



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

**DESENVOLVIMENTO DO PROJETO ARQUITETÔNICO DE UMA UNIDADE  
MÓVEL DE IRRADIAÇÃO DO IPEN-CNEN/SP PARA O TRATAMENTO DE  
EFLUENTES INDUSTRIAIS**

**FABIANA DE FARIA LAINETTI**

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

**Orientador:  
Prof. Dr. Wilson Aparecido Parejo Calvo**

**#**

**#**

**São Paulo  
2019**

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

**DESENVOLVIMENTO DO PROJETO ARQUITETÔNICO DE UMA UNIDADE  
MÓVEL DE IRRADIAÇÃO DO IPEN-CNEN/SP PARA O TRATAMENTO DE  
EFLUENTES INDUSTRIAIS**

**Versão Corrigida**

**Versão Original disponível no IPEN**

**FABIANA DE FARIA LAINETTI**

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

**Orientador:  
Prof. Dr. Wilson Aparecido Parejo  
Calvo**

**#  
#**

**São Paulo  
2019**

Fonte de Financiamento: IPEN/CNEN-SP

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho,  
para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

Como citar:

LAINETTI, F. d. F. **DESENVOLVIMENTO DO PROJETO ARQUITETÔNICO DE UMA UNIDADE MÓVEL DE IRRADIAÇÃO DO IPEN-CNEN/SP PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS**. 2019. 64 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN/USP,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Lainetti, Fabiana de Faria  
DESENVOLVIMENTO DO PROJETO ARQUITETÔNICO DE UMA UNIDADE  
MÓVEL DE IRRADIAÇÃO DO IPEN-CNEN/SP PARA O TRATAMENTO DE  
EFLUENTES INDUSTRIAIS / Fabiana de Faria Lainetti; orientador  
Wilson Aparecido Parejo Calvo. -- São Paulo, 2019.  
64 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em  
Tecnologia Nuclear (Aplicações) -- Instituto de Pesquisas  
Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2019.

1. Acelerador móvel. 2. feixe de elétrons. 3. tratamento de  
águas residuárias. 4. Unidade Móvel. 5. IAEA TC Project  
BRA1035. I. Calvo, Wilson Aparecido Parejo, orient. II.  
Título.

Aos meus pais Elizabeth e Paulo,  
minha irmã Patrícia e minha avó Cecy  
pelo amor e incentivo.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Dr. Wilson Aparecido Parejo Calvo pela oportunidade, orientação, apoio, paciência e dedicação dada durante toda a Dissertação de Mestrado.

Ao Engenheiro Francisco Edmundo Sprenger pela ajuda, ensinamentos, pelas conversas e orientações, estando presente desde o início deste trabalho.

À Dra. Celina Lopes Duarte pelos conselhos, orientações e apoio.

Ao Dr. Samir Luiz Somessari e ao Dr. Anselmo Feher pelo apoio.

À Dra. Maria Helena de Oliveira Sampa e à Prof. Dra. Letícia L. C. Rodrigues pelas sugestões no desenvolvimento da dissertação.

À empresa e equipe da Truckvan Indústria e Comércio Ltda. pelo Acordo de Inovação, em especial ao Eng. Marcos Rodrigues.

À *International Irradiation Association (IIA)* pela oportunidade e apoio financeiro para participar do curso de *Radiation Processing for Advanced Materials* em Reims e da *International Meeting on Radiation Processing (IMRP 2019)* em Estrasburgo, ambos na França.

À Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) e à Financiadora de Inovação e Pesquisa (FINEP) pelo apoio financeiro na construção da Unidade Móvel de Irradiação.

À Élide M. O. Moreno e à Laurelisa Filomena Nolla do Gabinete da Superintendência do IPEN-CNEN/SP pelo apoio.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP) pela oportunidade de realização da Dissertação de Mestrado e apoio financeiro durante esse período.

À minha irmã Patrícia Lainetti, pelos conselhos, palavras de apoio, ajuda e carinho.

Aos meus pais, agradeço pelo incentivo, apoio e força que me deram no desenvolvimento desse trabalho. A vocês, obrigada por todo amor e dedicação.

À minha avó Cecy Brigagão de Faria, pelo apoio, carinho e companhia em muitos momentos durante a realização deste trabalho.

E a todos aqueles amigos e colegas que fizeram parte, contribuindo direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

## RESUMO

LAINETTI, F. F. **Desenvolvimento do projeto arquitetônico de uma unidade móvel de irradiação do IPEN-CNEN/SP para o tratamento de efluentes industriais**. 2019. 62 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP). São Paulo.

No mundo, há um aumento na demanda por água para consumo humano, bem como a priorização do uso de recursos hídricos disponíveis para abastecimento público. Nos países em desenvolvimento, como o Brasil, boa parte das águas residuais são despejadas sem tratamento em rios, lagos ou oceanos. Portanto, é necessário adotar estratégias que visem maximizar o uso dos recursos hídricos e minimizar os impactos negativos relacionados à geração de efluentes pelas indústrias. As necessidades de preservar o meio ambiente, bem como a busca pelo desenvolvimento sustentável, geraram várias ações de grupos não governamentais e mudanças na legislação em muitos países. Como consequência, restrições foram impostas quanto à liberação de efluentes no meio ambiente. O IPEN-CNEN/SP decidiu desenvolver e construir uma unidade de irradiação de feixe móvel para o tratamento de efluentes industriais. A unidade móvel terá como uma de suas principais vantagens a possibilidade de tratar os efluentes no local onde a fonte está localizada, eliminando custos e problemas burocráticos associados ao transporte de resíduos, além de divulgar a tecnologia em diversos locais no Brasil. Para implementar o projeto, o IPEN-CNEN/SP vem consolidando parcerias com empresas nacionais e internacionais. Os recursos para o desenvolvimento da unidade foram fornecidos pela Agência Brasileira de Inovação (FINEP) e pela Agência Internacional de Energia Atômica, financiando o Projeto Nacional da *IAEA TC Project BRA1035 - Mobile electron beam accelerator to treat and recycle industrial effluents*. O layout foi discutido com o objetivo de facilitar a manutenção do equipamento; o bem-estar e ergonomia dos operadores; otimização do espaçamento e também compatibilizar a necessidade da presença de equipamentos e espaço para os operadores.

Palavras-chave: Acelerador móvel, feixe de elétrons, efluentes industriais, *IAEA TC Project BRA1035*, tratamento de águas residuárias.

## ABSTRACT

LAINETTI, F. F. **Development of the architectural design of a mobile electron beam accelerator unit of IPEN-CNEN/SP for the treatment of industrial effluents.** 2019. 62 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP). São Paulo.

In the world, there is an increase in the demand for water for human consumption, as well as the prioritization of the use of available water resources for public supply. In developing countries, such as Brazil, much of the wastewater is dumped untreated into rivers, lakes or oceans. Therefore, it is necessary to adopt strategies that aim to maximize the use of water resources and minimize the negative impacts related to the generation of effluents by the industries. The needs to preserve the environment as well as the quest for sustainable development have generated various actions by non-governmental groups and changes in legislation in many countries. As a consequence, restrictions have been imposed regarding the release of effluents into the environment. The IPEN-CNEN/SP decided to develop and build a mobile beam irradiation unit for the treatment of industrial effluents. The mobile unit will have as one of its main advantages the possibility of treating effluents in the place where the source is located, eliminating costs and bureaucratic problems associated with the transportation of waste, besides publicizing the technology in several places in Brazil. To implement the project, IPEN-CNEN/SP has been consolidating partnerships with national and international companies. The resources for the development of the unit have been supplied by the Brazilian Innovation Agency (FINEP) and International Atomic Energy Agency, financing the IAEA TC Project BRA1035 – Mobile electron beam accelerator to treat and recycle industrial effluents. The layout has been discussed with the objective of facilitating the maintenance of the equipment; the well-being and ergonomics of operators; optimization of spacing and also to make compatible the need for the presence of equipment and space for operators.

Keywords: Mobile accelerator, electron beam, industrial effluents, IAEA TC Project BRA1035, wastewater treatment.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Acelerador de elétrons e tubo de raios catódicos (TV).....	7
<b>Figura 2</b> - (a) Imagem de raios-X de um caminhão que passou através do portal de inspeção; (b) Esquema de escaneamento de cargas de alta densidade.....	9
<b>Figura 3</b> - Sistema de tratamento de águas residuais por feixe de elétrons.....	10
<b>Figura 4</b> - Diagrama esquemático do dispositivo que permite uma uniformização da espessura da camada irradiada.....	11
<b>Figura 5</b> - Carreta projetada pela <i>High Voltage Environmental Applications Inc.</i> para a unidade móvel de tratamento de efluentes por feixe de elétrons na Universidade de Miami.....	12
<b>Figura 6</b> - Unidade móvel de tratamento de efluentes com feixe de elétrons da Eb-Tech Co., Ltd.....	13
<b>Figura 7</b> - Corte longitudinal da Unidade móvel da <i>E-ventus®</i> para o tratamento de sementes.....	13
<b>Figura 8</b> - Unidade móvel da <i>E-ventus®</i> já construída .....	14
<b>Figura 9</b> - Unidade móvel de tratamento de água da República da Coreia.....	21
<b>Figura 10</b> - Estudo dos volumes – Imagem 3D com a distribuição dos equipamentos na unidade móvel de irradiação por feixe de elétrons.....	23
<b>Figura 11</b> - Comunicação Visual - Estudo preliminar da parte externa da unidade móvel.....	24
<b>Figura 12</b> - Desenhos com as vistas laterais e superior dos equipamentos adquiridos pelo IPEN-CNEN/SP: Chiller, painel de distribuição elétrico e transformador.....	26
<b>Figura 13</b> - Representação gráfica dos equipamentos de análise laboratorial (GC/MS, TOC e UV-Vis) que serão instalados na unidade móvel.....	27
<b>Figura 14</b> - Planta da unidade móvel de irradiação destacando-se os módulos que compõe o caminhão (baú): (a) Sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica; e (b) Sistema de tratamento de efluentes industriais.....	28



<b>Figura 15</b> - Corte AA na unidade móvel de irradiação por feixe de elétrons da Figura 12.....	29
<b>Figura 16</b> - Opções de estudos do <i>layout</i> da sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica - <i>layout 1</i> .....	30
<b>Figura 17</b> - Opções de estudos do <i>layout</i> da sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica - <i>layout 2</i> .....	30
<b>Figura 18</b> - Opções de estudos do <i>layout</i> da sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica - <i>layout 3</i> .....	31
<b>Figura 19</b> - <i>Layout</i> aprovado para a execução.....	31
<b>Figura 20</b> - Cilindros dos gases exigidos para o funcionamento dos equipamentos analíticos que foram instalados na parte interna da bancada.....	34
<b>Figura 21</b> - Planta baixa da unidade móvel do IPEN-CNEN/SP com o <i>layout</i> final da sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica.....	35
<b>Figura 22</b> - Corte AA da unidade móvel do IPEN-CNEN/SP com o <i>layout</i> final da sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica.....	36
<b>Figura 23</b> - Corte BB da unidade móvel do IPEN-CNEN/SP com o <i>layout</i> final da sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica.....	37
<b>Figura 24</b> - Imagens 3D do interior da sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica, da unidade móvel de irradiação.....	38
<b>Figura 25</b> - Confeção da estrutura metálica (chassi) da unidade móvel pela empresa Truckvan Indústria e Comércio Ltda.....	40
<b>Figura 26</b> - Unidade móvel com a vedação externa em chapas lisas de alumínio..	41
<b>Figura 27</b> - Chapa de duralumínio xadrez antiderrapantes, utilizada na montagem do piso interno da unidade móvel de irradiação.....	42
<b>Figura 28</b> - Tipos de materiais que podem ser utilizados para isolamento térmico da unidade móvel: (a) Placas de poliuretano; e (b) Lã de rocha.....	43
<b>Figura 29</b> - Porta aviônica com escadas incorporadas.....	44
<b>Figura 30</b> - Imagens em 3D e vista lateral da unidade móvel com estudos para a identidade visual (opção 1).....	45

<b>Figura 31</b> - Imagens em 3D e vista lateral da unidade móvel com estudos para a identidade visual (opção 2).....	45
<b>Figura 32</b> - Imagens em 3D e vista lateral da unidade móvel com estudos para a identidade visual (opção 3).....	46
<b>Figura 33</b> - Imagens em 3D e vista lateral da unidade móvel com estudos para a identidade visual (opção 4).....	46
<b>Figura 34</b> - Imagens em 3D e vista lateral da unidade móvel com estudos para a identidade visual (opção 5).....	46
<b>Figura 35</b> - Proposta de adesivagem inserida nas fachadas da unidade móvel.....	47
<b>Figura 36</b> - Arte final para adesivagem da unidade móvel do IPEN-CNEN/SP.....	48
<b>Figura 37</b> - Imagem 3D da Unidade Móvel com a arte final da comunicação visual.....	49
<b>Figura 38</b> - Fotos da Unidade móvel do IPEN-CNEN/SP com a adesivagem aplicada.....	50
<b>Figura 39</b> - Foto da unidade móvel com destaque das instituições e parceiras do IPEN-CNEN/SP no projeto da unidade móvel.....	51
<b>Figura 40</b> - Imagem do Prêmio <i>Nuclear Technologies for Better Life</i> conquistado pelo IPEN-CNEN/SP e concedido pela Rosatom.....	53

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 1** - Quantidades de energia, capacidade de tratamento e custos por tipo de efluente tratado na Unidade Móvel.....18

**Tabela 2** - Características da Unidade Móvel de Irradiação do IPEN-CNEN/SP....19

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
	3.1 Aceleradores de elétrons.....	6
	3.2 Aplicações.....	8
	3.3 Tratamento de efluentes com Radiação ionizante.....	9
	3.4 Radiólise da água.....	9
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>12</b>
	4.1 Unidades Móveis de Irradiação.....	12
	4.2 Benefícios na utilização de unidade móvel .....	14
	4.3 Leis que proíbem o lançamento ou liberação de poluentes.....	14
	4.4 Leis que restringem o transporte de resíduos.....	15
	4.5 Divulgação da tecnologia.....	16
	4.6 Desenvolvimento da unidade móvel do IPEN-CNEN/SP.....	16
	4.6.1 Funcionamento e custos da Unidade Móvel	
	4.6.2 Definição do tamanho da carroceria da Unidade Móvel do IPEN-CNEN/SP	
	4.6.3 Características gerais Unidade Móvel	
	4.6.4 Segurança Radiológica	
	4.6.5 Acelerador de elétrons da unidade móvel	
	4.6.6 Sistema de circulação do efluente líquido	
<b>5</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>22</b>
	5.1 Estudos preliminares para o desenvolvimento da unidade móvel.....	22
	5.1.1 Distribuição Espacial dos Ambientes – Estudo volumétrico	
	5.1.2 Modelagem em 3D	
	5.1.3 Levantamento das dimensões dos equipamentos que foram e ainda serão instalados na unidade móvel	

5.1.4	Equipamentos já adquiridos pelo IPEN-CNEN/SP	
5.1.5	Equipamentos ainda não adquiridos até a data de entrega desse trabalho	
5.1.6	Estudos para distribuição do <i>layout</i> interno da sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica	
5.1.7	Modificações ocorridas no andamento do projeto	
5.1.8	<i>Layout</i> final da unidade móvel com as alterações efetuadas	
5.1.9	Imagens 3D do interior da sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica	
<b>5.2</b>	<b>Construção da unidade móvel do IPEN-CNEN/SP.....</b>	<b>39</b>
5.2.1	Estrutura   Chassi	
5.2.2	Baú   Revestimentos externos	
5.2.3	Acessos da unidade móvel	
5.2.4	Baú   Revestimentos internos	
5.2.5	Adesivagem   Comunicação visual	
<b>5.3</b>	<b>Trabalhos e prêmios internacionais relacionados ao desenvolvimento do projeto.....</b>	<b>52</b>
5.3.1	Trabalho em congresso internacional	
5.3.2	Prêmio internacional	
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>54</b>
	<b>TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>56</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>57</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>62</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Na sociedade moderna, questões como sustentabilidade e a necessidade de preservação do meio ambiente são temas de extrema importância. A consciência ambiental desempenha um papel fundamental no desenvolvimento da cidadania. Cada vez mais, as pessoas avaliam seus comportamentos em sociedade e como eles se refletem na conservação do nosso ecossistema.

