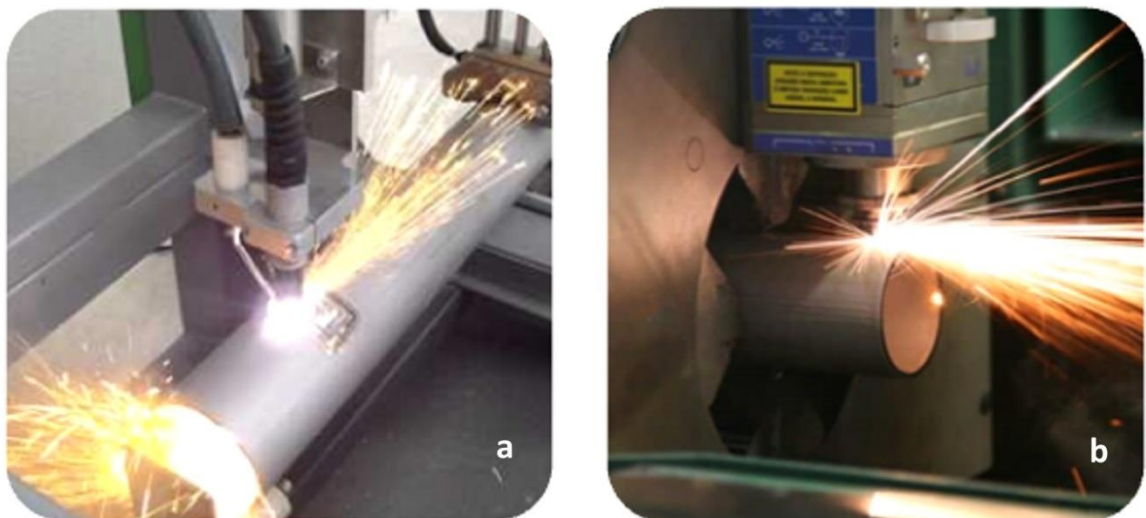
onde os detritos são gerados, deste modo, os resíduos do corte podem facilmente alojar-se na parte mecânica do dispositivo ocasionando mau funcionamento, como perda da centralização e fixação incorreta das cápsulas.

Os problemas mecânicos, aliados à velocidade de giro da cápsula, podem danificar a ampola ou materiais alvos sensíveis, que estejam dentro da cápsula.

### 3.8 Outras formas de cortes de tubos de alumínio

Há outras formas possíveis para corte de metais que podem ser aplicadas ao corte de tubos de alumínio, tais como corte a plasma, corte a laser (Figura 27) e corte por jato de água (HYPERTHERM, 2018; ASM INTERNATIONAL, 1990). Estas formas de corte propiciam grande precisão e velocidade ao corte, por outro lado exigem equipamentos de custo elevado e grande consumo de energia, portanto, em análise inicial, seriam menos indicadas a operar dentro de uma *hot cell*. As energias eletromagnética e térmica nos casos de laser e plasma ou cinética no caso do jato de água, poderiam interagir com os materiais irradiados gerando comportamentos não esperados na amostra, ou mesmo comprometendo as ampolas, o que seria indesejado para o escopo deste trabalho.

Figura 27 – Imagem de dispositivo de corte a plasma (a) e laser (b) operando o corte de tubos.



Fonte: HYPERTHERM, 2018.

#### 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir o objetivo descrito anteriormente, o trabalho foi desenvolvido da seguinte forma:

- 1) Pesquisa de métodos de abertura de cápsulas irradiados em reator nuclear, que utilizam sistemas semelhantes aos utilizados no reator IEA-R1;
- 2) Pesquisa de equipamentos comerciais disponíveis, que poderiam ser aplicados parcialmente ou integralmente, no projeto do dispositivo de abertura de cápsulas;
- 3) Projeto do dispositivo de abertura de cápsulas, atendendo aos objetivos específicos, que contém três sistemas principais: cabeçote de corte, fixação da cápsula e, comando e controle;
- 4) Sugestão de mais de uma opção para os sistemas, cabendo testes de viabilidade em protótipo que validem uma opção escolhida.

O sistema de corte definido para o novo dispositivo foi baseado nos equipamentos apresentados na revisão bibliográfica, utilizados em instalações nucleares e equipamentos comerciais elétricos de corte de tubos (Figura 28), com intuito de se aproveitar elementos de fácil aquisição e menor custo na fabricação do dispositivo.

Figura 28 – Detalhe de mecanismo de equipamento comercial para corte de tubos.



Fonte: MILWAUKEE, 2019.

Os equipamentos de corte manual (Figura 29) comercialmente disponíveis podem ser adaptados para testes em protótipos e

posteriormente podem servir de fontes de peças específicas para o dispositivo, como os discos e seus respectivos suportes e fusos (Figura 30).

Figura 29 – Cortador de tubos manual.



Fonte: SWAGELOK, 2021.

Figura 30 – Lâminas tipo disco de corte e montagem em suporte com fuso de posicionamento.



Fonte: autor da dissertação.

Nos testes de corte foram utilizadas cápsulas de alumínio do IPEN de lotes aprovados para uso no reator nuclear IEA-R1, sendo utilizado um torno mecânico universal, marca Bener, modelo Magnum-cut FEL-1440 GWM, da oficina mecânica do CTR, na execução do corte, adaptando-se um coletor de cavacos, feito de folha de alumínio, abaixo da posição de corte no torno. Foi utilizada uma balança de precisão marca SHIMADZU, modelo AUY220, para medição da massa dos cavacos.

Como modelo para o sistema de corte por lâmina de disco foi utilizado um cortador manual de tubos marca SWAGELOK, modelo MS-TC-308, os primeiros cortes foram realizados com este equipamento para visualização e entendimento da operação.

O projeto foi desenvolvido em software de desenho SketchUp, versão 20.1.235 64-bit (TRIMBLE, 2021), resultando nos desenhos esquemáticos apresentados na seção de resultados e discussão.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Existem grandes variedades de métodos de corte de tubos metálicos. Os mais comumente encontrados envolvem algum tipo de corte abrasivo, tais como serras e discos de corte (COMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE, 1963). O método utilizado pelo dispositivo atual do IPEN é de usinagem por torneamento. Ambos os métodos envolvem a remoção de material da parede da cápsula para a realização do corte.

Tanto o método abrasivo, quanto o de usinagem, geram muitos resíduos de corte, que podem ser de tamanhos variados, mais parecidos com um pó grosso no caso de abrasão, e semelhantes a lascas ou pequenas fitas no caso da usinagem, comumente conhecidas como aparas ou cavacos. Há ainda o método abrasivo por jato de água de alta pressão, que gera o mesmo tipo de resíduos de abrasão, sendo estes resíduos removidos e arrastados pelo próprio fluxo de água do processo.

Os métodos expostos previamente foram descartados para este trabalho pelo fato de o objeto a ser cortado estar radioativo, pois foi previamente exposto ao fluxo de nêutrons do reator nuclear. Um dos objetivos na realização deste projeto é a redução ou eliminação de detritos radioativos, que possam ser gerados durante a abertura da cápsula, de modo a prevenir a contaminação do ambiente da *hot cell*.

Outras formas possíveis para corte de metais que podem ser aplicadas ao corte de tubos de alumínio são o corte a plasma e o corte a laser (HYPERTHERM, 2018; ASM INTERNATIONAL, 1990). Estas formas de corte propiciam pouca geração de detritos, pequenas gotas de metal fundido, que em contato com o meio em que se dá o corte, em geral ar atmosférico, logo resfriam formando pequenas esferas de metal. Este tipo de corte envolve grandes quantidades de energia e o corte se dá pela fusão do material da parede.

Realizar um corte que envolva a fusão do material radioativo, pode gerar dispersão de material pelo ambiente do sistema de corte. A energia eletromagnética e térmica adicionada à cápsula pelo processo de corte, pode

acabar sendo transferida para as amostras irradiadas, comprometendo as características desejadas e a integridade das ampolas. O uso de plasma e laser para o corte das cápsulas de alumínio irradiadas foi descartado, devido aos problemas descritos anteriormente.

Em vista das situações expostas, o método escolhido foi o de corte por lâmina de disco não abrasiva. Dispositivos de corte orbital, por lâminas de disco, como em Milwaukee (2014), Lazarevic (2012), Wrate (2001) e Nakajima (1994), consistem em discos feitos de metal com maior dureza que o material que será cortado. Esses discos são movimentados em torno do tubo, exercendo pressão contra a parede do material, causando uma deformação plástica de forma que a espessura da parede seja reduzida por escoamento do material, diminuindo a resistência do material nesta região. Em determinado momento a resistência do material fica muito baixa devido à pequena espessura da parede, levando ao rompimento do metal, que não suporta mais a pressão exercida pelo disco, configurando uma fratura dúctil (ASM INTERNATIONAL, 1990). Esta forma de corte apresenta baixa produção de resíduos.