Com o aumento da população mundial, principalmente nas grandes cidades, e a crescente industrialização em muitos países, a quantidade de poluição no meio ambiente está aumentando. A contaminação das águas superficiais e dos lençóis freáticos por efluentes industriais e atividades humanas é um sério problema em muitos países [1].

Segundo o relatório de 2010 da *United Nations Environment Programme (UNEP)*, no mundo são despejados dois milhões de toneladas de esgoto, industrial e resíduos agrícolas nos cursos d'água por ano. Em países em desenvolvimento, como o Brasil, cerca de 90% das águas residuais são despejadas sem tratamento em rios, lagos ou oceanos. A exposição da água a esgotos domésticos e efluentes contaminados coloca em perigo a saúde da população e gera riscos para nossos ecossistemas, pela possibilidade de contato ou ingestão de água contaminada com organismos infecciosos como bactérias, vírus, protozoários entre outros. *“Mais da metade das camas de hospitais do mundo estão ocupadas com pessoas que sofrem de doenças ligadas à água contaminada e mais pessoas são mortas em decorrência de águas poluídas do que em todas as formas de violência, incluindo as guerras”* [2].

Considerando a limitação das reservas de água doce no planeta, o crescente aumento pela demanda de água para consumo humano, a prioridade de utilização dos recursos hídricos disponíveis para abastecimento público, assim como as restrições que vêm sendo impostas com relação à liberação de efluentes para o meio ambiente, torna-se necessária a adoção de estratégias que visem maximizar a utilização dos recursos hídricos e minimizar os impactos negativos relativos à geração de efluentes pelas indústrias [3].

O tratamento de efluentes líquidos industriais é uma questão ambiental importante, tanto no âmbito da pesquisa e de aplicações tecnológicas quanto no da legislação e prevenção à poluição. No Brasil, a falta de tratamento dos resíduos, ou o tratamento incorreto, pode levar a aplicação de multas pelos órgãos ambientais responsáveis.

Com base nas considerações anteriores, o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP), projetou, desenvolveu e construiu uma unidade móvel de irradiação com feixe de elétrons para o tratamento de efluentes industriais. A unidade móvel tem como uma das suas principais vantagens a possibilidade de tratar efluentes no próprio local onde se encontra a fonte geradora, eliminando-se custos e problemas legais associados ao transporte de resíduos, além de divulgar a tecnologia em diversos locais do Brasil. O objetivo do uso de feixe de elétrons no tratamento de efluentes industriais é degradar os compostos orgânicos, diminuindo os impactos ambientais. A velocidade do processo de tratamento é maior se comparada aos métodos tradicionais de tratamento, gerando melhor custo-benefício no tratamento de grandes volumes de efluentes [21].

Para execução do projeto, o IPEN-CNEN/SP vem consolidando parcerias com empresas nacionais (SABESP e PETROBRAS) e a empresa sul coreana Eb-Tech Co., Ltd. que atua no campo de aplicação de feixes de elétrons, envolvendo-se em atividades avançadas de pesquisa e desenvolvimento. O IPEN-CNEN/SP também contou com a colaboração do SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. Os recursos financeiros para o desenvolvimento da unidade foram obtidos de uma ação conjunta entre a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), que financia o *“IAEA TC Project BRA1013 - Mobile electron beam accelerator to treat and recycle industrial effluents”*, no período de 2016 a 2019 e a FINEP, que financia o “Processo n.º 01.18.0073.00 - Implementação de unidades móveis visando disponibilizar a tecnologia gerada no IPEN-CNEN/SP para o Setor Produtivo e a Sociedade”. A Nuclebrás Equipamentos Pesados (NUCLEP) e a Truckvan Indústria e Comércio Ltda. também participam desse projeto. A NUCLEP será responsável pela confecção e instalação da blindagem radiológica para a unidade móvel. Já a Truckvan desenvolve o projeto por meio de Acordo de Inovação Tecnológica com a equipe do IPEN-CNEN/SP.

A unidade móvel de irradiação é formada por uma carreta, cujo compartimento de carga comporta todos os equipamentos necessários para o tratamento de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos por feixe de elétrons. O projeto idealizado prevê a divisão do compartimento em módulos com os respectivos equipamentos. Isso possibilita a troca da “janela” de irradiação, permitindo, assim, tratar outros tipos de materiais/elementos.

O estudo arquitetônico proposto neste trabalho irá contribuir com desenvolvimento do projeto da unidade móvel, buscando melhores soluções construtivas e aproveitamento dos espaços, além de explorar a aplicação de materiais e revestimentos mais adequados, para possíveis aplicações nas indústrias.



## 2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi desenvolver o projeto arquitetônico da unidade móvel de irradiação por feixe de elétrons no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP) em parceria com a experiência de mercado da empresa Truckvan, além de estudar o *layout* interno da unidade móvel, abordando as características construtivas, os materiais utilizados na construção e os equipamentos especificados que serão instalados e utilizados para o tratamento de efluentes industriais e análise de amostras.

Inclui-se a elaboração do memorial descritivo do projeto, os conceitos utilizados, as normas e premissas adotadas, bem como a descrição dos materiais que são utilizados. Além disso, apresenta-se o memorial justificativo, demonstrando a necessidade da execução do projeto arquitetônico e da adoção de determinadas características em detrimento de outras. Ou seja, explica o motivo da utilização de certos materiais, da escolha de determinadas dimensões e concepções/formas/distribuição dos espaços/traçados do projeto. Realiza-se uma análise crítica das soluções apresentadas, levando-se em conta não só as características do estado da arte desse tipo de instalação, mas também as limitações impostas pela segurança, pelos equipamentos e pelo espaço físico.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A nova postura global quanto à necessidade de preservação do meio ambiente e a busca pelo desenvolvimento sustentável têm gerado diversas ações de grupos governamentais e não governamentais além de mudanças nas leis de muitos países. Atualmente, diversas tecnologias são utilizadas no tratamento de efluentes industriais para recuperação e reutilização dessas águas.

Fornecer recursos para o acesso à água limpa é um dos mais importantes objetivos das Nações Unidas. A contaminação da água superficial é um grande problema para muitos países. Os principais geradores de águas residuais poluídas são os municípios e as indústrias. Existem métodos efetivos para o tratamento biológico de águas residuais, porém eles não podem ser aplicados para tratar todos os tipos de poluentes. Por exemplo, os compostos orgânicos não biodegradáveis e contaminação biológica, causada por vírus, bactérias, parasitas entre outros [1].

As águas residuárias industriais podem conter uma variedade de produtos químicos, incluindo pesticidas, materiais orgânicos, produtos químicos e tintas. Esses podem ser prejudiciais à saúde e, em alguns casos, muito tóxicos. Antes da liberação dessa água, ou reutilização, ela deve ser tratada buscando eliminar ou minimizar a quantidade de contaminantes, para assim, evitar a contaminação de recursos hídricos superficiais e subterrâneos [5].

O tratamento de efluentes industriais, por parte das empresas, é uma prática que vem se difundido, tanto pela necessidade de atendimento à legislação, cada vez mais restritiva, como também pelo impacto positivo na imagem pública do empreendimento, por meio das iniciativas de combate à poluição. Cabe destacar que também há vantagens econômicas, uma vez que a água obtida do tratamento dos efluentes pode ser reutilizada nos próprios processos das empresas [5].

A radiação ionizante, por meio de feixe de elétrons de média e alta energias, pode ser utilizada de forma efetiva para o tratamento de águas residuais, destruindo compostos orgânicos e biológicos, minimizando os contaminantes e removendo as cores e odores indesejáveis. Diferentes tipos de contaminantes precisam de diferentes métodos de tratamento. A utilização da radiação, combinada com outros

métodos, pode eliminar alguns contaminantes e decompor mais facilmente a matéria orgânica (facilitando o tratamento), necessitando de menos produtos químicos e diminuindo os poluentes secundários [5].

Em 1992, iniciaram-se os primeiros trabalhos com a aplicação de radiação ionizante para desinfecção de esgotos domésticos e lodos, e degradação de tricloroetileno (TCE) e percloroetileno (PCE), em água potável, do programa de pesquisa no IPEN-CNEN/SP. Em 1993, finalizou-se a construção de uma planta piloto, projetada para tratar cerca de  $3\text{m}^3/\text{h}$  de efluentes líquidos por feixe de elétrons (1,5 MeV e 25 mA), no atual Centro de Tecnologia das Radiações do Instituto [6].

O equipamento responsável pela emissão dos elétrons é o acelerador industrial de elétrons, também conhecido pela sigla em Inglês EBA (*Electron Beam Accelerator*). O processo de tratamento de resíduos líquidos, sólidos e gasosos por meio da utilização dos aceleradores de elétrons não é utilizado na prática, em escala comercial no Brasil, em função de diversos fatores dentre eles: a falta de difusão da tecnologia, de produtores nacionais do equipamento, de mão de obra especializada em operação e manutenção de aceleradores industriais de elétrons, o alto capital inicial de investimento e a falta de infraestrutura nas indústrias para suportar um equipamento nas dimensões requeridas, além da necessidade de se atender aos requisitos de licenciamento e controle de operação da instalação radiativa, junto à CNEN.

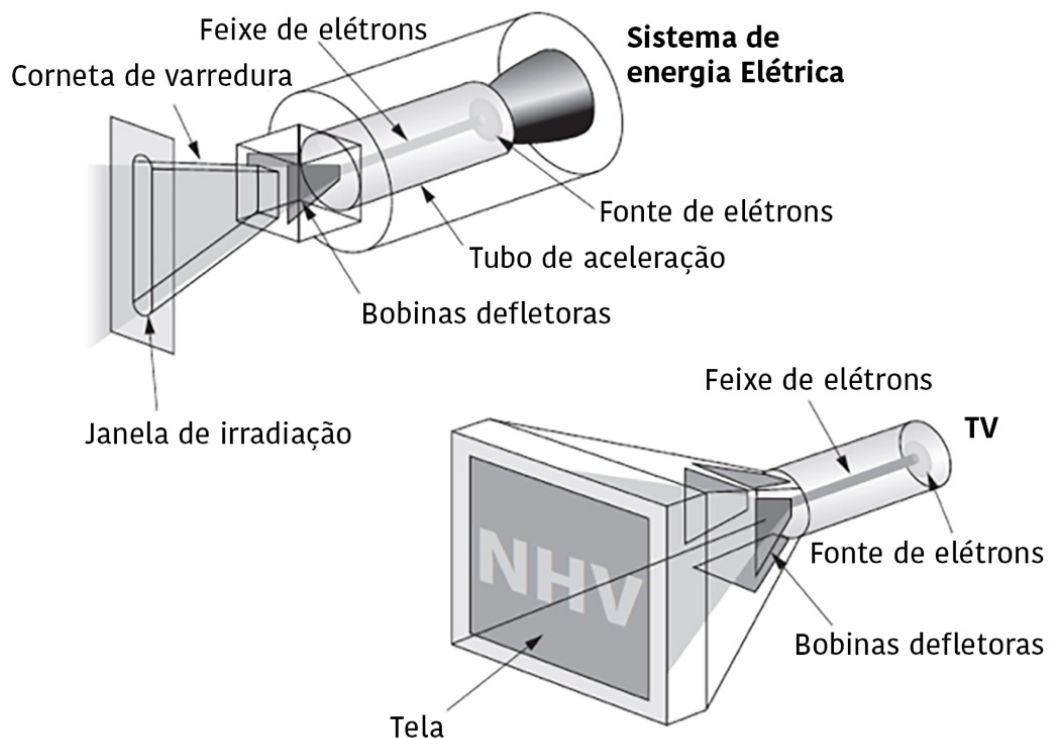
### 3.1 Aceleradores de Elétrons

Na década de 1930, no laboratório Cavendish da Universidade de Cambridge, Inglaterra, John D. Cockcroft e Ernest Thomas S. Walton, colaboradores de Rutherford, desenvolveram o primeiro acelerador de partículas para estudar os efeitos gerados pela colisão das partículas aceleradas em diferentes materiais. Esse acelerador, conhecido como *Cockcroft and Walton's Voltage Multiplier*, realizou a primeira desintegração nuclear artificial da história (reação nuclear induzida artificialmente) [7].

Os aceleradores de partículas são equipamentos que impulsionam partículas carregadas através de campos eletromagnéticos. Quando se estabelece um potencial de alta voltagem entre o cátodo e o ânodo, no vácuo, o cátodo emite um

feixe de elétrons, conhecido como raios catódicos ou feixes eletrônicos, com uma energia na ordem de milhões de Volts. Os aceleradores industriais de elétrons funcionam de forma semelhante aos aparelhos de televisão tradicionais com tubo de raios catódicos. Em ambos, os elétrons são acelerados por uma diferença de potencial elétrico. Depois sofrem desvio por um campo magnético, que os orientam. No caso da televisão, os elétrons atingem a tela e geram a imagem e, nos aceleradores industriais, eles atravessam a janela de irradiação (folha metálica, normalmente de titânio, forte para suportar a pressão atmosférica e fina o suficiente para permitir a passagem do feixe de elétrons), que separa o sistema em vácuo do material a ser irradiado, como pode ser observado na Figura 1 [8].

Figura 1. Acelerador de elétrons e tubo de raios catódicos (TV).



Fonte: [8] KASHIWAGI, M.; HOSHI, Y. *Electron beam Processing System and Its Application. Sei Technical Review, number 75, 2012.*

### 3.2 Aplicações

Os aceleradores de partículas são ferramentas essenciais para a Ciência e Tecnologia modernas. Os feixes de partículas são utilizados para muitos tipos de pesquisas; para uso médico e diversas aplicações industriais. A física nuclear, por exemplo, utiliza a energia dos feixes para estudar as propriedades internas dos núcleos dos átomos e o que acontece quando os núcleos interagem, podendo resultar na produção de isótopos que não são encontrados na natureza [9,10].

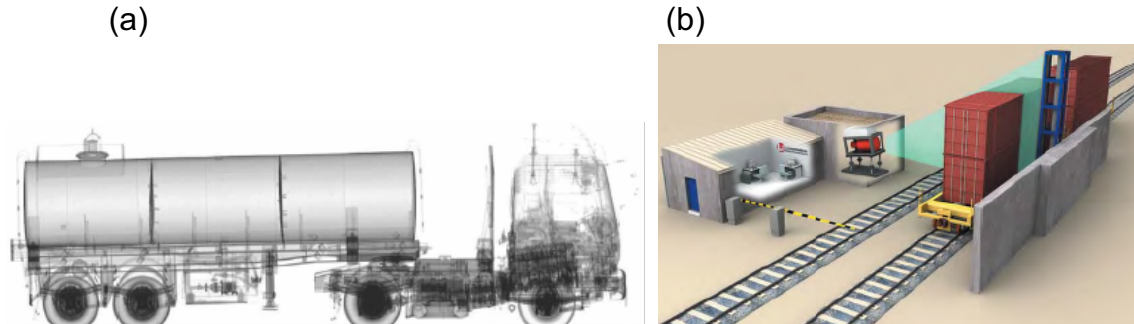
No mundo inteiro, hospitais e médicos utilizam aceleradores cíclotrons, que produzem diferentes tipos de radioisótopos, para o diagnóstico e tratamento de doenças. Muitos aceleradores de elétrons para uso médico produzem radiação para atacar diretamente as células cancerígenas. Além disso, os feixes de elétrons podem ser utilizados para reduzir a carga microbiana em plaquetas sanguíneas humanas e enxertos de pele. Também são utilizados para radioesterilizar produtos, incluindo os de uso médico, de forma eficaz e rápida [9].

Outra aplicação é na indústria de alimentos. Os feixes de elétrons ou raios X podem matar bactérias patogênicas, tais como *Escherichia coli*, Salmonela e Listeria; eliminar insetos e retardar o processo germinativo em produtos vegetais, aumentando a sua vida de prateleira. Porém, mesmo a irradiação de alimentos sendo segura e não modificando o valor nutricional, qualidade ou gosto dos produtos, sua aceitação por parte do consumidor é lenta [9].

Eles também são utilizados em sistemas de segurança, gerando raios X e imagens de diferentes tipos de materiais para a inspeção de cargas densas, como pode ser observado na Figura 2 [9].

Além disso, os aceleradores industriais de elétrons podem ser utilizados na modificação de polímeros (tais como os fios e cabos elétricos que são irradiados no IPEN-CNEN/SP) e outros materiais, na indústria eletrônica e na preservação do meio ambiente, no tratamento de gases tóxicos de combustão, lodos e águas residuais [10].

Figura 2. (a) Imagem de raios X de um caminhão que passou através do portal de inspeção; (b) Esquema de escaneamento de cargas de alta densidade.



Fonte: [9] *APS Accelerators and Beams - Tools of Discovery and Innovation*. Published by the Division of Physics of Beams of the American Physical Society. 4<sup>th</sup> Edition, 2013.

### 3.3 Tratamento de Efluentes com Radiação Ionizante

O método de tratamento de efluentes baseia-se na radiação ionizante, gerada nos aceleradores de elétrons, que interage com a água e seus poluentes de maneira a promover a degradação de compostos orgânicos, redução de coloração e desinfecção.

A aplicação da radiação ionizante destina-se ao tratamento de resíduos sólido, líquidos e/ou gasosos, numa taxa mais rápida do que as técnicas de tratamentos convencionais. A água não é normalmente reativa, porém quando submetida à radiação ionizante, produz espécies altamente reativas. Os elétrons de alta energia, produzidos nos aceleradores, ao entrarem em contato com a água poluída desaceleram, perdendo energia, e reagem com a água produzindo espécies reativas como elétrons hidratados, radicais hidroxila e átomos de hidrogênio. Esses radicais de vida curta geram reações de oxidação e redução [11].

### 3.4 Radiólise da Água

A irradiação de alta energia produz transformação radiolítica instantânea através da transferência de elétrons acelerados para os elétrons orbitais das moléculas de água. A energia absorvida afeta o sistema de elétrons da molécula que resulta na

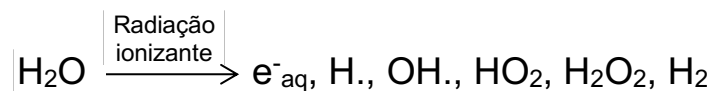
quebra de ligações interatômicas, Figura 3. Quando um feixe de elétrons de alta energia interage com a água, aproximadamente 50% da energia do feixe de elétrons ionizam as moléculas de água, aproximadamente, formando  $\text{H}_2\text{O}^+$ . Os outros 50% excitam as moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$  [11,12].

Figura 3. Sistema de tratamento de águas residuais por feixe de elétrons.



Fonte: *EB-Tech Co. Ltd. Environment System.*

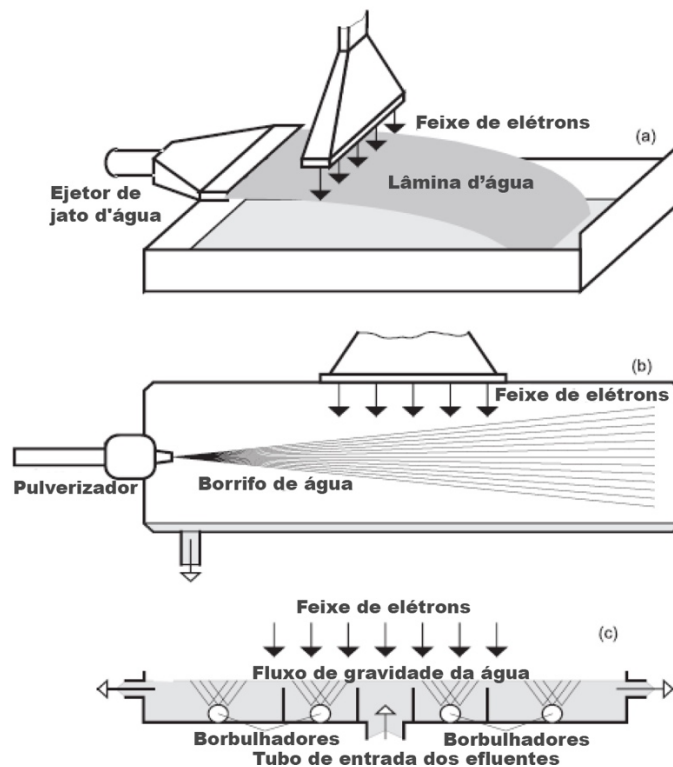
A radiólise produz inicialmente elétrons hidratados ( $e^-_{aq}$ ), átomos de hidrogênio (H.), OH. e radicais  $\text{HO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  e  $\text{H}_2$ , representados na reação [12]:



Para assegurar a eficácia do tratamento com feixe de elétrons, o sistema deve distribuir a dose uniformemente ao longo da janela de exposição. Por outro lado, a

espessura de efluente deve ser uniforme, durante a exposição aos feixes de elétrons, para garantir a eficácia do tratamento. Existem diferentes tipos de dispositivos para a distribuição de águas residuárias, que permitem a uniformização da espessura da camada irradiada e aumentam a zona de interação. Três esquemas diferentes são mostrados na Figura 4 [12].

Figura 4. Esquema dos diferentes dispositivos para a distribuição de águas residuárias, que permitam a uniformização da espessura da camada irradiada e aumentam a zona de interação.



Fonte: [12] HANNA, S. M. Examples of Radiation Wastewater Treatment Implemented in Various Countries. *Twelfth International Water Technology Conference, IWTC12 2008 Alexandria, Egp.*

O dispositivo apropriado para cada tratamento das águas residuárias vai depender da faixa de penetração de elétrons acelerados [13].

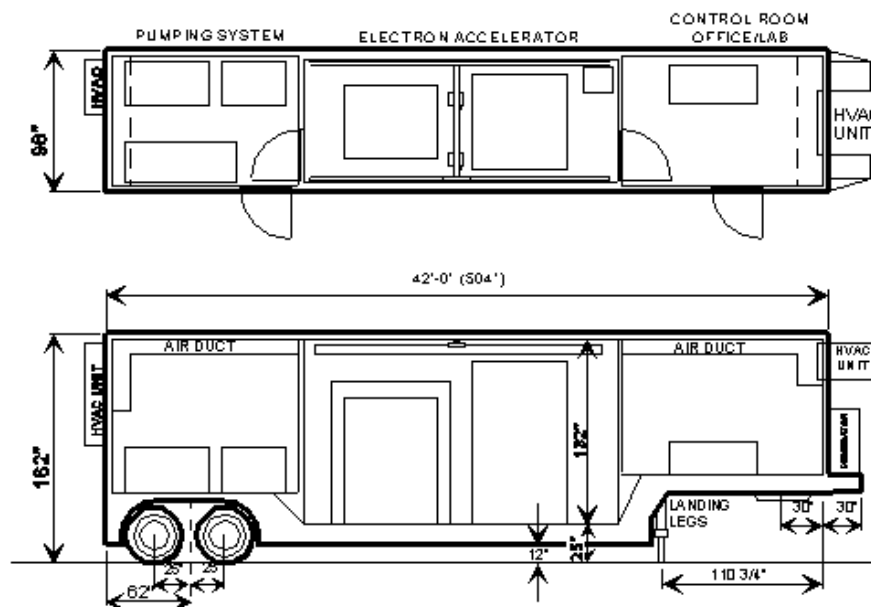


## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Unidades Móveis de Irradiação

Um das primeiras unidades móveis de irradiação por feixe de elétrons foi construída nos EUA, na década de 90, por pesquisadores da Universidade de Miami, na Flórida. O acelerador foi desenvolvido em parceria com a empresa *High Voltage Environmental Applications Inc.* e possuía 500 keV de energia e 20 kW de potência. A planta com a distribuição dos espaços da unidade é apresentada na Figura 5 [14].

Figura 5. Carreta projetada pela *High Voltage Environmental Applications Inc.* para a unidade móvel de tratamento de efluentes por feixe de elétrons da Universidade de Miami.



Fonte: [15] *High Voltage Environmental Applications, Inc.*

Atualmente, países como EUA, China, Alemanha, República da Coreia entre outros apresentam indústrias e institutos que adotaram o uso de unidades móveis de irradiação. Um exemplo é a Eb-Tech Co., Ltd. na Coreia do Sul que construiu uma unidade móvel para o tratamento de efluentes com feixes de elétrons. Na Figura 6 é apresentada a unidade móvel de tratamento de efluentes com feixe de elétrons da Eb-Tech Co., Ltd. [44].

Figura 6. Unidade móvel de tratamento de efluentes com feixe de elétrons da Eb-Tech Co., Ltd.



Fonte: [44] HAN, B. *Aplication of E-BEAM in Korea and Far East Asia*. In: *NICSTAR 2015*. Março, Mumbai, Índia, 2015. Disponível em: <[http://iiaglobal.com/uploads/documents/S3.37%20Bums oo%20Han%20\(EB%20Tech\).pdf](http://iiaglobal.com/uploads/documents/S3.37%20Bums oo%20Han%20(EB%20Tech).pdf)> Acesso em: 08 set. 2019.

Outro exemplo de empresa que utiliza unidade móvel é a alemã EVONTA, especializada em tratamento de sementes e, junto com o Instituto Fraunhofer, desenvolveram unidades móveis de irradiação com aceleradores de elétrons. O tratamento oferece um meio rápido, seguro e ecológico de se livrar dos patógenos das plantas utilizando feixe de elétrons. O processo de tratamento de sementes é conhecido pela marca *E-ventus®* que produz e comercializa sementes, e o Instituto Fraunhofer projeta, constrói e comercializa aceleradores de elétrons, como solução para prolongar a vida útil e qualidade das sementes, por meio da desinfecção superficial por irradiação direta. Na Figura 7 está representado o corte longitudinal esquemático da unidade móvel da *E-ventus®* onde é possível visualizar a sala de controle do lado direito e na parte central o acelerador de elétrons para o tratamento das sementes. Na Figura 8 é apresentada a Unidade móvel da *E-ventus®* já construída.

Figura 7. Corte longitudinal da Unidade móvel da *E-ventus®* para o tratamento de sementes.



Fonte: [40] *FraunhoferInstitut FEP and Schimdt-Seeager AG. E-ventusPureInnovation*. Disponível em: <<http://www.e-ventus.de/Anlagen/451/>>. Acesso em: 13 mai. 2019.

Figura 8. Unidade móvel da *E-ventus®*.



Fonte: [40] FraunhoferInstitut FEP and Schimdt-Seeger AG. E-ventusPureInnovation. Disponível em: <<http://www.e-ventus.de/Anlagen/451/>>. Acesso em: 13 mai. 2019.

## 4.2 Benefícios na utilização de unidade móvel

Seja para o tratamento de efluentes, de sementes ou para outras utilizações, talvez a maior vantagem que a unidade móvel apresenta seja a possibilidade de tratar os efluentes industriais no local onde eles são gerados, evitando os custos e problemas legais relacionados com o transporte de resíduos. E evitando principalmente que efluentes industriais sejam lançados em córregos e rios sem o devido tratamento, que além de ser um crime ambiental, é altamente prejudicial para o meio ambiente e para a saúde pública [16].

## 4.3 Leis que proíbem o lançamento ou liberação de poluentes

O tratamento dos efluentes pelas indústrias/empresas geradoras é uma questão de lei. A Constituição Federal, no artigo 225, § 3º, prevê que todas as “condutas e atividades lesivas ao meio ambiente sujeitarão os infratores, pessoas físicas ou jurídicas, a sanções penais e administrativas, independentemente da obrigação de reparar os danos causados”. Existe também a Lei 9605/98 que estabelece a responsabilização criminal da pessoa jurídica e das pessoas físicas, autoras e coautoras do mesmo fato [17].

Com o assunto da sustentabilidade cada vez mais marcando presença em discussões de natureza política, social e empresarial, não se pode excluir outro elemento importante deste contexto: o público/consumidor.

Um novo modelo de consumidor surgiu e começou a questionar e exigir mudanças das empresas/indústrias no que se refere a preservação do meio ambiente e as atitudes dela na busca pela redução dos seus impactos na natureza.

Esse novo tipo de consumidor só tende a crescer e eles valorizam as empresas sustentáveis. Vale destacar também que o tratamento de resíduos/efluentes por empresas é um importante passo na obtenção de certificados e selos ambientais de relevância no meio empresarial e são bem vistos por instituições, investidores e programas internacionais de injeção de recursos [16].

#### **4.4 Leis que restringem o transporte de resíduos**

A preocupação com os efluentes industriais é grande, pois eles podem conter altas concentrações de óleo, graxa, metais pesados, compostos orgânicos voláteis, amônia entre outros. Por esse motivo, a maneira como os efluentes industriais são coletados e transportados precisam atender à várias normas para que o processo ocorra de forma mais correta e segura possível.

Para que uma empresa colete, transporte e trate os efluentes primeiro ela precisa estar em situação regular e possuir as licenças no IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis), INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial), entre outras e no caso do Estado de São Paulo, também na CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo).

Para fazer o transporte do efluente do local onde ele é gerado para o onde ele será tratado é necessário um documento de autorização chamado CADRI (Certificado de Movimentação de Resíduos de Interesse Ambiental) [18]. E esse transporte ainda precisa ser feito em veículos que estejam seguindo as normas da ABNT 13221 – Transporte terrestre de resíduos.

Essas leis são importantes para proteger e preservar o meio ambiente e a saúde pública, mas os custos com burocracia e transporte para o tratamento dos resíduos podem ser eliminados quando utilizada uma unidade móvel que vai até o local onde os efluentes estão sendo produzidos.

#### **4.5 Divulgação da tecnologia**

Outro benefício que essa unidade móvel pode trazer é a divulgação da tecnologia de radiação aplicada na indústria e no meio ambiente, com o uso de acelerador de elétrons. Poder levar esse tipo de tecnologia específica para diversas partes do Estado de São Paulo, outros estados do Brasil e até outros países da América Latina é uma grande oportunidade de apresentar mais uma alternativa para tentarmos minimizar os problemas que afetam o meio ambiente, muitos deles provocados por diversas ações do homem.

Essa divulgação tecnológica e científica é importante e necessária como instrumento para reflexão entre a sociedade, ciência e tecnologia. Podendo assim, ampliar a possibilidade e a qualidade de participação da sociedade na formulação de escolha de políticas públicas no que diz respeito às questões sociais, econômicas e principalmente ambientais associadas ao desenvolvimento científico e tecnológico [19].

Na parte frontal da unidade móvel foi atribuído um espaço para uma sala com multimídia, *notebooks* e três instrumentos analíticos (CG-MS, TOC e Cromatógrafo UV-visível). Essa sala foi pensada com o objetivo de contribuir com a divulgação da unidade móvel. Um espaço onde a parte teórica e prática podem ser expostas e demonstradas. Os equipamentos analíticos, por exemplo, viabilizam avaliar no local de tratamento, os efluentes industriais antes e após a irradiação.