Testes de bancada usando a ferramenta de corte (bits) do sistema atual, conectado a um torno (Figura 31), em rotação de 460 rpm, simularam o mecanismo do dispositivo de abertura atual.

Figura 31 – Teste de corte com ferramenta atual, ferramenta acoplada ao torno (esq.), cortando a cápsula (dir.) com utilização de cavilha de madeira como suporte.



Fonte: autor da dissertação.

Foram realizados cortes em quatro cápsulas que produziram uma média de 0,3(2) mg de detritos por corte, com uma grande variedade de

comprimentos, a maior parte entre 1 mm e 5 mm. Embora possa parecer uma ínfima quantidade de resíduos, uma liga de alumínio irradiada no reator nuclear IEA-R1, gera uma grande quantidade de radionuclídeos, como pode ser verificado na Tabela 1, que contaminam a *hot cell*.

Tabela 1 – Características dos nuclídeos de liga de alumínio irradiados no reator IEA-R1 e seus nuclídeos esperados da reação  $n,\gamma$ .

Nuclídeo	Seção de choque de reação (b)	Abundância	% na liga	Massa (g)	Massa (%)	Nuclídeo resultante	Meia-vida
Al-27	0,231	100	96	4,80	96,8	Al-28	2,245 m
Si-28	0,177	92,23	0,8	$3,69 \times 10^{-2}$	0,744	Si-29	--
Si-29	0,101	4,67	0,8	$1,87 \times 10^{-3}$	0,0377	Si-30	--
Si-30	0,107	3,1	0,8	$1,24 \times 10^{-3}$	0,0250	Si-31	157,3 m
Fe-54	2,25	5,8	0,7	$2,03 \times 10^{-3}$	0,0409	Fe-55	2,744 a
Fe-56	2,59	91,72	0,7	$3,21 \times 10^{-2}$	0,647	Fe-57	--
Fe-57	2,5	2,2	0,7	$7,70 \times 10^{-4}$	0,0155	Fe-58	--
Fe-58	1,28	0,28	0,7	$9,80 \times 10^{-5}$	0,00198	Fe-59	44,503 d
Cu-63	4,5	69,17	0,4	$1,38 \times 10^{-2}$	0,279	Cu-64	12,7 h
Cu-65	2,17	30,83	0,4	$6,16 \times 10^{-3}$	0,124	Cu-66	5,088 m
Mn-55	13,3	100	0,15	$7,50 \times 10^{-3}$	0,151	Mn-56	2,5785 h
Mg-24	0,051	78,99	0,15	$5,92 \times 10^{-3}$	0,119	Mg-25	--
Mg-25	0,19	10	1,2	$6,00 \times 10^{-3}$	0,121	Mg-26	--
Mg-26	0,0382	11,01	1,2	$6,60 \times 10^{-3}$	0,133	Mg-27	9,458 m
Cr-50	15,9	4,345	0,35	$7,60 \times 10^{-4}$	0,0153	Cr-51	27,702 d
Cr-52	0,76	83,789	0,35	$1,47 \times 10^{-2}$	0,296	Cr-53	--
Cr-53	18,2	9,501	0,35	$1,66 \times 10^{-3}$	0,0335	Cr-54	--
Cr-54	0,36	2,365	0,35	$4,14 \times 10^{-4}$	0,00835	Cr-55	3,497 m
Zn-64	0,76	48,6	0,25	$6,07 \times 10^{-3}$	0,123	Zn-65	243,93 d
Zn-66	0,85	27,9	0,25	$3,49 \times 10^{-3}$	0,0703	Zn-67	--
Zn-67	6,8	4,1	0,25	$5,12 \times 10^{-4}$	0,0103	Zn-68	--
Zn-68	0,072	18,8	0,25	$2,35 \times 10^{-3}$	0,0474	Zn-69	13,76 h
Zn-70	0,091	0,6	0,25	$7,50 \times 10^{-5}$	0,00151	Zn-71	3,96 h
Ti-46	0,59	8	0,15	$6,00 \times 10^{-4}$	0,0121	Ti-47	--
Ti-47	1,7	7,3	0,15	$5,47 \times 10^{-4}$	0,0110	Ti-48	--
Ti-48	7,84	73,8	0,15	$5,53 \times 10^{-3}$	0,112	Ti-49	--
Ti-49	2,2	5,5	0,15	$4,12 \times 10^{-4}$	0,00832	Ti-50	--
Ti-50	0,179	5,4	0,15	$4,05 \times 10^{-4}$	0,00817	Ti-51	5,76 m

Fontes: ISOTOPE, 2021; NUCLEAR, 2021; ABNT, 2010; LIDE, 2006; adaptado de COSTA, 2015.

Notas: Foram utilizados os percentuais máximos permitidos por elemento na liga de alumínio.

As unidades de meia-vida: m = minutos, h = horas, d = dias, a = anos.

Sinais convencionais utilizados:

-- Nuclídeo considerado estável, ou ainda sem valor considerado de meia-vida.

Os radionuclídeos de longas meia-vidas que podem ser gerados pela irradiação da liga de Alumínio possuem seções de choque e abundâncias baixas, portanto a quantidade de radiação proveniente dos resíduos do corte também é pequena. Entretanto, esta quantidade de resíduos, mesmo pequena, da ordem de décimos de miligramas por corte, pode ser minimizada por meio de um sistema de corte que gere menor quantidade de detritos.

Durante a execução dos cortes de teste, alguns tubos sofreram colapso (Figura 32). As causas mais prováveis para os colapsos das paredes das cápsulas foram a fixação com aperto inadequado, falta de centralização e alta velocidade de rotação associada ao avanço rápido da ferramenta de corte.

Figura 32 – Cápsula colapsada devido ao corte impreciso.



Fonte: autor da dissertação.

Nos testes que resultaram em corte satisfatório, foi garantido o aperto suficiente das castanhas do cabeçote do torno, garantindo a correta fixação da cápsula, bem como foi utilizada uma cavilha de madeira na extremidade aberta da cápsula para a garantia da manutenção da centralização, vista nas Figuras 31 e 33. É importante ressaltar que a cavilha de madeira também fez o papel da tampa soldada da cápsula, fornecendo reforço estrutural à peça, e servindo como apoio da cápsula ao avanço da ferramenta.

No mesmo torno, foram realizados testes subsequentes, alterando-se a ferramenta de corte (bits) pela lâmina tipo disco de corte não



abrasiva (Figura 33), e rotação de 85 rpm, mostrando uma redução de detritos em mais de 99 %, e ficando o tamanho das partículas dos detritos menor que 0,1 mm.

Figura 33 – Teste de corte com lâmina tipo disco, montagem da ferramenta no torno (esq.), cortando a cápsula (dir.) com cavilha de madeira como suporte.



Fonte: autor da dissertação.

Os testes mostraram que os discos de corte executam a abertura da cápsula com menor geração de detritos do que as ferramentas de corte atuais (bits). Como mostrado na figura 34, o resultado final das cápsulas cortadas pelos dois métodos é muito semelhante, indicando que a mudança do método de corte não afetará os procedimentos realizados após a abertura da cápsula.

Figura 34 – Detalhe de cápsula aberta por ferramenta atual (bits) (esq.) e cápsula aberta por lâmina tipo disco de corte (dir.).



Fonte: autor da dissertação.

Além disso, quando o avanço do disco de corte ultrapassava uma **velocidade limite**, o escoamento do material da parede da cápsula ficou

dificultado, resultando em uma deformação na parede e causando rebarbas em seu interior após o corte (Figura 35).

Figura 35 – Detalhe da deformação da parede da cápsula na região do corte, causada pela velocidade excessiva de avanço do disco de corte.