#### **4.6 Desenvolvimento da unidade móvel do IPEN-CNEN/SP**

O desenvolvimento da Unidade Móvel do IPEN-CNEN/SP é uma tarefa complexa e multidisciplinar, pois envolve não só questões construtivas, mas também de atendimento à legislação.

Do ponto de vista construtivo podem ser citados, a título de exemplo: o tipo de veículo a ser utilizado; os problemas estruturais para suportar as cargas existentes, em particular o acelerador de elétrons e as respectivas blindagens; a otimização dos espaços internos, para acomodar os equipamentos e os sistemas auxiliares necessários; os materiais construtivos e os acabamentos. Por outro lado, da perspectiva da legislação tem que ser atendidos os requisitos em termos de dimensões e cargas admissíveis no sistema de transporte nacional, estabelecidos

pelo CONTRAN (Conselho Nacional de Trânsito), bem como a possibilidade de alcançar as mais diferentes regiões do País.

Além disso, há requisitos de proteção radiológica, que também devem ser atendidos. Portanto, o projeto e desenvolvimento da Unidade envolvem uma equipe multidisciplinar que deve conciliar e otimizar necessidades, por vezes, antagônicas.

Estudos mostraram que a construção de uma unidade móvel no interior de uma carreta comercial é viável, técnica e economicamente. Respeitando-se os requisitos de radioproteção e da legislação para operação vigente junto à CNEN e à legislação pertinente no Brasil para o limite de transporte de carga [20,21].

#### 4.6.1 Funcionamento e custos da Unidade Móvel

O sistema de irradiação com aceleradores de elétrons permite tratar diferentes tipos de efluentes. Dependendo do efluente, a quantidade de energia de radiação ionizante, necessária para o tratamento, pode variar assim como a quantidade de efluente tratado por dia [21].

Para a construção da unidade móvel, o custo estimável é em torno de 1.5 milhões de dólares. O tipo de efluente tratado, o custo de tratamento por m<sup>3</sup>/dia e outras informações com relação ao custo de manutenção e operação da unidade móvel são apresentados na Tabela 1. Todos os dados foram obtidos do Plano de Negócios da Unidade Móvel que por sua vez foram baseadas nas informações cedidas pela Eb-Tech Co., Ltd. e também obtidas na publicação *Cost assessment of e-beam wastewater treatment* [22, 23].

#### 4.6.2 Definição do tamanho da carroceria da Unidade Móvel do IPEN-CNEN/SP

O DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), por meio do CONTRAN (Conselho Nacional de Trânsito) estabelece limites de dimensões e peso para a circulação de veículos nas vias terrestres, Resolução 210/06 [25]. Esses limites foram levados em consideração na hora de escolher o tamanho da carroceria do caminhão para a unidade móvel do IPEN-CNEN/SP, pois quando ultrapassados os limites estabelecidos é necessário solicitar uma AET (Autorização Especial de

Trânsito). O que implicaria em uma maior burocracia e restrição quanto a circulação do veículo nas questões de horário, data e percurso [26].

Tabela 1: Tipo de efluente, dose de radiação, capacidade de tratamento, energia, custos fixos e variáveis de efluente tratado na Unidade Móvel.

Efluente	Dose (kGy)	Vazão (m <sup>3</sup> /dia)	Energia (kW)	Custo (Milhão US\$)	*Custo Variável **(Custos variáveis e fixos) (US\$)	Custo de efluente tratado/m <sup>3</sup> (US\$)
Remoção de geosmina e 2-metilisoborneol (MIB) da água potável	1	1.000	20	1,5	0,20 (0,38)	0,60 (1,14)
Remoção de tinturaria dos efluentes da industrial têxtil	2	500	20	1,5	0,20 (0,38)	1,20 (2,28)
Eliminação de coliformes de efluentes de esgoto bruto, secundário e clorado	3	340	20	1,5	0,20 (0,38)	1,77 (3,36)
Remoção de compostos orgânicos da água de produção de petróleo	20	50	20	1,5	0,20 (0,38)	12 (22,8)
Remoção de PCB (bifenilas policloradas) de óleo de transformadores	50	20	20	1,5	0,20 (0,38)	30,1 (57,1)

\* Custo variável apenas (manutenção, eletricidade e mão de obra); e

\*\* Custos variáveis e fixos (depreciação, juros bancários e administração).

Fonte: [22] *Eb-Tech Co., Ltd. Cost assessment of e-beam wastewater treatment.*

#### 4.6.3 Características gerais da Unidade Móvel

Para a construção da unidade móvel do IPEN-CNEN/SP foram respeitadas rigorosamente as normas do CONTRAN, ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e padrões da indústria automobilística. Foram utilizadas as especificações que são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características técnicas da Unidade Móvel de Irradiação do IPEN-CNEN/SP.

<b>Unidade Móvel de Irradiação do IPEN-CNEN/SP</b>				
Comprimento (mm)	Largura máxima (mm)	Altura externa máxima (mm)	Nº de eixos	Transporte de massa bruta total combinada (kg)
15.000	2.600	4.400	3 com suspensão pneumática	45.000

Fonte: [25] Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN).

Com relação a parte estrutural, o chassi da unidade móvel apresenta um rebaixo na parte central para a instalação do acelerador industrial de elétrons. Sem esse desnível o caminhão excederia os limites de dimensões estabelecidos na resolução 210/06 do CONTRAN e Portaria 05/82 DSV-GAB de 4,40 m de altura[27].

A estrutura também precisou de um reforço estrutural para a homogeneização da distribuição de cargas, principalmente na região central onde foi posicionado o acelerador de elétrons e também a blindagem de chumbo (espessura de 100 mm), necessária para a contenção da radiação ionizante durante o funcionamento do equipamento.

#### 4.6.4 Segurança Radiológica

Toda a instalação radiativa precisa de um sistema de segurança radiológica, e na unidade móvel não é diferente. Assegurar a proteção dos trabalhadores e das pessoas envolvidas na operação da unidade móvel e do tratamento de efluentes nas indústrias é um ponto importante e crucial desse sistema.

A Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) estabelece normas de padrões de segurança englobando segurança nuclear, segurança contra radiações, segurança nos transportes e segurança dos resíduos. Segundo a norma de segurança *SSG-8 Radiation Safety of Gamma, Electron and X Ray Irradiation facilities* da IAEA, a unidade móvel com acelerador de elétrons se encaixa na Categoria II de tipo de irradiador. A norma também descreve itens relacionados à



blindagem do sistema e do acelerador, à segurança física e radiológica, à qualificação dos operadores, testes e manutenções dos equipamentos e os procedimentos de emergência e monitoramento quanto aos níveis de radiação, tanto individual quanto do local quando em operação [28].

#### 4.6.5 Acelerador de elétrons da unidade móvel

O modelo do acelerador de elétrons escolhido que será instalado na unidade móvel é o ELV-2 e está sendo produzido pelo instituto russo de física nuclear *Budker Institute of Nuclear Physics (BINP)*. Esse tipo de acelerador apresenta uma faixa de energia de 0,8 a 1,5 MeV, potência do feixe de 20 kW e corrente máxima do feixe de 25 mA [29].

#### 4.6.6 Sistema de circulação do efluente líquido

Para funcionar com uma unidade de tratamento de efluentes, a unidade móvel apresentará um sistema hidráulico com bombas de circulação com potência de 15 kW. Essas bombas irão recolher e transferir os efluentes do local onde estão armazenados para a unidade móvel, onde serão tratados e em seguida para um novo local de armazenamento.

No processo de tratamento de efluentes, com o uso de aceleradores de elétrons, uma vazão constante do efluente é um fator determinante para controlar a uniformidade da espessura da lâmina d'água pré-determinada. Essa uniformidade de espessura, por sua vez, é de fundamental importância para que a penetração do feixe de elétrons na água, para uma determinada faixa de energia do feixe, possibilite um tratamento eficaz e uniforme para todo o efluente tratado [30]. Ou seja, a faixa de energia do feixe de elétrons determinará a espessura da lâmina d'água que será atravessada e, em consequência, o volume de efluente que pode ser tratado por unidade de tempo.

Na Figura 9 é mostrado um exemplo do dispositivo utilizado na unidade móvel de tratamento de água da República da Coreia que gera essa lâmina d'água para receber os feixes de elétrons [30].

Junto com esse sistema de circulação de efluentes, estão previstos também sistemas de resfriamento e circulação de ar para ajudar a manter a temperatura estabilizada, no compartimento da unidade móvel onde ficam todos os equipamentos ligados ao processo de tratamento de efluentes.

Figura 9. Unidade móvel de tratamento de água da República da Coréia.



Fonte: [30] Han, B., Kim, J., Kang, W., Choi, J. S., & Jeong, K.-Y. (2016). *Development of mobile electron beam plant for environmental applications. Radiation Physics and Chemistry, 124, 174-178.* doi:10.1016/j.radphyschem. 2015.12.014

## **5 RESULTADOS**

### **5.1 Estudos preliminares para o desenvolvimento da unidade móvel**

Diferentemente de outras dissertações que tenham um trabalho experimental, a atividade desse mestrado envolveu o projeto de uma instalação radioativa móvel, totalmente inovadora, o que exigiu uma série de estudos de alternativas de espaços e de materiais. Uma característica do projeto arquitetônico é a necessidade de execução de vários estudos para encontrar a melhor distribuição dos espaços disponíveis.

Os primeiros desenhos, que na arquitetura são denominados estudos preliminares, da unidade móvel do IPEN-CNEN/SP foram baseados em unidades móveis já existentes e, principalmente, na unidade móvel de tratamento de água da empresa Eb-Tech Co., Ltd. da República da Coréia. O conhecimento prévio de unidades móveis já existentes possibilitou prever a instalação de alguns equipamentos, bem como estimar suas dimensões e possíveis interferências para a elaboração dos desenhos e esboços iniciais.

A partir dos esboços iniciais, e à medida que foram definidos equipamentos e necessidades específicas do projeto, foram elaborados estudos arquitetônicos mais completos e precisos. Esses estudos acompanharam a evolução dos diversos sistemas que compõem a Unidade Móvel com objetivo de compatibilizar as necessidades, em termos de equipamentos e sistemas auxiliares, com os espaços disponíveis, que por sua vez observaram as limitações impostas pela legislação de trânsito e também decisões estratégicas quanto à possibilidade de levar a Unidade Móvel às mais diferentes localidades, inclusive outros países da América Latina, levando-se em conta uma malha rodoviária que impõe limites de dimensão e peso dos veículos.

#### **5.1.1 Distribuição Espacial dos Ambientes – Estudo volumétrico**

Como já foi citado anteriormente, a Unidade Móvel é constituída por três módulos, contendo os principais sistemas responsáveis pela sua operação e funcionamento:

- a) Sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica;
- b) Acelerador industrial de elétrons (700 keV e 20 kW), unidades hidráulicas, sistema de ventilação, refrigeração e *bunker* com dispositivo de irradiação; e
- c) Transformador e fonte de potência, e sistema de refrigeração do acelerador de elétrons.

Para atender a necessidade de instalação desses módulos realizaram-se diversos estudos de distribuição para verificar como melhor aproveitar os espaços. Um desses é a distribuição volumétrica representada pela Figura 10.

Figura 10. Estudo dos volumes - Imagem 3D com a distribuição dos equipamentos na unidade móvel de irradiação por feixe de elétrons.



Fonte: Autora da Dissertação.

Na Figura 10 é possível observar, no lado esquerdo, o espaço destinado à sala de controle, e de divulgação técnico-científica, o console de controle do acelerador de elétrons (módulo central em amarelo), o laboratório analítico e o controle do sistema dosimétrico.

Na parte central da unidade móvel, é possível observar o espaço destinado para a instalação do acelerador industrial de elétrons, o dispositivo de irradiação e a blindagem radiológica necessária ao funcionamento.

E no restante da unidade, do lado direito, observa-se o espaço destinado à instalação dos demais equipamentos necessários ao funcionamento da unidade, tais como: sistema de refrigeração, transformador, equipamento para o tratamento do

gás ozônio gerado no processo de irradiação, tanque para o armazenamento de efluente e painéis de distribuição elétrica.

### 5.1.2 Modelagem em 3D

A partir de um estudo de projeto mecânico elaborado no Centro de Tecnologia das Radiações executaram-se modelos virtuais em três dimensões (3D). Na Figura 9 é mostrado um estudo em 3D da unidade móvel.

Além disso, as Figuras 10 e 11 foram utilizadas na divulgação do projeto da Unidade Móvel do IPEN-CNEN/SP, que conta com a parceria da AIEA (Agência Internacional de Energia Atômica), FINEP (Financiadora de Estudos e Pesquisa), NUCLEP (responsável pela blindagem radiológica) e Truckvan.

Figura 11. Comunicação Visual - Estudo preliminar da parte externa da unidade móvel.



Fonte: Autora da Dissertação.

Durante todo o desenvolvimento desse trabalho e da construção a unidade móvel, foram realizadas diversas reuniões envolvendo a equipe de pesquisadores e técnicos do IPEN-CNEN/SP, responsáveis pelo projeto, e a equipe da empresa Truckvan, para a compatibilização dos diversos sistemas da unidade móvel.

As reuniões entre o Instituto e a empresa vêm sendo fundamentais para a compatibilização do projeto e a troca de informações específicas e necessárias ao desenvolvimento.

#### 5.1.3 Levantamento das dimensões dos equipamentos que foram e ainda serão instalados na unidade móvel

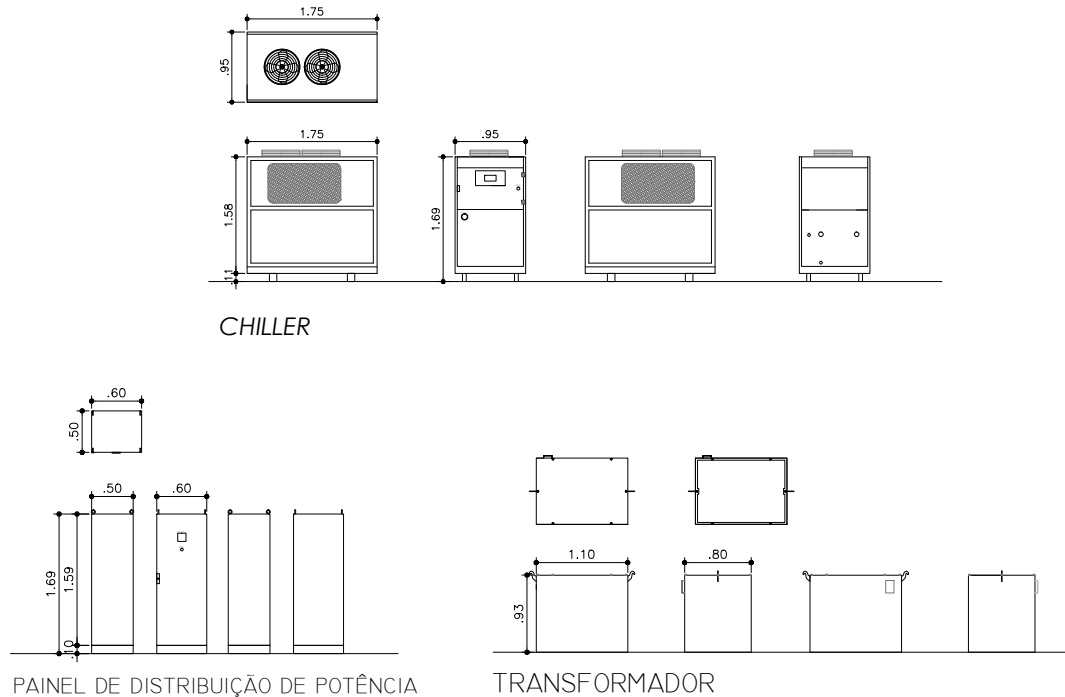
Simultaneamente ao desenvolvimento do estudo preliminar, os equipamentos necessários ao funcionamento da unidade móvel, no que diz respeito ao sistema de tratamento de efluentes e ao laboratório analítico, começaram a ser especificados.

#### 5.1.4 Equipamentos já adquiridos pelo IPEN-CNEN/SP

Alguns dos equipamentos definidos para o projeto foram adquiridos antes mesmo de a unidade móvel começar a ser construída. E conforme esses equipamentos eram entregues, era de suma importância a elaboração da representação gráfica deles, para organizar a distribuição espacial do interior da unidade. Foram levantadas as dimensões externas e também suas respectivas informações a respeito da massa, potência consumida, necessidade de tomadas elétricas, gases laboratoriais e outras utilidades. Na Figura 12 estão representados os primeiros equipamentos adquiridos para a área de sistema de tratamento de efluentes, com as respectivas dimensões que foram coletadas.

Além da instalação dos aparelhos de ar condicionado, é importante na unidade móvel de irradiação a presença de um *chiller*, que consiste em um sistema de refrigeração que utiliza a água como agente refrigerante. Os equipamentos de ar condicionado possibilitam a climatização dos ambientes e o controle da temperatura e umidade relativa, além da movimentação, filtragem e renovação do ar. Em contrapartida, o *chiller* atua diretamente na refrigeração do acelerador de elétrons, quando em funcionamento [31].

Figura 12. Desenhos com as vistas laterais e superior dos equipamentos adquiridos pelo IPEN-CNEN/SP: *Chiller*, painel de distribuição elétrica e transformador.



Fonte: Autora da Dissertação.

### 5.1.5 Equipamentos ainda não adquiridos até a data de entrega desse trabalho

No laboratório da unidade móvel foi definido que seriam utilizados três equipamentos analíticos, sendo eles: GC/MS (Espectrômetro de massa acoplado a um cromatógrafo gasoso), TOC (Analisador de Carbono Orgânico Total) e Espectrofotômetro UV-Visível.

Como esses equipamentos ainda não foram adquiridos, para recolher informações como dimensões, requisitos para instalação e outras informações relevantes, realizou-se uma visita técnica ao laboratório experimental da Shimadzu, localizando em Alphaville, São Paulo, para compreender e avaliar as necessidades dos três equipamentos analíticos laboratoriais. Esse pequeno laboratório, dentro da unidade móvel, é de fundamental importância para analisar as amostras de efluentes industriais no próprio local onde estão sendo tratados, antes e após a irradiação.

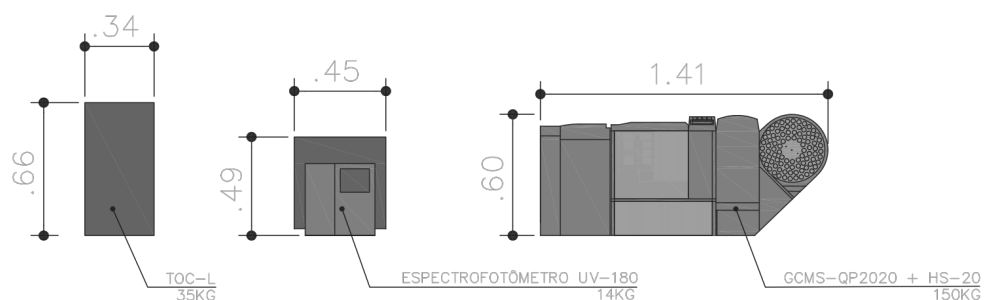
Um dos equipamentos analíticos a ser instalado é o GC/MS (Espectrômetro de massa acoplado a um cromatógrafo gasoso). Para sua instalação, há uma série de exigências quanto à presença de cilindro de gás Hélio, manômetros para controle de pressão, válvulas, tubulações, rede elétrica estabilizada e alguns equipamentos periféricos como bomba de vácuo, *notebook* e impressora.

O TOC (Analisador de Carbono Orgânico Total) também exige para a instalação cilindro de gás contendo ar sintético, manômetros para controle de pressão, válvulas, tubulações, rede elétrica estabilizada e alguns equipamentos periféricos como *notebook* e impressora.

O último equipamento analítico que fará parte do laboratório da unidade móvel é o UV-Visível. Possui a menor dimensão entre os três equipamentos e não necessita de gás laboratorial para seu funcionamento. Dentre os requisitos de instalação estão rede elétrica estabilizada, *notebook* e impressora [32].

Os três equipamentos citados a cima estão representados, com as respectivas dimensões e indicação de massa, na Figura 13.

Figura 13. Representação gráfica dos equipamentos de análise laboratorial (GC/MS, TOC e UV-Vis) que serão instalados na unidade móvel.



Fonte: Autora da Dissertação.

Todos esses equipamentos laboratoriais precisam ser instalados em bancadas planas e que suportem suas respectivas massas. Eles devem ser bem fixados nas bases, já que se trata de um laboratório analítico em uma unidade móvel, sujeita a solavancos. E para atender os três equipamentos com os três notebooks correspondentes, foi prevista no projeto uma impressora com sistema wi-fi.



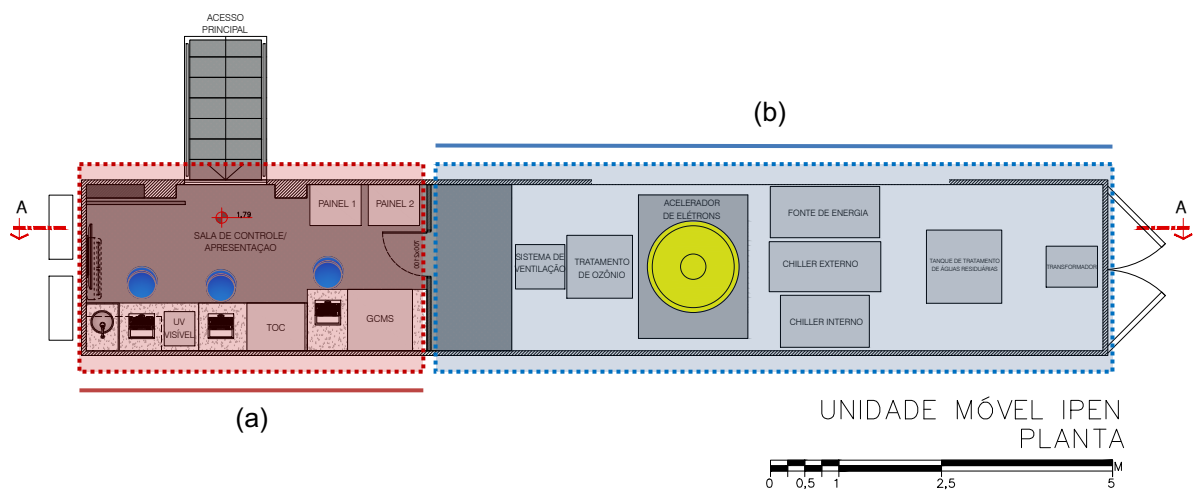
Uma questão a ser considerada com relação aos equipamentos de análise instalados na Unidade Móvel, é a questão da vibração e da trepidação inevitáveis em razão do pavimento das estradas. Essa questão foi levada para a Shimadzu, que assegurou que os equipamentos não seriam afetados se bem fixados.

#### 5.1.6. Estudos para distribuição do leiaute interno da sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica

Com as informações coletas e as reuniões com a equipe do IPEN-CNEN/SP e da empresa Truckvan, foi possível fazer os estudos preliminares e começar o desenvolvimento do projeto no sentido de aperfeiçoar a distribuição dos equipamentos e espaços internos na unidade, além de conciliar a necessidade de um ambiente transitável aos operadores.

A parte frontal do baú, indicada em vermelho na planta baixa da unidade móvel e apresentada na Figura 14, abrigará a sala de controle do acelerador, o laboratório analítico e funcionará também como uma sala para apresentações, divulgando assim a tecnologia nuclear e os serviços oferecidos pela unidade móvel de irradiação por feixe de elétrons.

Figura 14. Planta da unidade móvel de irradiação destacando-se os módulos que compõe o caminhão (baú): (a) Sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica; e (b) Sistema de tratamento de efluentes industriais.



Fonte: Autora da Dissertação.

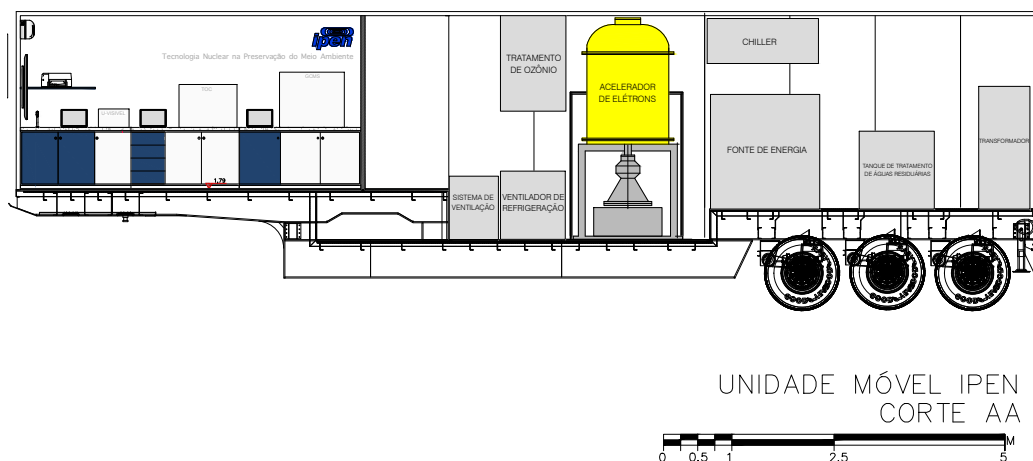
A Sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica é acessada por uma porta aviônica, que também tem a função de escada, o qual é feita em perfis de duralumínio com degraus conformados a partir de chapa de duralumínio xadrez antiderrapante, além de ter dois corrimãos laterais articuláveis em aço inoxidável. A porta tipo “avião” tem 1.200 mm de largura e 2.100 mm de comprimento. Além disso, adicionou-se uma porta de correr de policarbonato com espessura de 6 mm.

Nesse espaço da unidade móvel, foram distribuídos os seguintes itens:

- a) Dois painéis de controle do acelerador de elétrons;
- b) Equipamentos analíticos (GC/MS, TOC e UV-Vis);
- c) Três notebooks, um para cada equipamento de análise e uma impressora por sistema de wi-fi;
- d) Pia metálica redonda;
- e) Tela;
- f) Equipamento de ar condicionado tipo *split*;
- g) Cadeiras para os operadores dos equipamentos analíticos.

A partir da planta é possível o desenvolvimento de outros desenhos básicos da arquitetura, tal como o corte, onde é possível visualizar pés-direitos, alturas de elementos construtivos, mobiliário e equipamentos. Na Figura 15 está representado o Corte AA da unidade móvel, referente à planta baixa mostrada na Figura 12.

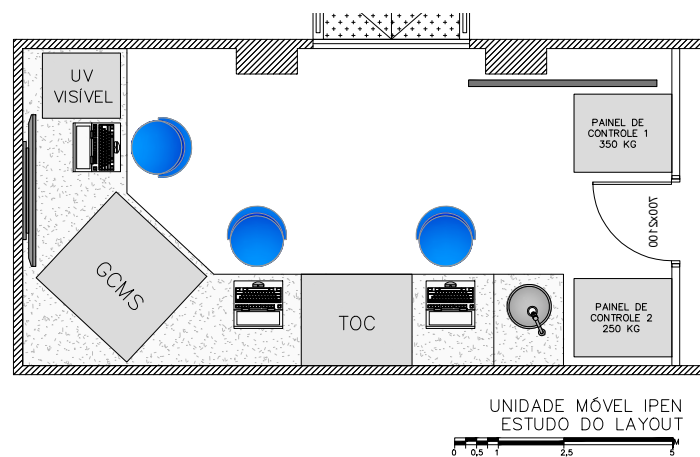
Figura 15. Corte AA na unidade móvel de irradiação por feixe de elétrons da Figura 12.



Fonte: Autora da Dissertação.

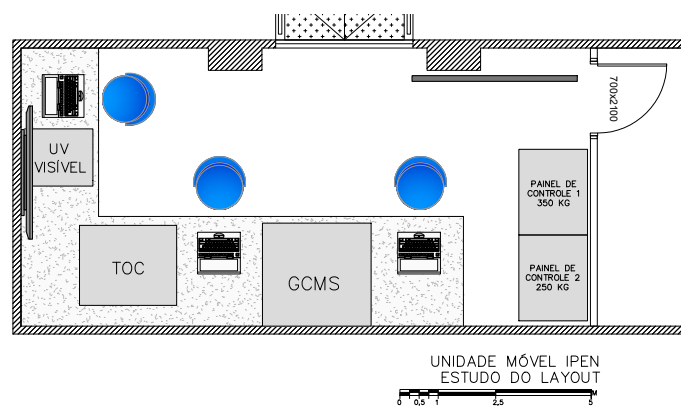
Após a definição do que seria instalado na sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica realizaram-se alguns estudos do *layout*. Cada equipamento apresenta um manual de instalação e visando atender as respectivas exigências de instalação, e adequando ao espaço delimitado na unidade móvel. A seguir, nas Figuras 16, 17 e 18 são apresentadas algumas opções de *layout* que foram desenvolvidas antes de elaborar o *layout* definitivo. Dentre os estudos desenvolvidos, o *layout* aprovado para a execução foi o mostrado na Figura 19.

Figura 16. Opções de estudos do *layout* da sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica - *layout 1*.



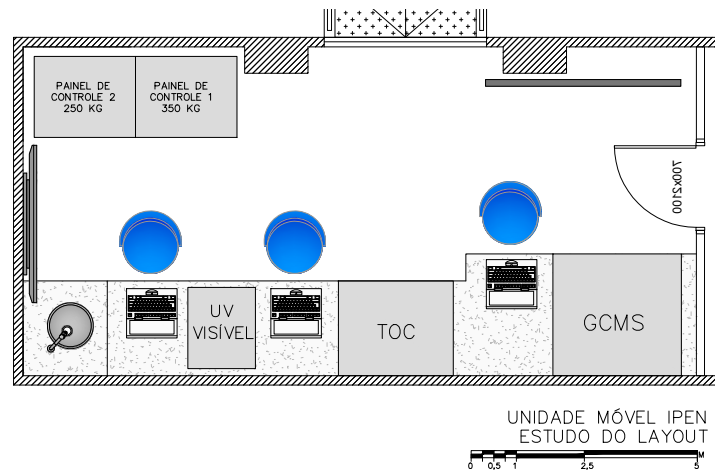
Fonte: Autora da Dissertação.

Figura 17. Opções de estudos do *layout* da sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica - *layout 2*.