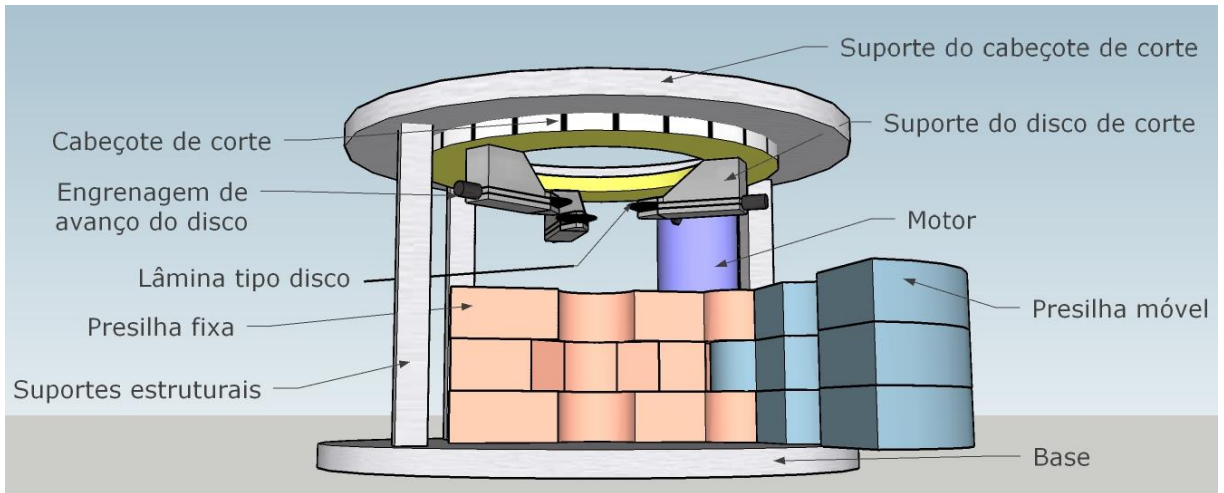


Fonte: autor da dissertação.

A partir dos dispositivos estudados como referência e do tipo de corte efetuado pela lâmina de disco de corte não abrasivo, foi proposto o projeto a seguir para um dispositivo de corte a ser implementado no IPEN.

O dispositivo foi projetado inteiramente aberto e acessível para facilitar a visualização de seu correto funcionamento, limpeza e manutenção das peças internas. O motor é conectado diretamente ao cabeçote de corte, reduzindo a quantidade de peças móveis. As presilhas têm um ângulo de abertura maior que 90 graus e recessos para facilitar os procedimentos de inserção e retirada das cápsulas com os telemanipuladores. O detalhamento das partes do dispositivo de abertura projetado é mostrado na Figura 36.

Figura 36 – Desenho do dispositivo proposto, com indicação das partes.

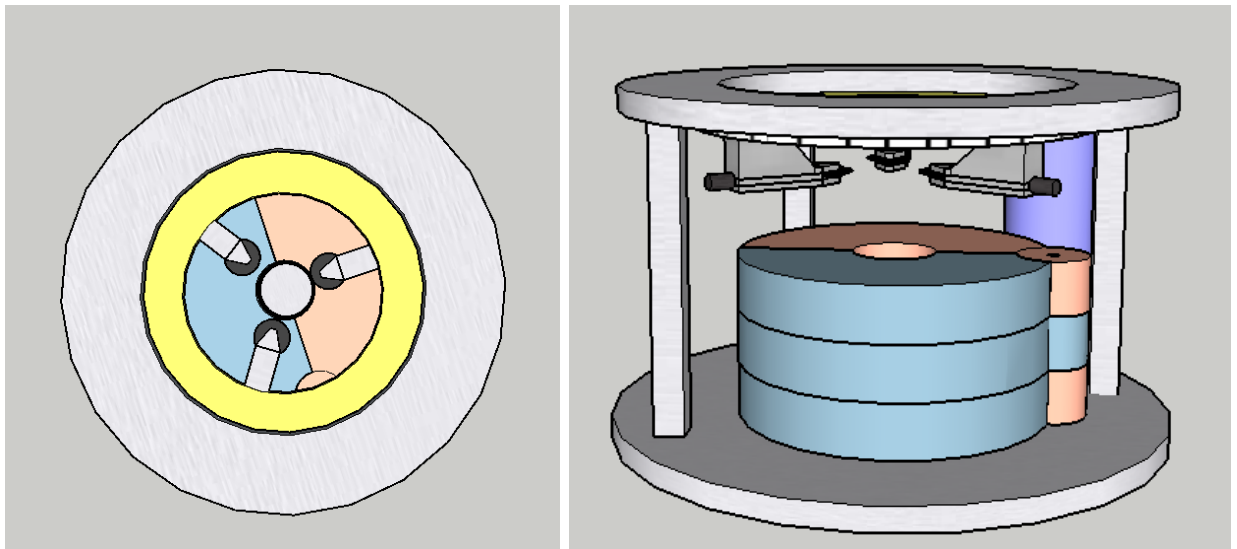


Fonte: autor da dissertação.

O dispositivo de abertura proposto, ilustrado nas Figuras 37 e 38, possui três sistemas, sendo eles:

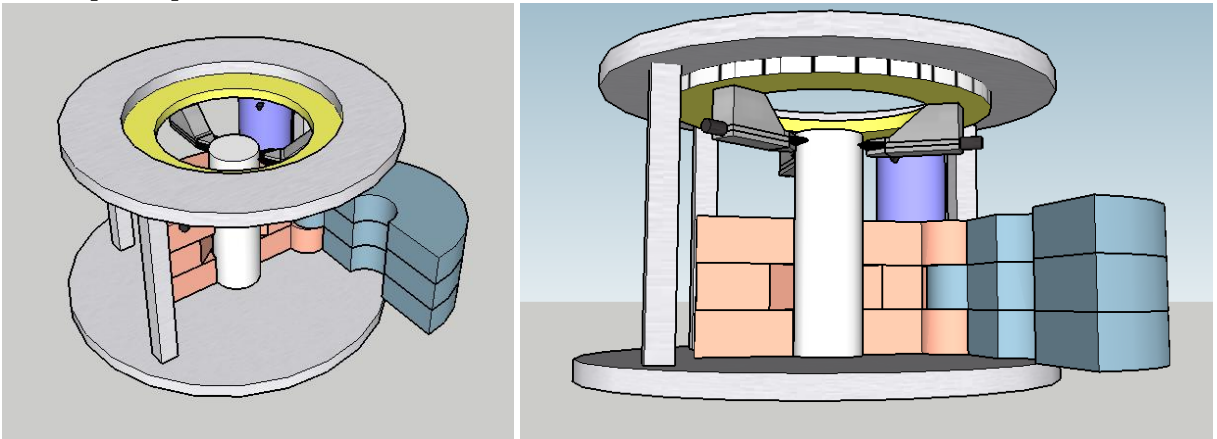
- 1- Sistema de fixação da cápsula;
- 2- Sistema de corte;
- 3- Sistema de comando, controle e segurança.

Figura 37 – Desenho do dispositivo proposto, vista superior (esq.), vista lateral (dir.).



Fonte: autor da dissertação.

Figura 38 – Desenhos do dispositivo proposto, perspectivas laterais com a presilha aberta e a cápsula posicionada.



Fonte: autor da dissertação.

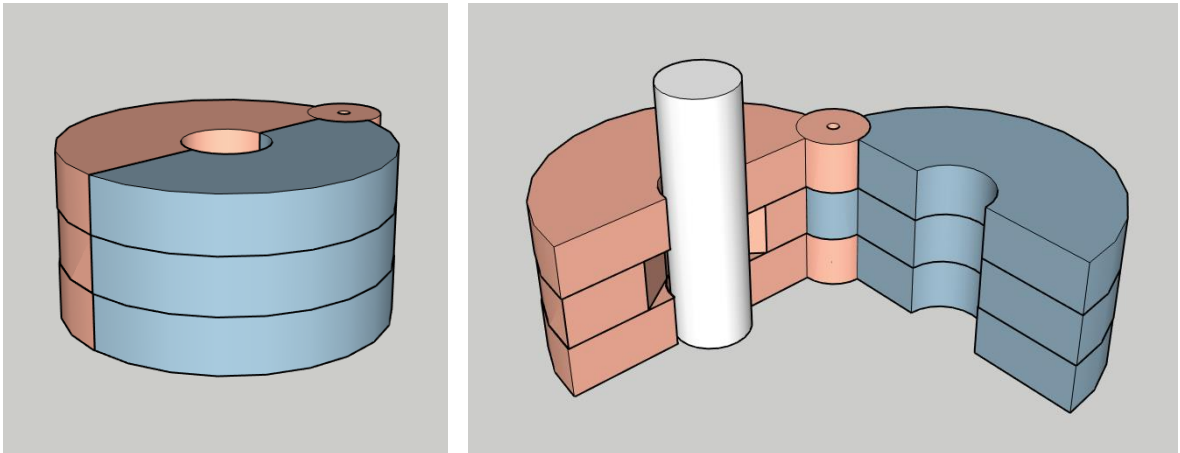
O cabeçote de corte em posição superior, contendo três lâminas de disco (sugestão), move-se com baixa rotação em torno da cápsula enquanto os suportes dos três discos avançam radialmente para o centro, executando o corte e abrindo a cápsula.