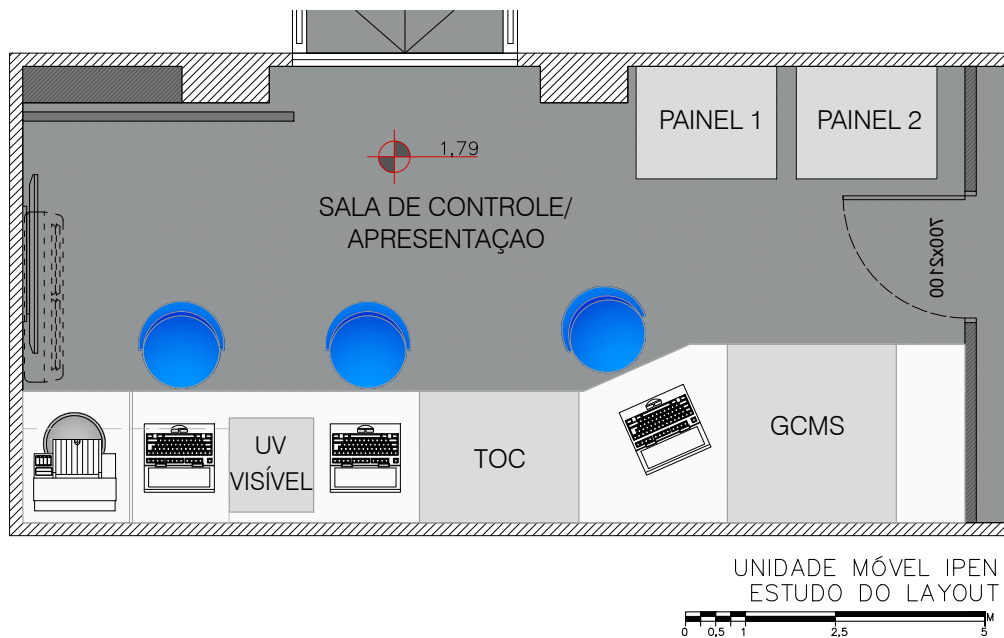
Fonte: Autora da Dissertação.

Figura 18. Opções de estudos do layout da sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica - *layout 3*.



Fonte: Autora da Dissertação.

Figura 19. *Layout* aprovado para a execução.



Fonte: Autora da Dissertação.

No desenho mostrado na Figura 19 previu-se a confecção de uma bancada com 4,95 m de comprimento, sendo 3,20 m com a largura de 0,70 m e 1,75 m com 0,90 m de largura. A parte mais larga da bancada (0,90 m) tem como objetivo acomodar o equipamento GC/MS e facilitar futuras manutenções.

Na bancada ainda se previu a inserção de uma pia metálica redonda de 0,30 m de diâmetro e reservou-se espaço para os três notebooks necessários, um para cada equipamento analítico.

Foram levadas em conta as instruções técnicas para instalação e as recomendações indicadas pelos fabricantes, visando sempre o bem estar dos operadores, facilitando a utilização dos equipamentos analíticos e a manutenção quando necessária.

#### 5.1.7 Modificações ocorridas no andamento do projeto

Devido aos limites nos prazos para a utilização de verbas das instituições financiadoras e ao interesse de empresas privadas, a construção da unidade foi acelerada. Isso provocou alguns transtornos no projeto. A construção acelerada, acrescida das restrições na liberação de informações, por parte de algumas empresas fornecedoras de equipamentos, gerou imprevistos e a necessidade de alteração do projeto ao longo do seu desenvolvimento e da construção da unidade.

Alguns tópicos que já haviam sido decididos em reuniões, e já estavam estabelecidos entre a equipe do IPEN-CNEN/SP e da empresa Truckvan, precisaram ser modificados. Como muitos equipamentos ainda estavam em processo de aquisição durante o desenvolvimento do projeto, não foi possível ter acesso a informações exatas, muitas vezes por restrições dos fornecedores. Na última modificação feita no *layout* houve necessidade de se alterar:

- a) **Inclusão de um terceiro painel de controle do acelerador, que não estava previsto no início do projeto** - Na documentação da Eb-Tech Co., Ltd. referente a aquisição do acelerador de elétrons, que constava as informações básicas necessárias do acelerador, estavam descritos apenas dois painéis de controle. A equipe do IPEN-CNEN/SP decidiu que era necessária a instalação de mais um painel de controle, para atender às necessidades da unidade móvel. Para instalar esse novo painel de controle para o acelerador, foi necessário fazer modificações no *layout* do mobiliário;
- b) **Modificação no desenho do mobiliário** - Para acomodar o terceiro painel de controle foi preciso diminuir o tamanho da bancada em 1,5 m. Como essa modificação era necessária e o mobiliário já estava executado, houve o

aproveitamento do restante da bancada em outro local, evitando-se assim a remoção de um dos equipamentos de análise do laboratório analítico da unidade móvel;

- c) **Alteração do sentido da abertura e da posição da porta interna que liga a sala de controle, o laboratório analítico e a área de divulgação técnico-científica com a área do sistema de tratamento de efluentes industriais** - Para melhorar a circulação no ambiente, foi alterado o sentido de abertura da porta da sala de controle para a área de tratamento de efluentes. A porta passou a abrir para fora da sala de controle; e
- d) **Mudança da posição dos cilindros de gás, utilizados nos equipamentos analíticos, do maleiro para a parte interna da bancada, no interior da unidade móvel** - Inicialmente, foi acordado pelas equipes do IPEN-CNEN/SP e da empresa Truckvan que o local mais adequado para a instalação dos cilindros de gás seria no maleiro da unidade móvel, com acesso apenas pela área externa do caminhão. Essa decisão foi tomada visando atender as normas de segurança e instalação dos equipamentos analíticos, sendo que o ideal é que esses cilindros sejam bem fixados, fiquem em áreas externas e com ventilação constante.

Entretanto, o cilindro de gás não pôde ser instalado no maleiro, pois a altura total do cilindro com a válvula acoplada excede o limite considerado na execução do maleiro. Por esse motivo, os cilindros de gás precisaram ser instalados em um novo espaço. O local escolhido para a instalação foi a parte interna das bancadas da sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica, logo abaixo dos equipamentos analíticos que utilizarão esses gases. Na Figura 20 são mostrados os cilindros de gás já instalados na unidade móvel. O cilindro laranja contém o gás hélio e o cilindro cinza o ar sintético. Vale lembrar que esses gases não são inflamáveis nem tóxicos. Também é possível observar as tubulações metálicas que levam o gás até a parte superior da bancada onde serão instalados os equipamentos analíticos que precisam desses gases para o seu funcionamento, os manômetros e os reguladores de pressão.

Figura 20. Cilindros dos gases exigidos para o funcionamento dos equipamentos analíticos que foram instalados na parte interna da bancada.



Fonte: Autora da Dissertação.

Entre o cilindro e a parede do móvel instalou-se uma aleta metálica revestida de *neoprene*, para absorver impactos relacionados ao movimento do caminhão. Fixaram-se as correntes metálicas para se evitar que os cilindros tombem.

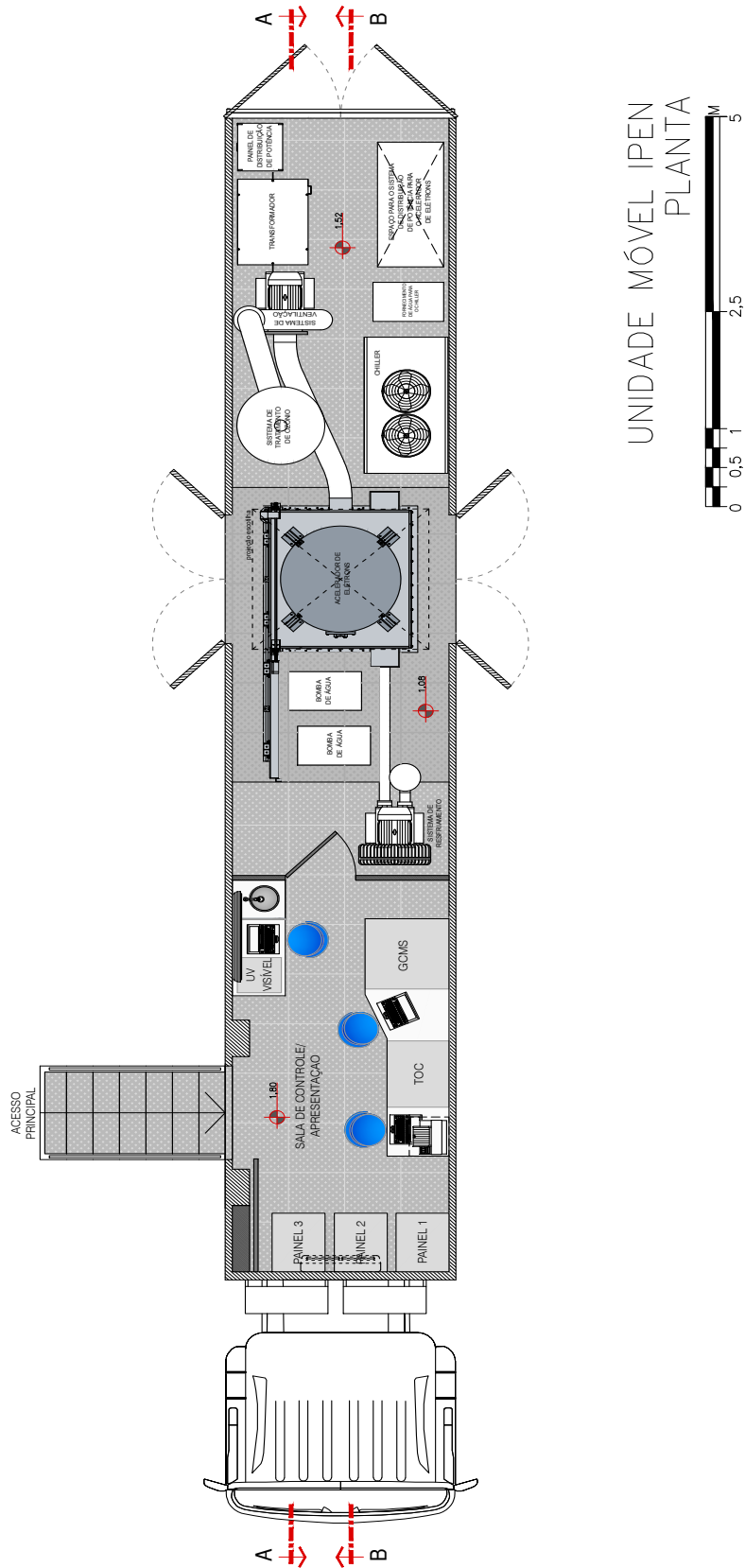
#### 5.1.8 *Layout* final da unidade móvel com as alterações efetuadas

Mencionou-se no Item 5.1.7 a necessidade de algumas alterações no desenvolvimento do projeto. Os desenhos arquitetônicos precisaram ser modificados para atender as novas exigências, tanto a planta baixa como os cortes.

A planta com o *layout* definitivo da sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica é apresentada na Figura 21. O *layout* da área do sistema de tratamento de efluentes industriais ainda não é o final, pois ainda faltam informações e desenhos específicos de alguns equipamentos.

Outro desenho arquitetônico importante, que é uma representação da construção, são os cortes. O corte busca mostrar a dimensão vertical, os andares, a altura, o pé-direito e outros detalhes que não são representados na planta baixa. Na Figura 22 é mostrado o corte AA da unidade móvel e, na Figura 23, o corte BB.

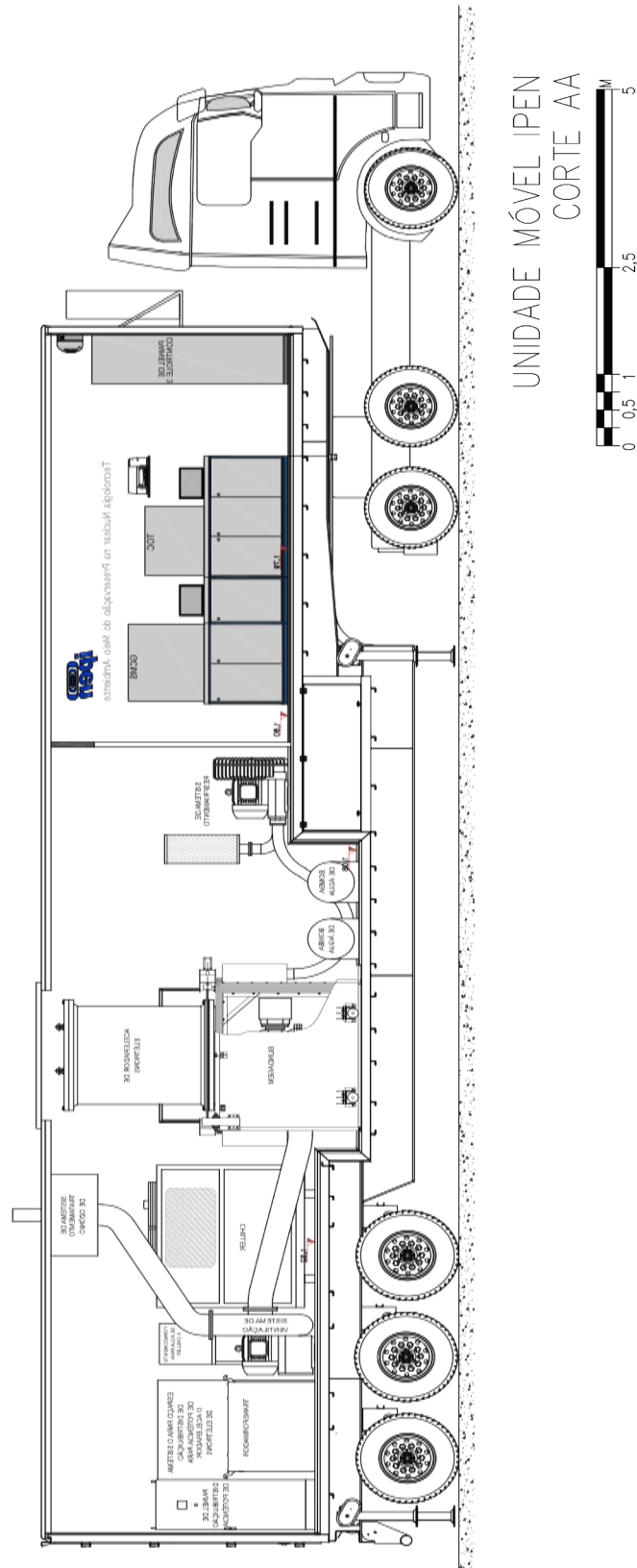
Figura 21. Planta baixa da unidade móvel do IPEN-CNEN/SP com o layout final da sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica.



Fonte: Autora da Dissertação.

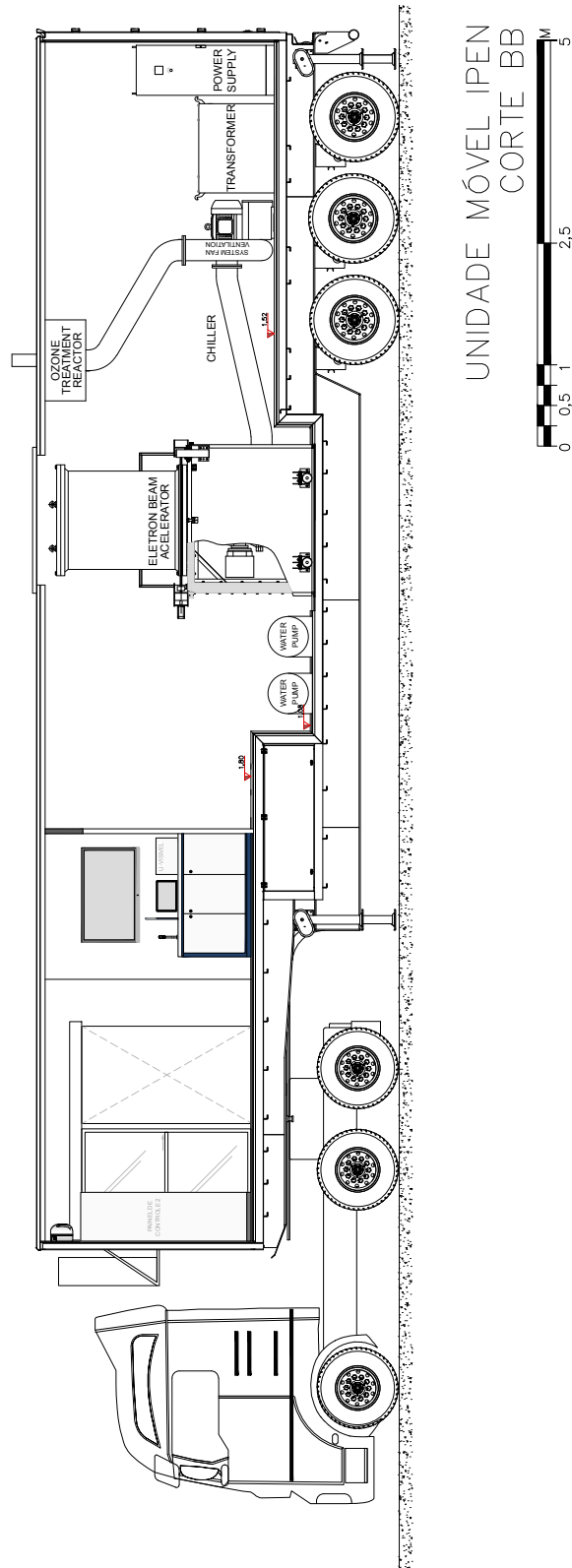


Figura 22. Corte AA da unidade móvel do IPEN-CNEN/SP com o *layout* final da sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica



Fonte: Autora da Dissertação.

Figura 23. Corte BB da unidade móvel do IPEN-CNEN/SP com o *layout* final da sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica.



### 5.1.9 Imagens 3D do interior da sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica

Para os projetos arquitetônicos, a apresentação é, sem dúvidas, de extrema importância. As maquetes eletrônicas ou imagens em 3D, hoje em dia, são a forma mais usual de apresentar uma proposta e de visualização de projetos. O estudo da volumetria, a harmonia das cores e texturas e as relações de proporção são facilmente simulados, além de agregar valor ao projeto. Como forma de auxiliar no entendimento do projeto, produziram-se imagens em 3D da sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica, da unidade móvel de irradiação que são apresentados na Figura 24.

Figura 24. Imagens 3D do interior da sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica, da unidade móvel de irradiação.



Fonte: Autora da Dissertação.

## **5.2. Construção da unidade móvel do IPEN-CNEN/SP**

### **5.2.1 Estrutura / Chassi**

A unidade móvel, para não precisar de autorização especial para circulação, precisou obedecer aos limites de dimensões e de carga. Por causa dessas limitações, optou-se por uma carroceria com 15 m de comprimento por 2,60 m de largura e 4,20 de altura, com 3 (três) eixos de suspensão pneumática, para transporte de massa bruta total de 42.500 kg.

Dessa forma, o projeto da estrutura da unidade móvel partiu dessas dimensões e com um fator limitante, a massa total. Com o levantamento das informações, principalmente da massa de todos os equipamentos que serão instalados na unidade móvel foi possível fazer a distribuição de cargas na estrutura da carroceira. A partir disso, os engenheiros do IPEN-CNEN/SP e da empresa Truckvan puderam desenvolver o projeto estrutural definitivo da unidade móvel.

Na Figura 25 é mostrada uma das etapas da confecção da estrutura metálica (chassi) da unidade móvel pela empresa Truckvan. Nessa etapa da construção, as vigas estavam sendo soldadas umas as outras.

Figura 25. Confeção da estrutura metálica (chassi) da unidade móvel pela empresa Truckvan.



Fonte: Orientador e Autora da Dissertação.

Nas imagens da Figura 25 é possível observar o rebaixo executado na estrutura. Este rebaixo foi necessário, pois é o local onde o acelerador de elétrons será posicionado. Sem esse rebaixo a unidade móvel ultrapassaria os limites de altura impostos para se deslocar sem a autorização especial para circulação.

### 5.2.2 Baú / Revestimentos externos

Tendo a base do caminhão pronta, a próxima etapa foi a instalação dos painéis em alumínio (paredes e teto), portas e escada de acesso ao interior da unidade móvel. O baú posicionado em cima da estrutura do chassi abriga todo o sistema de tratamento de efluente e seus equipamentos periféricos.

Construído com perfis de alumínio, que servem de estrutura para as vedações laterais. Esses perfis são de duralumínio (liga de alumínio com magnésio, manganês e cobre), que tem como característica a resistência a ácidos diluídos e água salgada. Os perfis são extrudados no formato “ômega” e com alma de 31 mm, conforme a norma ASTM 6005 T5 [33,34].

Para a vedação externa das laterais do baú foram utilizadas chapas lisas de liga de alumínio, com espessura de 2 mm, que são fixadas com arrebites, conforme mostrado na Figura 26.

O teto da unidade móvel também foi revestido com chapa de liga de alumínio, mas com espessura de 0,7 mm. Também foram instaladas calhas laterais nos cantos e perfis tipo pingadeira “J”, que facilitam o escoamento de água até os cantos.

Figura 26. Unidade móvel com a vedação externa em chapas lisas de alumínio.



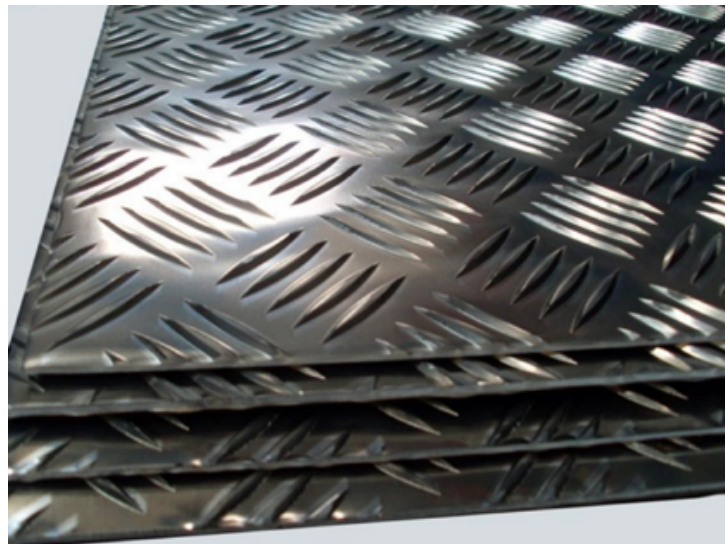
Fonte: Truckvan Indústria e Comércio Ltda.

Na Figura 26, também é possível observar as aberturas laterais onde foram localizadas as portas de acesso ao sistema de tratamento de efluentes. É exatamente entre essas portas que será posicionado o acelerador de elétrons. Na Figura 26 destaca-se o retângulo vermelho tracejado, no teto da unidade móvel, no qual se abriu uma escotilha para a entrada do acelerador de elétrons, quando ele for instalado, e para futuras manutenções.

#### 5.2.4 Baú | Revestimentos internos

O piso da unidade móvel foi confeccionado em 3 (três) camadas. A primeira camada é uma chapa de aço carbono soldada em toda a área da base rolante. Essas chapas, com espessura de 3 mm, foram tratadas contra ferrugem e pintadas em ambas as faces. A segunda camada é um piso composto de madeira compensada tipo naval com 18 mm de espessura. Essa madeira é resistente à ação da água e dos fungos. Por fim, a última camada é a que fica exposta e podem ser utilizados diversos tipos de revestimentos. Na unidade móvel do IPEN-CNEN/SP foram escolhidas, para o piso, chapas de duralumínio xadrez antiderrapante, que proporcionam proteção contra os deslizamentos e quedas em qualquer ambiente em que pode haver acúmulo de líquidos. Essas placas são de fácil limpeza, não oxidam, são resistentes e duráveis. Esse revestimento é mostrado na Figura 27.

Figura 27. Chapa de duralumínio xadrez antiderrapantes, utilizada na montagem do piso interno da unidade móvel de irradiação.



Fonte: [35] <<http://www.aluminioaltec.com.br/chapa-xadrez-de-aluminio>>.

A parte interna da unidade móvel, incluindo todas as laterais e o teto, recebeu um isolamento térmico. Foram utilizadas placas de poliuretano e lã de rocha para auxiliar no isolamento térmico da unidade móvel. Na Figura 28 são apresentados os dois tipos de placas de isolamento.

Por cima das placas de isolamento térmico, foram instalados os revestimentos internos. No caso das paredes da área da sala de controle, laboratório analítico e divulgação técnico-científica o revestimento escolhido foram placas de MDF revestidas com formica branca. O MDF é um material leve, resistente, versátil e mais barato que a madeira natural e a formica aumenta a resistência à umidade, impactos e riscos e é de fácil manutenção.

Figura 28. Tipos de materiais que podem ser utilizados para isolamento térmico da unidade móvel: (a) Placas de poliuretano; e (b) Placas de lã de rocha.



(a) Placas de poliuretano.

Fonte: [36]  
 <<https://www.terac.com.br/poliuretano/placas/placa-de-poliuretano-expandida-dens-32kgs-esp-50mm-m2>>



(b) Placas de lã de rocha.

Fonte: [37]  
 <<https://www.isar.com.br/construcao-a-seco/pa-rock>>

Já na área destinada ao sistema de tratamento de efluentes, o revestimento escolhido no piso foram as chapas de duralumínio xadrez. Por se tratar de uma região onde haverá equipamentos que envolvem o uso de água e/ou efluentes, priorizou-se um revestimento mais resistente à água e umidade.

E para o teto de toda a unidade móvel foram escolhidas placas de MDF revestidas com fórmica branca.



### 5.2.3 Acessos da unidade móvel

A unidade móvel apresenta cinco acessos. Um desses acessos é a porta aviônica para entrada na sala de controle/ laboratório. A porta aviônica é um tipo de fechamento com sistema hidráulico, que tem escadas incorporadas na porta. Na Figura 29, é mostrado esse tipo de porta já instalada na unidade móvel.

Figura 29. Porta aviônica com escadas incorporadas.



Fonte: Autora da Dissertação.

Os outros acessos da unidade móvel são as duas portas laterais bipartidas, ou seja, uma porta bipartida em cada lateral da unidade móvel); uma porta traseira bipartida e uma escotilha no teto que será usada para a instalação / manutenção do acelerador industrial de elétrons.

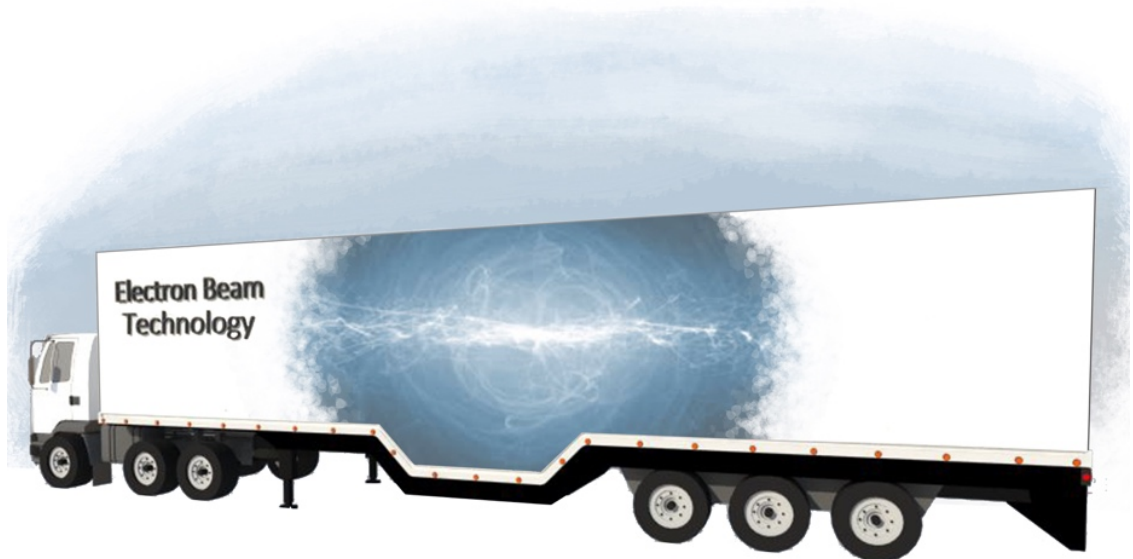
### 5.2.4 Adesivagem / Comunicação visual

A parte externa da unidade móvel recebeu uma pintura especial na cor branca com tinta à base de poliuretano. Dessa maneira, a parte externa ficou pronta para receber a aplicação do adesivo com a identificação visual desenvolvida nesse trabalho e aprovada pelo IPEN-CNEN/SP e equipe responsável.

Assim como nos estudos do *layout*, desenvolveram-se algumas opções para a identificação visual da unidade móvel de irradiação por feixe de elétrons do IPEN-CNEN/SP. Alguns desses estudos são apresentados nas Figuras 30 a 34. Neles, foram abordadas questões, tais como, cores, tema abordado, posicionamento e dimensões das logomarcas das empresas e instituições envolvidas no projeto.

Essa comunicação visual é de extrema importância, já que as informações visuais atingem o público instantaneamente, diferente das informações textuais. Assim, transmitir uma informação textual, acompanhada de elementos visuais, é mais atrativo.

Figura 30. Imagens em 3D e vista lateral da unidade móvel com estudos para a identidade visual (opção 1).



Fonte: Autora da Dissertação.

Figura 31. Imagens em 3D e vista lateral da unidade móvel com estudos para a identidade visual (opção 2).



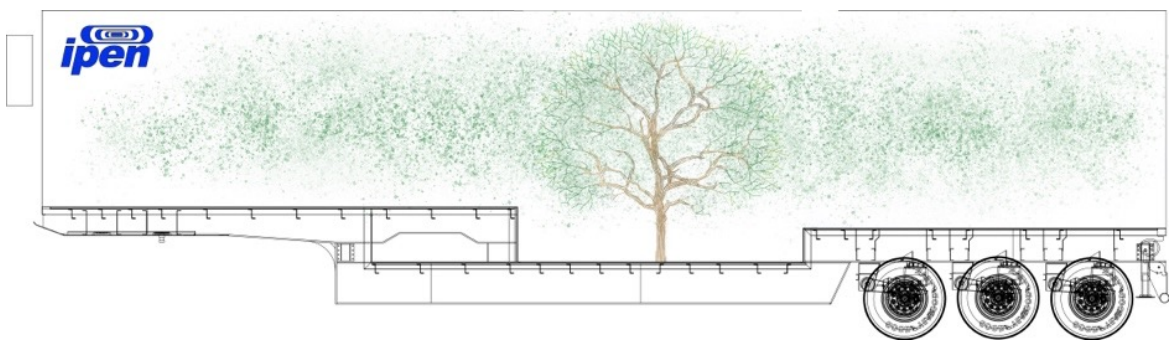
Fonte: Autora da Dissertação.

Figura 32. Imagens em 3D e vista lateral da unidade móvel com estudos para a identidade visual (opção 3).



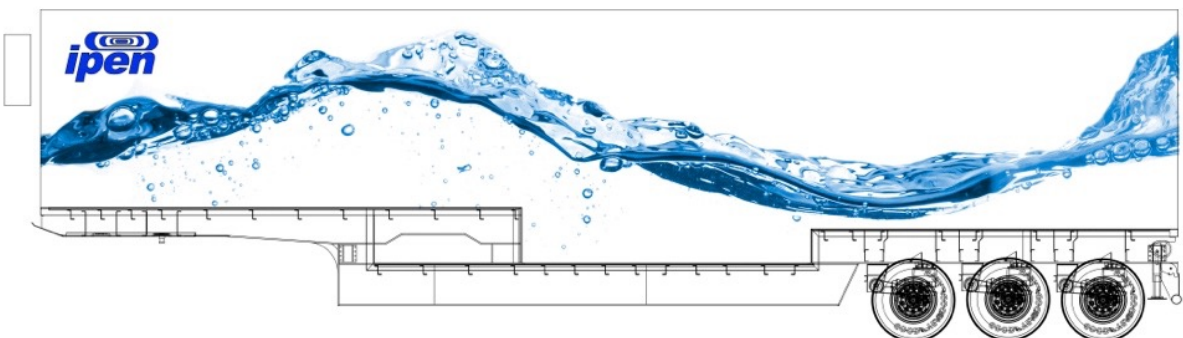
Fonte: Autora da Dissertação.