### 5.1 Sistema de fixação da cápsula

Para incremento na segurança do processo de corte, optou-se por fixar a cápsula, mantendo-a imobilizada, minimizando assim a vibração nas amostras irradiadas durante o procedimento de corte e, deste modo, garantindo maior integridade para ampolas de líquido, de gases e outros materiais alvo mais sensíveis à vibração.

A fixação das cápsulas será garantida por um sistema de fechamento feito por duas presilhas em forma de abas com reentrâncias cilíndricas para a cápsula, também havendo outras reentrâncias para que as pinças dos telemanipuladores posicionem a cápsula com maior facilidade (Figura 39). Uma presilha será fixa e a cápsula será posicionada na sua reentrância, também servindo como guia. A outra presilha será móvel, articulando em uma das extremidades, para facilitar o acesso do telemanipulador com a cápsula à posição correta no sistema de fixação do dispositivo.

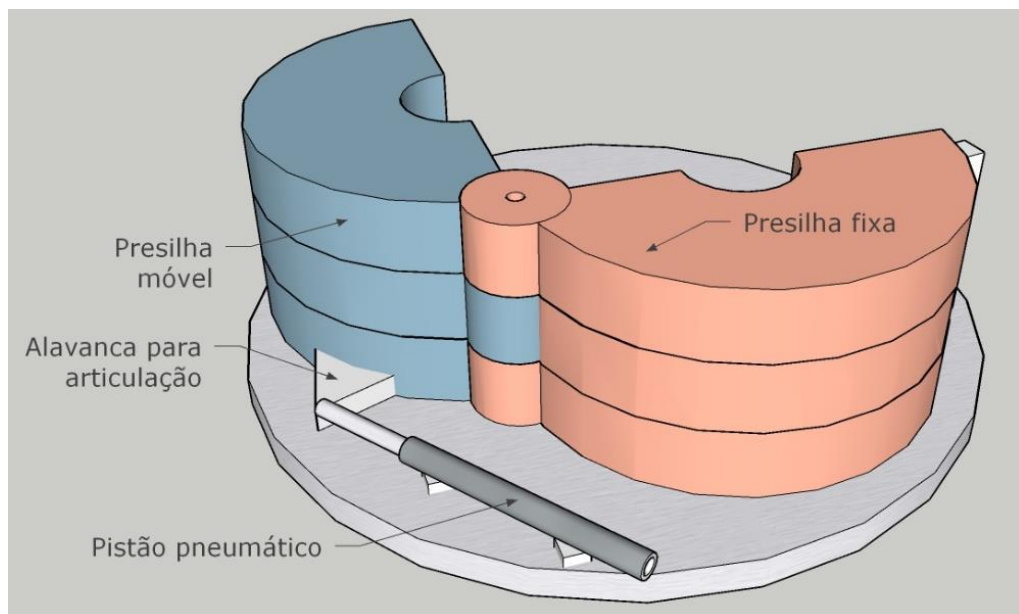
Figura 39 – Presilhas tipo aba, em posição fechada (esq.) e aberta com a cápsula posicionada (dir.).



Fonte: autor da dissertação.

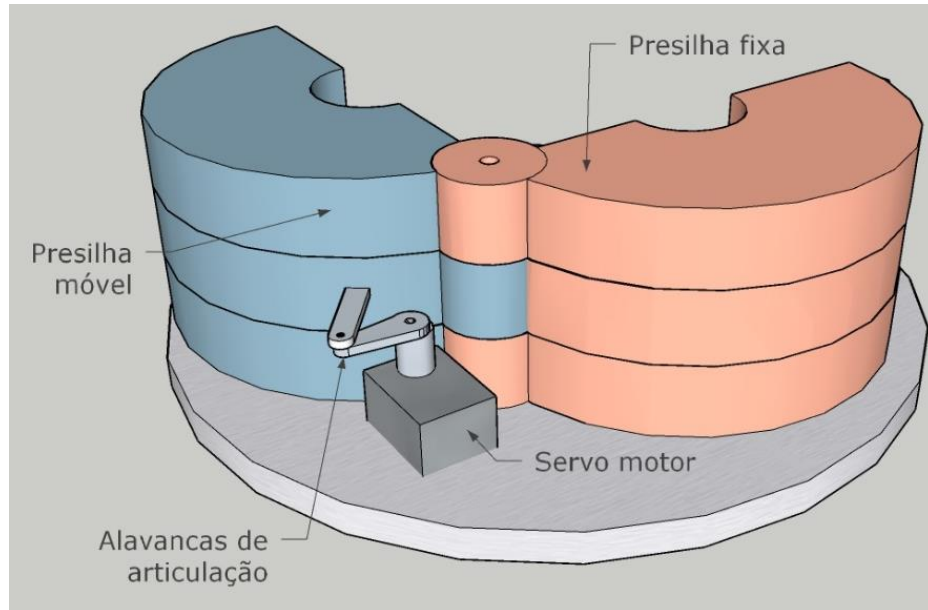
A movimentação da presilha móvel poderá ser feita por telemanipulador (mecânica manual), atuador pneumático ou por servo motor. Uma trava mecânica, acionada por eletroímã, garantirá o correto fechamento das presilhas, que contará também com uma alavanca para destravamento com os telemanipuladores, para ser utilizada no caso de falha do sistema elétrico.

Figura 40 – Exemplo de montagem do sistema de fixação da cápsula com atuador pneumático para movimentação da presilha.



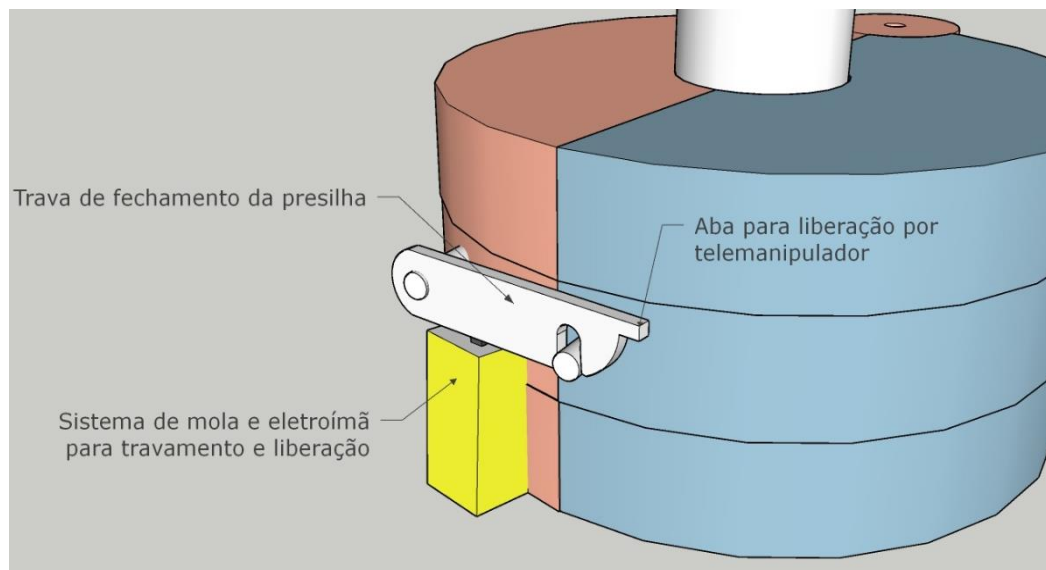
Fonte: autor da dissertação.

Figura 41 – Exemplo de montagem do sistema de fixação da cápsula com servo motor para movimentação da presilha.



Fonte: autor da dissertação.

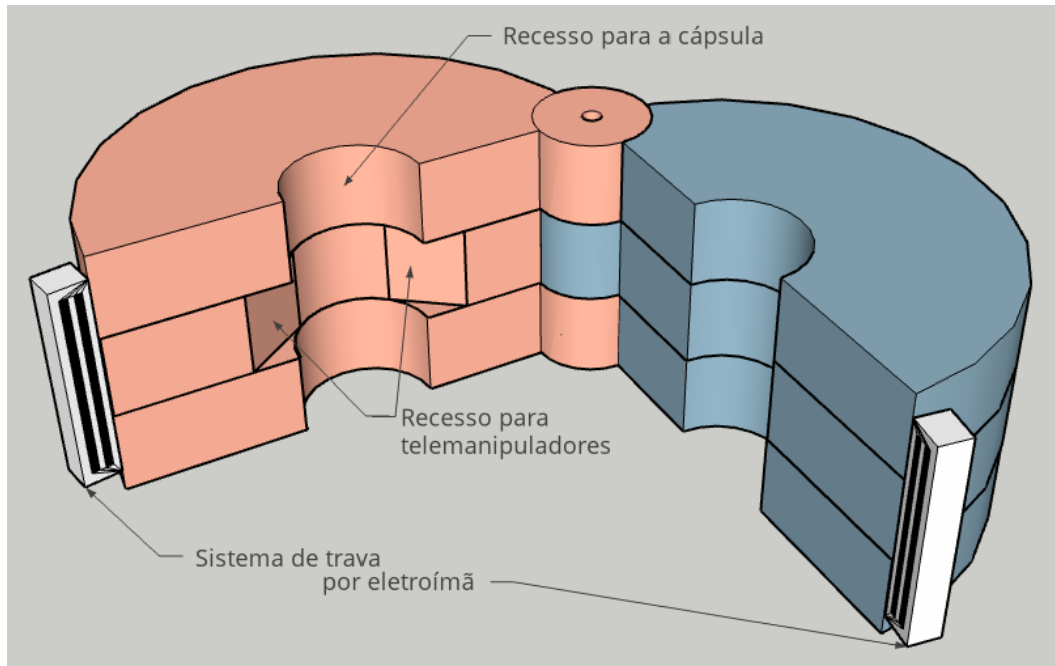
Figura 42 – Exemplo de montagem do sistema de fixação da cápsula com trava eletromecânica para as presilhas.



Fonte: autor da dissertação.

As cápsulas serão imobilizadas por interferência e atrito com seus respectivos recessos. Os discos de corte interagem com a parede da cápsula na direção radial, a rotação do cabeçote de corte é pouco transferida para a cápsula pois os discos de cortes são livres para girar em seus eixos, minimizando o torque aplicado à cápsula. Será necessário validação em protótipo da dimensão da interferência, bem como da rugosidade dos recessos para a garantia da imobilização da cápsula durante o corte.

Figura 43 – Exemplo de montagem do sistema de fixação da cápsula com trava eletromagnética para as presilhas.



Fonte: autor da dissertação.

O dispositivo foi projetado visando uma participação maior do operador, com inserção e retirada da cápsula sendo executados por meio de pinças telemanipuladoras. Esta é uma opção muito utilizada nos institutos de pesquisa, que lidam com pequenos volumes de produção e com amostras radioativas que apresentam menor intensidade de radiação e grande variação de características.

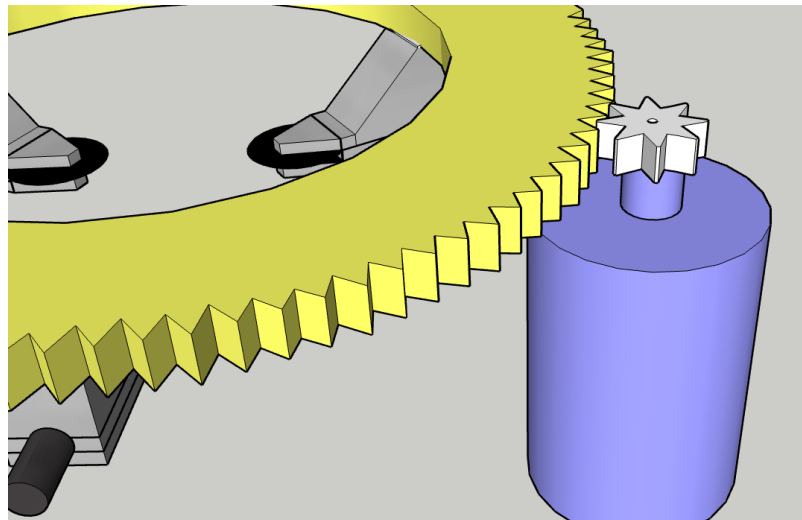
Para uma aplicação em produção comercial de radionuclídeos, onde se lida com campos de irradiação muito maiores, e com maior padronização das amostras, o dispositivo pode ser projetado tendo em vista um sistema com automação total, que é mais indicado para este tipo de aplicação, necessitando adicionar um sistema automático de inserção e remoção da cápsula.

Quaisquer detritos eventualmente gerados pelo processo de corte, ficarão depositados sobre as abas e na base do dispositivo, e podem ser facilmente visualizados e removidos, pois há espaço livre para introdução de equipamento de limpeza. O projeto do dispositivo sem invólucro externo, com seus sistemas expostos, agrega este benefício.

## 5.2 Sistema de corte da cápsula

O cabeçote de corte proposto apresenta dentes de engrenagem à sua volta, que se conectam diretamente à outra engrenagem fixada ao eixo do motor (Figura 44), simplificando assim o mecanismo de tração, e o motor é alimentado e controlado remotamente por automação no painel de controle externo à *hot cell*.

Figura 44 – Detalhe do acoplamento direto do motor ao cabeçote de corte.



Fonte: autor da dissertação.

O motor poderá ser do tipo assíncrono, monofásico com 1/8 cv, semelhante a WEG W12 (WEG MOTORES S.A., 2021), com velocidade constante, sendo a velocidade de rotação do cabeçote de corte definida pela relação entre as engrenagens do motor e do cabeçote, ou ainda por acoplamento a uma caixa de redução. Outra forma de acoplamento seria com uma engrenagem tipo rosca sem fim, semelhante ao tracionamento no dispositivo de Wrate (2001)(Figura 17).

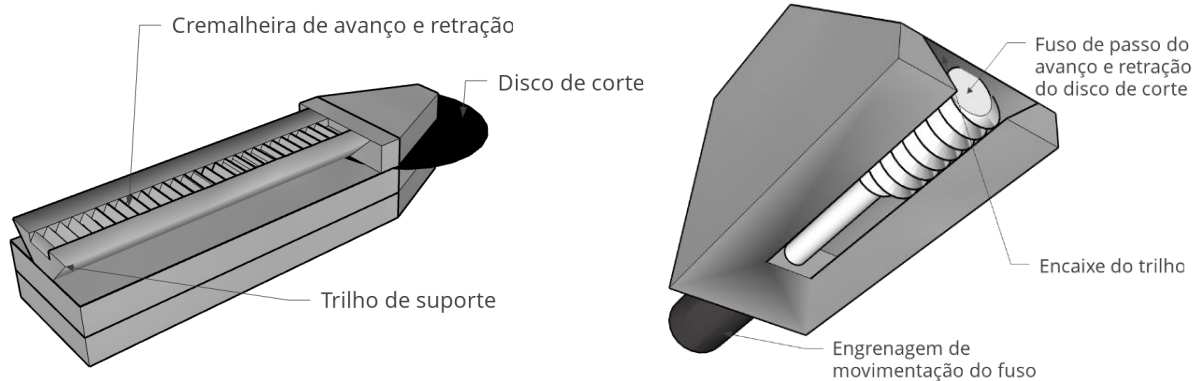
Como opção pode ser usado um motor de passo tipo Nema 17, Nema 23, ou similar, e seu respectivo *driver*, como por exemplo Kalatec STR3 (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2021), com sua velocidade controlada no painel de comando, sendo necessário neste caso o uso de uma placa controladora. O acoplamento mecânico do motor de passo ao cabeçote de corte seria similar, por meio de uma engrenagem ligada ao eixo do motor e em contato com a engrenagem na borda do cabeçote.

O cabeçote de corte sustenta os suportes para os discos de corte, que possuem mecanismos para o controle de avanço e recuo do disco de



corte. Os suportes dos discos de corte serão construídos de forma a acomodar o sistema de avanço e retração da lâmina de disco, feito através de um fuso conectado ao suporte da lâmina de disco em uma extremidade, e uma engrenagem na extremidade oposta (Figura 45), semelhante ao mostrado nas Figuras 29 e 30.

Figura 45 – Detalhe do suporte dos discos de corte, parte inferior (esq.), parte superior (dir.).



Fonte: autor da dissertação.

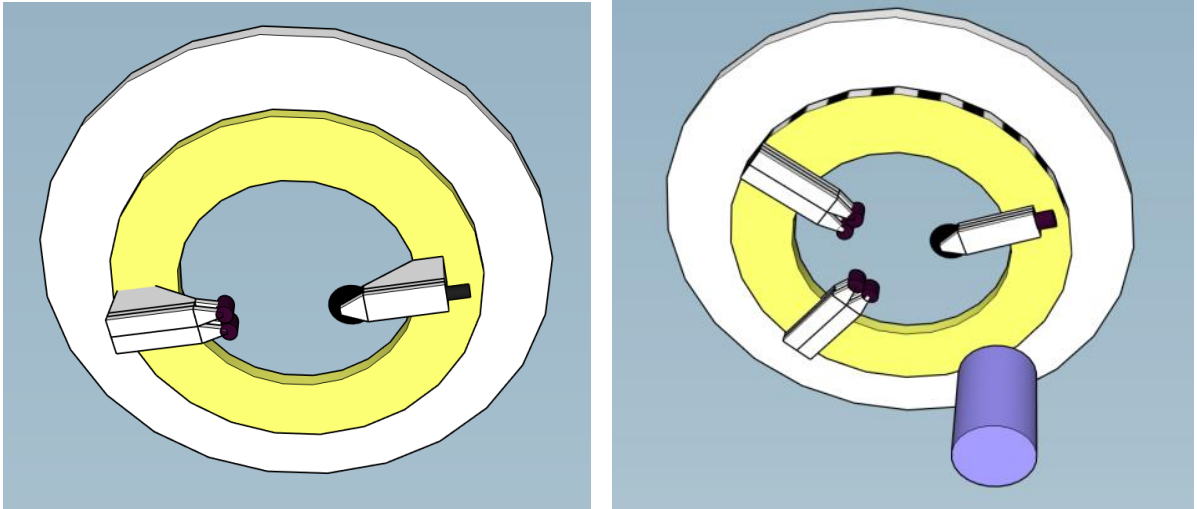
A engrenagem será acionada a cada volta por interferência com um pino fixo, posicionado em um dos suportes, funcionando de forma análoga ao posicionador da lâmina de disco de Wrate (2001) (Figura 19), o suporte da lâmina de disco executa uma trajetória radial, e tem seu movimento sustentado por entalhes-guia ou trilhos.

A quantidade de suportes conectados ao cabeçote de corte deverá ser validada em testes, sendo as possibilidades:

1. Dois suportes – um com seu respectivo disco de corte e outro com rolos de apoio, diametralmente posicionados;
2. Dois suportes – ambos com discos de corte, diametralmente posicionados;
3. Três suportes – um com disco de corte e dois com rolos de apoio, dispostos em aberturas angulares de 120°;
4. Três suportes – dois com discos de corte e um com rolos de apoio, dispostos em aberturas angulares de 120°;
5. Três suportes – sendo os três com lâminas de disco de corte, dispostos em aberturas angulares de 120°.

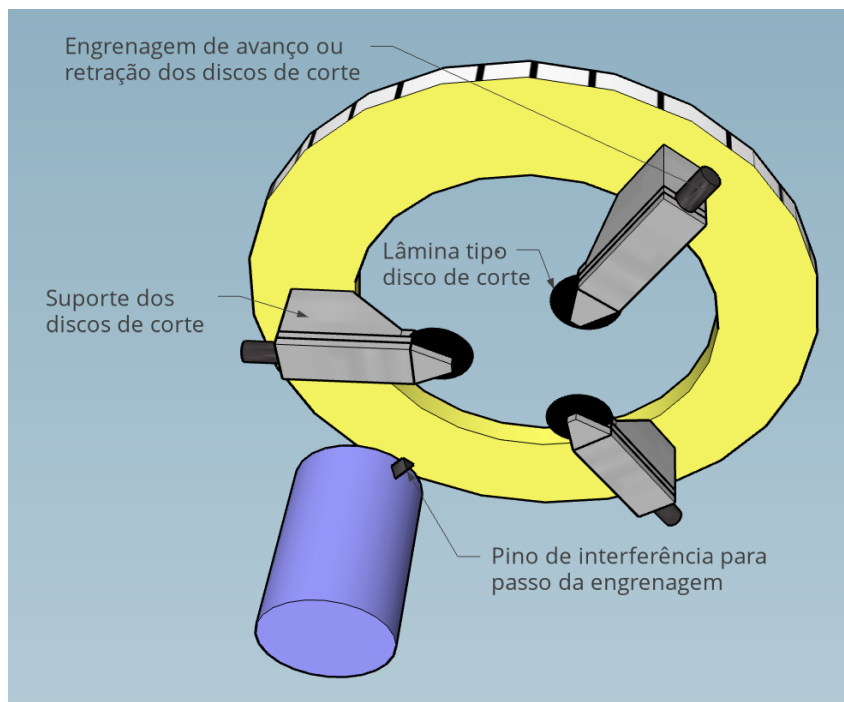
Alguns destes arranjos estão apresentados nas Figuras 46 e 47.

Figura 46 – Cabeçote de corte em dois arranjos possíveis, com um disco de corte e um apoio (esq.), e com um disco de corte e dois apoios (dir.).



Fonte: autor da dissertação.

Figura 47 – Cabeçote de corte com três lâminas de disco, como sugerido nas imagens completas do dispositivo.



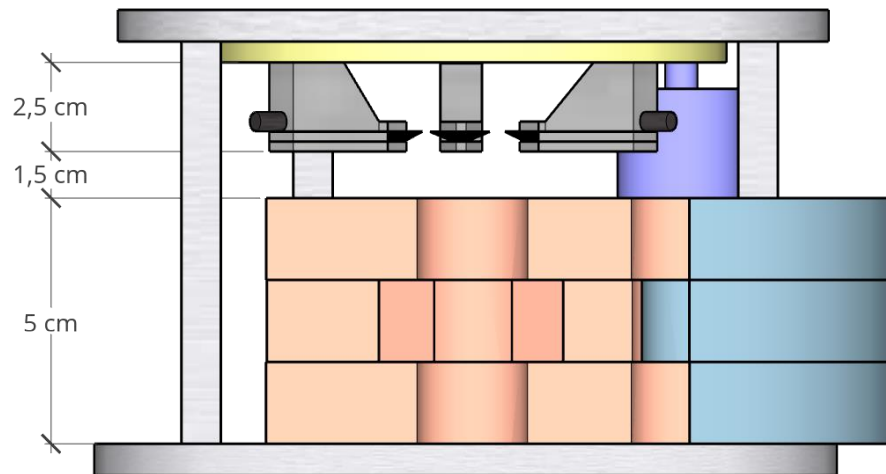
Fonte: autor da dissertação.

Como velocidade de avanço da ferramenta de corte, temos a citada por Nakajima (1994), que é de  $2,7 \text{ mm min}^{-1}$ , para uma rotação do cabeçote de 108 rpm, resultando em um avanço de 0,025 mm por volta. O dispositivo de Douis (COMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE, 1963) cita como avanço completo da ferramenta de corte, 2,5 mm, sendo este à razão de 0,05 mm para cada revolução do cabeçote. A retração das ferramentas se realiza pela inversão da rotação do cabeçote.

Para maior controle do processo, optou-se por uma rotação baixa, de cerca de 50 rpm, com um avanço de cerca de 0,05 mm por volta, semelhante ao do dispositivo de Douis et al. (COMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE, 1963). O tempo gasto no corte não é fator preponderante nesta situação de produção em laboratório. A espessura da parede da cápsula é 1mm, e com os valores propostos de avanço da ferramenta e rpm, o tempo de corte fica estimado em torno de 30 segundos, o que pode ser alterado, durante os testes com protótipo, pela mudança da quantidade de dentes na engrenagem do fuso no suporte da lâmina de disco.

A forma de construção do suporte prevê uma distância de 2,5 cm entre o plano de corte das lâminas de disco e a parte inferior da engrenagem acoplada ao motor, onde os suportes dos discos estão conectados. O corte deve ser realizado a 0,5 cm da extremidade da cápsula, portanto a 6,5 cm da base, totalizando uma altura livre de 9 cm entre a base do dispositivo e o cabeçote de corte, tornando o dispositivo bastante compacto.

Figura 48 – Indicação das dimensões verticais do dispositivo.



Fonte: autor da dissertação.

Estas dimensões também necessitarão de validação durante testes em protótipo, podendo ser aumentadas apenas alterando o comprimento dos suportes do cabeçote de corte e a altura dos suportes dos discos de corte, não implicando alterações no funcionamento dos sistemas do dispositivo.

As características de posição e controle do cabeçote de corte facilitam a inserção e retirada da cápsula, de modo que, na posição de recuo

total das lâminas de disco, que é também a posição de início da operação de corte, a abertura entre os discos é maior que o diâmetro da cápsula, permitindo sua inserção livremente pela lateral do dispositivo, por meio de pinças telemanipuladoras.

Após o corte, a inversão da rotação do cabeçote resultará na retração dos discos de corte, por meio da contra-rotação da engrenagem de passo conectada ao fuso posicionador nos suportes dos discos de corte, voltando a posição inicial e permitindo a retirada da cápsula pela lateral do dispositivo.

A abertura central superior do cabeçote de corte serve para visualização do processo de abertura, alternativamente pode ser usado como acesso superior, para inserção ou retirada da cápsula, ou acesso ao material de seu interior, por meio de pinças telemanipuladoras.

### **5.3 Sistema de comando, controle e segurança**

O sistema de comando, controle e segurança deve permitir uma parada imediata, e o correto funcionamento dos sistemas de fixação da cápsula e de corte. A operação completa de abertura da cápsula se dá em algumas etapas apresentadas em sequência:

1. habilitação do sistema de comando, controle e segurança por meio da energização dos sistemas elétricos do painel, que se encontram fora da *hot cell*. O painel de comando conta com três botões de ações, um para parada geral (podendo ser o mesmo botão de energização do painel), um para operação do sistema de fixação da cápsula, e um para a operação do sistema de corte.
2. operação de posicionamento e fixação da cápsula. O sistema de fixação da cápsula inicia na posição com abas abertas e trava liberada. O posicionamento da cápsula é realizado pelo operador por meio das pinças telemanipuladoras, em seguida, é pressionado o botão de acionamento do sistema de fixação da cápsula que movimenta as abas para a posição fechada e aciona a trava. A partir do travamento das presilhas, o sistema de corte fica habilitado a operar.

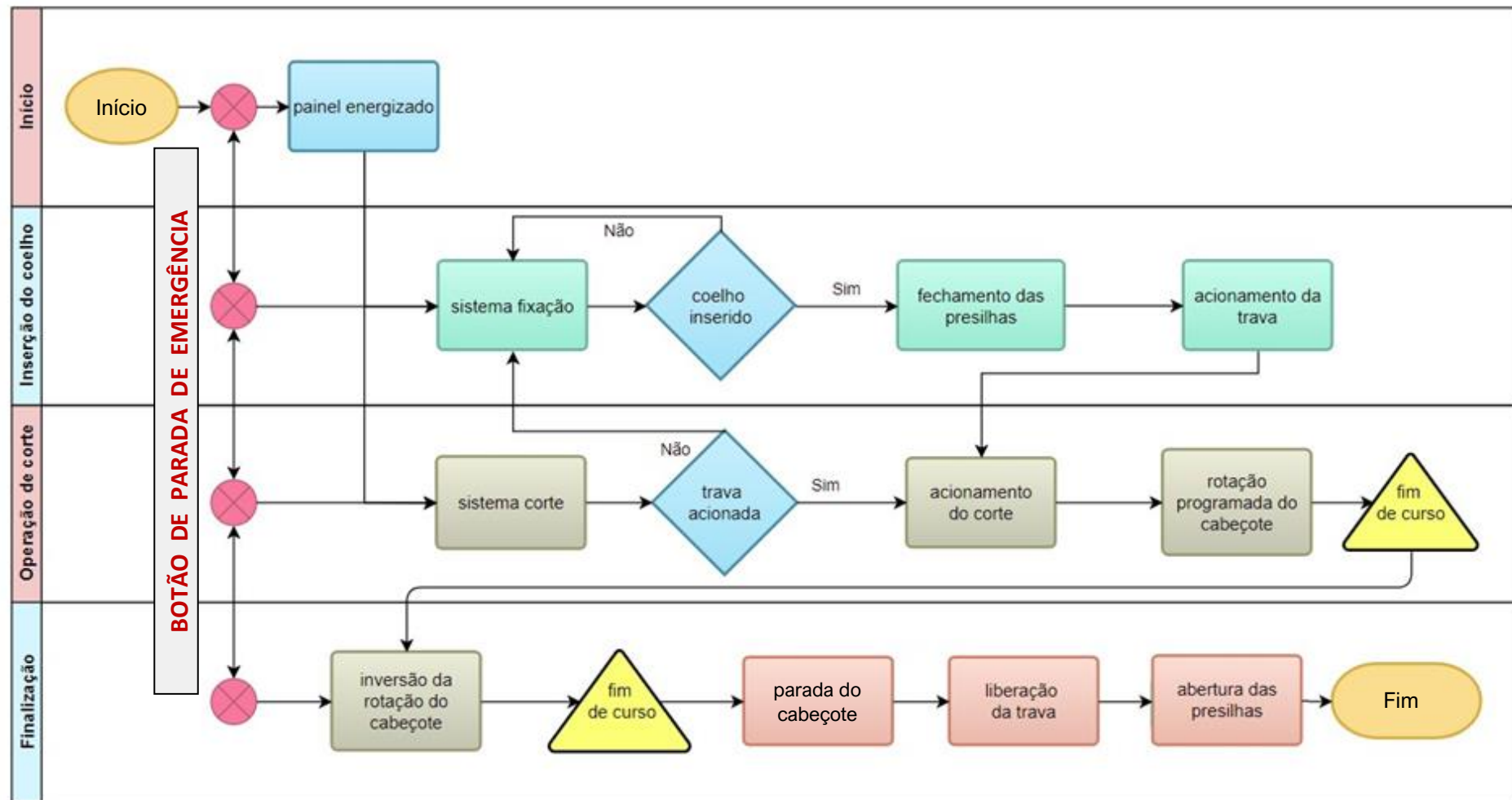
3. operação de corte. O pressionamento do botão de corte faz o cabeçote de corte iniciar a rotação. Subsequentemente, as lâminas de disco avançam a cada volta, pela interferência mecânica entre a engrenagem fixada ao fuso e um pino de avanço de passo, e realizam o corte da cápsula próximo a extremidade da tampa soldada. Um sensor de fim de curso do avanço da lâmina de corte ou de contagem de voltas, atua após o corte realizado, estando ajustado previamente pelos testes em protótipos, invertendo a rotação do cabeçote e retraindo as lâminas. Ao fim do retorno, o motor é parado e a abertura do sistema de fixação é liberada, para o acesso à cápsula.

Os circuitos elétricos são simples e estão instalados fora da *hot cell*, no painel de controle, bem como os botões de operação. Para o sistema de corte, teremos três cabos de alimentação do motor e um par de cabos para o contador de voltas ou para a chave de fim de curso. Para o sistema de fixação da cápsula, teremos o cabo de alimentação do servomotor (3 ou 4 vias) e um par de cabos da trava eletromagnética.

No caso da opção de uso de um motor de passo, é necessário incluir uma fonte de alimentação de corrente contínua e tensão compatível com o motor escolhido, que alimentará também a placa controladora do motor, ficando a placa e a fonte no painel de controle. A quantidade de cabos de alimentação do motor de passo dependerá do motor escolhido. A quantidade de voltas necessária para realizar o corte necessitará ser validada em testes, sendo que o número de passos por volta é característico de cada motor. O número de passos do avanço total, suficiente para realizar o corte, ficará programado na placa controladora do motor.

Sendo adotada a opção de fechamento da presilha por atuador pneumático, substitui-se o cabo de alimentação do servomotor pela mangueira de alimentação de ar pressurizado, e conseqüentemente, a alteração no painel de comando para a ativação do sistema pneumático, quando do acionamento do sistema de fixação.

Figura 49 – Diagrama da operação do dispositivo proposto.



## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi projetado um dispositivo para a abertura de cápsulas irradiadas no reator nuclear IEA-R1 do IPEN, atendendo as características específicas de operação dentro de uma *hot cell* e com cápsulas radioativas.

O dispositivo de abertura projetado não possui componentes semicondutores integrados, todos os componentes eletrônicos mais suscetíveis a danos por radiação estão no painel de controle externo à *hot cell*.

As dimensões das aberturas, recessos e movimentos dos sistemas do dispositivo, são suficientemente grandes para que as operações de inserção e retirada das cápsulas sejam feitas por pinças telemanipuladoras facilmente.

O método de corte, por lâmina de disco de corte não abrasiva, minimiza os detritos ao redor do dispositivo. As lâminas de disco são montadas no cabeçote de corte, e o mecanismo do cabeçote está posicionado acima da cápsula, evitando que detritos causem um mau funcionamento do dispositivo.

O dispositivo de abertura foi projetado com presilhas em forma de abas para fixar a cápsula durante a abertura, aumentando assim a segurança, principalmente quando são manipuladas amostras sensíveis.

O projeto apresenta um dispositivo com formato compacto, contendo poucas partes móveis, tendo construção aberta e acessível para fácil limpeza, e com poucos espaços possíveis de alojamento de pequenas fontes radioativas.

O método projetado para o avanço da lâmina de disco, com a baixa velocidade de rotação do cabeçote de corte e a imobilização da cápsula, garantem mais precisão, controle e segurança ao processo de abertura.

Os comandos de operação do dispositivo ficam em painel de comando externo à *hot cell*. A inserção e retirada da cápsula serão executadas pelo operador por meio de telemanipuladores. A fixação e abertura da cápsula são executadas, pelo operador, por meio do

acionamento de botões de comando no painel de controle do dispositivo de abertura de cápsulas.

O painel de controle possui um botão de parada de emergência, que interrompe o movimento do dispositivo em qualquer momento de sua operação, um botão que aciona o fechamento e travamento do sistema de fixação e um botão que aciona o cabeçote de corte.

O dispositivo proposto, fundamentado em sistemas comerciais de corte de tubos, possuirá baixo custo de fabricação e manutenção. Seu funcionamento foi baseado em dispositivos testados e operacionais na área nuclear, mantendo a simplicidade e aperfeiçoando a manutenção e limpeza, aprimoradas também pela menor produção de resíduos durante a abertura.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADELI, R.; SHIRMARDI, S. P.; ABBASI, H.; AHMADI, S. J. Effect of neutron irradiation on neat epoxy resin stability in shielding applications. ***Science and Engineering of Composite Materials***, v. 25, n. 4, p. 725–729, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Alumínio e suas ligas – Composição química***: norma. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. (ABNT NBR ISO 209:2010).
- ASM INTERNATIONAL. ***Properties and selection: non-ferrous alloys and special purpose materials***. USA, Handbook Committee, 1990. (ASM Handbook v. 2)
- COMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE. Michel Douis, Maisons-Alfort, Jean Godart, Clichy, Jacques Jouin, Chaville, Henri Laurent, Fontenay-aux-Roses, Michel Sougi. ***Devices for opening and handling from a distance a container, and in particular an irradiated tube***. US 3085327, 16 abr. 1963.
- CHISTOV, B. G. New device unpacks irradiated target. Russia. ***Soviet Atomic Energy***, v. 17, n. 5, p. 1175-1176, 1964. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF01116337>>. Acesso em: 25 maio 2021
- CHOO, K. N.; CHO, M. S.; YANG, S. W.; PARK, S. J. Contribution of HANARO irradiation technologies to national nuclear R&D. Coreia. ***Nuclear Engineering and Technology***, v. 46, n. 4, p. 501-512, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.5516/NET.07.2014.006>>. Acesso em: 25 maio 2021.
- COSTA, O. L. ***Estudo e desenvolvimento de uma nova metodologia de produção de iodo-125 a partir de xenônio-124 pelo método de ativação neutrônica***. 2015. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-23102015-094126/pt-br.php>>. Acesso em: 25 maio 2021.
- FLLAOUI, A.; GHAMAD, Y.; ZOUBIR, B.; AYAZ, Z. A.; EL MORABITI, A.; AMAYOUD, H.; CHAKIR, E. M. Validation of a new design of tellurium dioxide-irradiated target. Centre National de l'Energie des Sciences et des Techniques Nucléaires, Rabat, Morocco. ***Nuclear Engineering and Technology***, v. 48, n. 5, p. 1273-1279, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.net.2016.05.004>>. Acesso em: 25 maio 2021.
- HYPERTHERM: Sistemas de corte. Disponível em: <<https://www.hypertherm.com/pt/?region=SART>>. Acesso em: 25 maio 2021.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Manual for reactor produced radioisotopes**. Vienna, Austria: 2003. (IAEA-TECDOC-1340). Disponível em: <[https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te\\_1340\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1340_web.pdf)>. Acesso em 25 maio 2021.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. Centros de Pesquisa. Centro do Reator de Pesquisas. Disponível em: <[https://www.ipen.br/portal\\_por/portal/interna.php?secao\\_id=729](https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=729)>. Acesso em 25 maio 2021.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. Mapoteca da Oficina mecânica. Dispositivo de abertura de cápsulas [Desenho técnico]. São Paulo, 1989.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Radiation protection – Sealed Radioactive Sources – Leakage test methods**. Switzerland: 1992. (ISO 9978)

ISOTOPE Browser. IAEA Nuclear Data Section, para sistema operacional Android, versão 5.19.74. International Atomic Energy Agency, 2021. Disponível em: <[https://play.google.com/store/apps/details?id=iaea.nds.nuclides&hl=en\\_US&gl=US](https://play.google.com/store/apps/details?id=iaea.nds.nuclides&hl=en_US&gl=US)>. Acesso em: 25 maio 2021.

KALATEC AUTOMAÇÃO. Driver para motores de passo. Disponível em: <<https://www.kalatec.com.br/drivers-motores-de-passo>>. Acesso em: 25 maio 2021.

KEISCH, B. **The Atomic Fingerprint: Neutron Activation Analysis**. Washington, D. C.: USERDA, 1972.

KIM, H. M.; CHO, M. S.; KANG, K. H.; NA, S. H.; LEE, J. W.; PARK, C. J.; KIM, K. S. The development of xenon diffusivity measurement for irradiated ceramic fuels with low burnup. In: *HOT CELL POST-IRRADIATION EXAMINATION AND POOLSIDE INSPECTION OF NUCLEAR FUEL*, 23–27 maio, 2011, Smolenice, Slovakia. **Proceedings of the IAEA–HOTLAB**. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency. p. 241–248. (IAEA-TECDOC-CD-1693, 2013).

KUDO, H.; YAMABAYASHI, N.; IGUCHI, A.; SHIKATA, E. Research and development of <sup>99</sup>Mo production technology in Japan. In: *FISSION MOLYBDENUM FOR MEDICAL USE*, 13-16 out. 1987, Karlsruhe, Germany. **Proceedings of a technical committee meeting**. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency. p. 83–97. (IAEA-TECDOC-515, 1989).

LEONARD A. WRATE. **Power-driven hand-held tubing cutter**. US 6202307 B1, 20 mar. 2001.

LIDE, D. R. **CRC Handbook of Chemistry and Physics**. Boca Raton, FL: CRC, 2006.

NAKAJIMA SEISAKUSHO Co. Shigeji Nakajima. **Opener for irradiation capsule**. US 5342160, 30 ago. 1994.

NUCLEAR Data Services – International Atomic Energy Agency: banco de dados. Disponível em: < <https://www.nds.iaea.org/>>. Acesso em: 25 maio 2021.

PETRIE, C. M.; KOYANAGI, T.; MCDUFFEE, J. L.; DECK, C. P.; KATOH, Y.; TERRANI, K. A. Experimental design and analysis for irradiation of SiC/SiC composite tubes under a prototypic high heat flux. **Journal of Nuclear Materials**, v. 491, p. 94-104, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.04.058>>. Acesso em: 25 maio 2021.

SHARMA, V. K.; PANT, H. J.; GOSWAMI, S.; JAGADEESAN, K. C.; ANAND, S.; CHITRA, S.; RANA, Y. S.; SHARMA, A.; SINGH, T.; GUJAR, H. G.; DASH, A. Production of gaseous radiotracers for industrial applications. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 116, p. 110-119, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.07.011>>. Acesso em: 25 maio 2021.

SHEVEL, V. R. Development of the radioisotope production technologies at the WWR-M research reactor. **International Nuclear Safety Journal**, v. 3, n. 2, 2014.

SUTISNA. Thermal neutron flux mapping on a target capsule at rabbit facility of RSG-GAS reactor for use in  $k_0$ -INAA. **Journal of Nuclear Reactor Technology TRI DASA MEGA**, v. 15, n. 1, 2013. Disponível em: <<http://jurnal.batan.go.id/index.php/tridam/article/view/1871>>. Acesso em: 24 maio 2021.

TESLA POWER TOOLS. TC-2 Tube cutter. Disponível em: <<http://teslapowertools.com/index.html>>. Acesso em 22 maio 2021.

TRIMBLE. **SketchUp**: Software de projetos 3D. Versão 20.1.235 64-bit. Disponível em: <<https://www.sketchup.com/pt-BR>>. Acesso em: 21 jan. 2019.

WEG MOTORES S.A. W12 Motor elétrico monofásico e trifásico: catálogo técnico. Rev. 04, fev. 2021. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h2e/h40/WEG-W12-motor-eletrico-monofasico-e-trifasico-50084475-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso em: 25 maio 2021.

---

---

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino**  
**Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000**  
**Fone/Fax(0XX11) 3133-8908**  
**SÃO PAULO – São Paulo – Brasil**  
**<http://www.ipen.br>**

**O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.**

---

---