Figura 33. Imagens em 3D e vista lateral da unidade móvel com estudos para a identidade visual (opção 4).



Fonte: Autora da Dissertação.

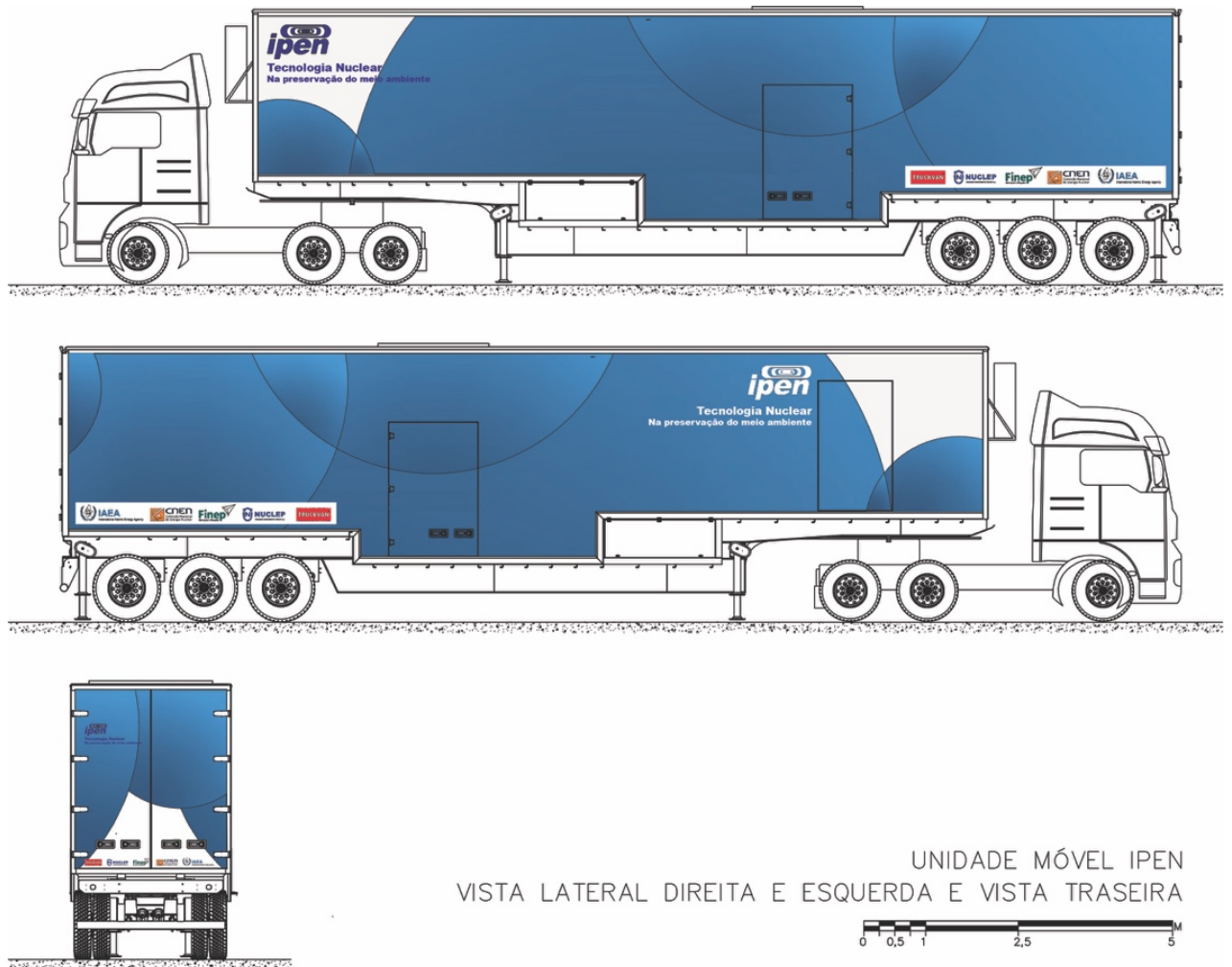
Figura 34. Imagens em 3D e vista lateral da unidade móvel com estudos para a identidade visual (opção 5).



Fonte: Autora da Dissertação.

Duas das propostas de adesivagem desenvolvidas nesse trabalho foram selecionadas e enviadas, para ajudar as equipes do IPEN-CNEN/SP e da Truckvan, envolvidas no desenvolvimento do projeto, na escolha da melhor opção. Uma delas é mostrada na Figura 35.

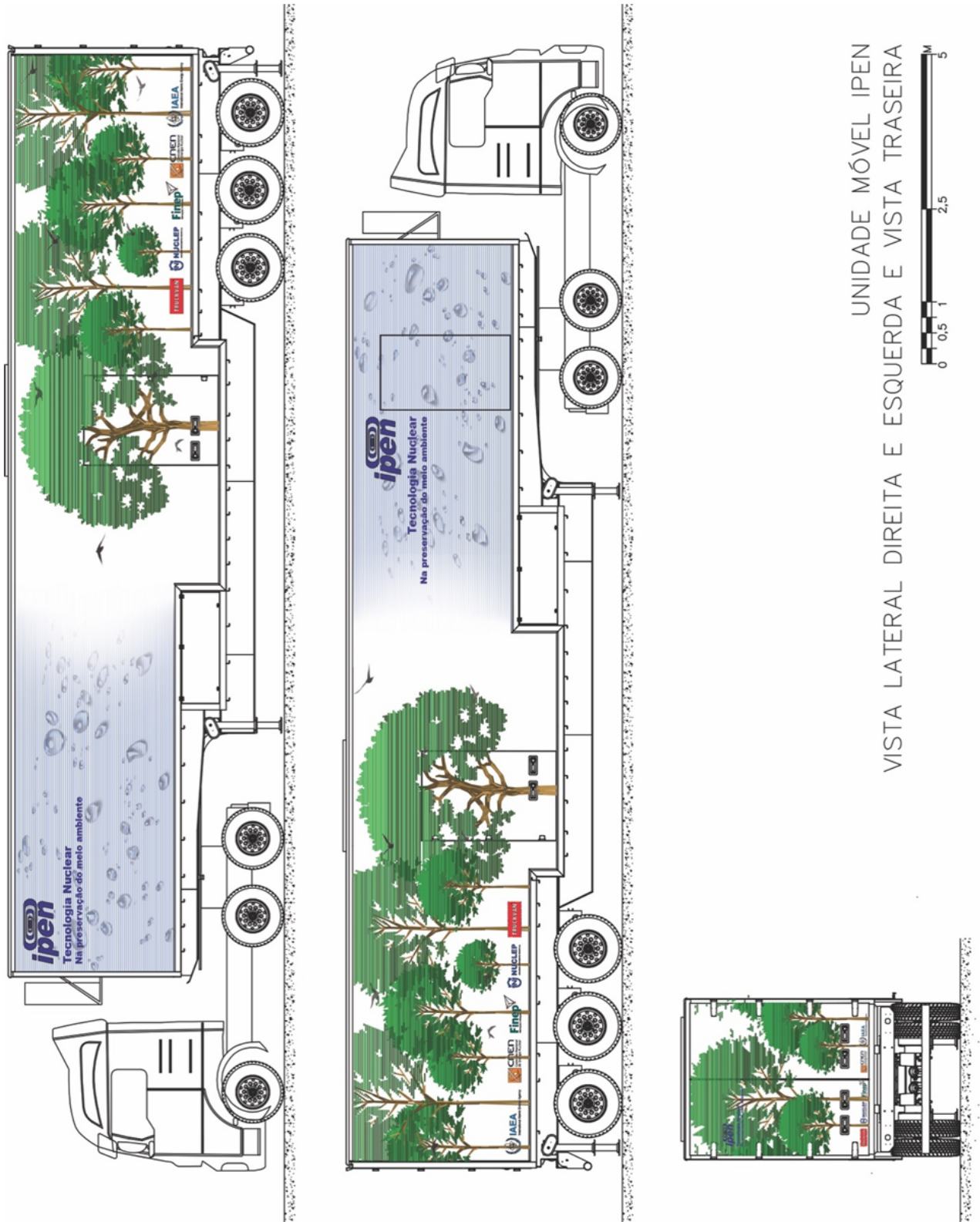
Figura 35. Proposta de adesivagem inserida nas fachadas da unidade móvel.



Fonte: Autora da Dissertação.

Conforme evolução no desenvolvimento do projeto, os desenhos foram aprimorados com o próprio tema da unidade móvel e, junto com a colaboração e sugestões da equipe do IPEN-CNEN/SP, chegou-se à arte final na adesivagem, que é mostrada na Figura 36.

Figura 36. Arte final para adesivagem da unidade móvel do IPEN-CNEN/SP.



UNIDADE MÓVEL IPEN  
VISTA LATERAL DIREITA E ESQUERDA E VISTA TRASEIRA

Fonte: autora da dissertação.

Essa arte foi escolhida, pois tem um apelo ambiental, com ar, árvores e os pássaros. As linhas azuis representam os feixes de elétrons que passam pelas gotas d'água e atingem o meio ambiente.

Em todas as fachadas da unidade móvel foram colocadas as logomarcas das instituições e empresas envolvidas na construção, no desenvolvimento e financiamento da unidade móvel, são eles: AIEA, CNEN, FINEP, NUCLEP, TRUCKVAN e IPEN-CNEN/SP .

Como forma de facilitar a visualização e entendimento, projetou-se com o programa *SketchUp* (é um *software* próprio para a criação de modelos 3D no computador) uma imagem 3D da unidade móvel, com a arte final da comunicação visual, antes da aplicação definitiva na unidade móvel. A imagem em três dimensões é apresentada na Figura 37.

Figura 37. Imagem 3D da unidade móvel com a arte final da comunicação visual.



Fonte: Autora da Dissertação.

Por fim, com a adesivagem escolhida e aprovada, liberou-se a aplicação pela empresa Truckvan, nas fachadas da unidade móvel. Na Figura 38 é mostrado o baú do caminhão já com o adesivo da arte final. Na Figura 39 são destacadas as instituições financiadoras e parceiras do IPEN-CNEN/SP no projeto.

Figura 38. Fotografias da unidade móvel do IPEN-CNEN/SP com a adesivagem aplicada.



Fonte: Truckvan Indústria e Comércio Ltda.

Figura 39. Fotografias da unidade móvel com destaque das instituições e parceiras do IPEN-CNEN/SP no projeto.



Fonte: Truckvan Indústria e Comércio Ltda.



### 5.3. Trabalhos e prêmios internacionais relacionados ao desenvolvimento do projeto

#### 5.3.1 Trabalho em congresso internacional

Durante o desenvolvimento desse trabalho, enviou-se o resumo: *Design and construction of a mobile irradiation unit for the treatment of industrial effluents in Brazil* para a *International Meeting on Radiation Processing (IMRP 2019)*, realizada de 1 a 5 de abril de 2019, em Estrasburgo, na França.

O resumo foi aceito para a apresentação na *IMRP 2019*, no formato de pôster e, além disso, foi selecionado como um dos 4 (quatro) melhores trabalhos de alunos de graduação e pós-graduação. Com isso, a organização do evento forneceu ajuda financeira para cobrir os gastos com viagem e hospedagem, isenção da taxa para participação no congresso e isenção no pagamento da taxa no curso de treinamento *Radiation Processing for Advanced Materials*, de 27 a 29 de março de 2019, em Reims, na França.

#### 5.3.2 Prêmio internacional

Outra grande conquista relacionada ao projeto da Unidade Móvel foi o prêmio "*Nuclear Technologies for Better Life*" (Tecnologias nucleares para uma vida melhor, em tradução livre), mostrado na Figura 40, concedido pela Rosatom, Companhia Estatal de Energia Nuclear da Rússia. O IPEN-CNEN/SP foi o primeiro representante latino-americano a ganhar o prêmio [38].

O projeto vencedor, "Irradiador Gama Multipropósito e Unidade Móvel com Acelerador de Feixe de Elétrons Desenvolvido no Brasil" foi implementado pelo Centro de Tecnologia das Radiações do IPEN-CNEN/SP e referem-se às duas importantes instalações radiativas desenvolvidas com tecnologia nacional para a aplicação da tecnologia nuclear. Trata-se do irradiador de uso contínuo de Cobalto-60 e um acelerador de feixe de elétrons para tratamento de efluentes industriais[38].

Figura 40. Prêmio "Nuclear Technologies for Better Life" conquistado pelo IPEN-CNEN/SP e concedido pela Rosatom.



Fonte: [39] <[https://fr.sputniknews.com/sci\\_tech/201902281040190538-atomexpo-prix-russie-sotchi/](https://fr.sputniknews.com/sci_tech/201902281040190538-atomexpo-prix-russie-sotchi/)>.

## CONCLUSÃO

Neste trabalho realizou-se o desenvolvimento do projeto arquitetônico da unidade móvel de irradiação com acelerador de elétrons do IPEN-CNEN/SP. Foram apresentadas e consideradas no projeto, as normas aplicáveis na sua execução. Para a execução da unidade móvel foram elaborados diferentes estudos e esboços, com os desenhos de diferentes arranjos de distribuição do *layout* interno, com o dimensionamento dos espaços e dos diferentes equipamentos instalados, de maneira a aproveitar da melhor forma possível o espaço existente na unidade. Foi necessário um grande número de reuniões com as equipes envolvidas e a execução de vários esboços de forma a compatibilizar as diferentes necessidades de cada sistema que compõe o projeto. Além dos estudos de distribuição e utilização dos espaços internos, este trabalho também abordou o desenvolvimento da arte visual externa da unidade, com sugestões de diferentes temas. Após a apresentação das propostas e discussão com a equipe responsável pelo projeto, escolheu-se uma opção e a arte final foi aplicada à estrutura externa da unidade móvel por meio de uma técnica de adesivagem. As diversas alternativas apresentadas e as diversas discussões dedicadas ao tema justificam-se pela importância da divulgação do projeto e das instituições financiadoras e parceiras, além de proporcionar uma forma de identificação e de reconhecimento pelo público, em geral, do papel desempenhado pelo IPEN-CNEN/SP, em uma atividade de grande relevância para a sociedade e de acordo com a visão Institucional.

Também são apresentados no trabalho os materiais utilizados na execução do projeto. Foram considerados materiais específicos para atender a construção da unidade móvel e, assim, facilitar o funcionamento da instalação e garantir condições seguras para limpeza e conservação do ambiente, bem como o bem-estar dos profissionais que irão utilizar a instalação.

Cabe ressaltar que o projeto dessa unidade móvel de irradiação por feixe de elétrons ainda não foi totalmente concluído, pois algumas informações técnicas, necessárias para a sua conclusão, ainda não estão disponíveis. Exemplos dessas informações, que deverão ser confirmadas pelos fabricantes tão logo os processos de aquisição sejam concluídos, são os dados sobre: a blindagem radiológica

(NUCLEP); o acelerador industrial de elétrons (Eb-Tech Co., Ltd.); os aparelhos de ar condicionado; o dispositivo de irradiação e o filtro de carvão ativado. As informações técnicas pendentes relativas aos equipamentos, tais como, modelo, dimensões e características para instalação, dentre outras, afetarão a sua distribuição interna e, conseqüentemente, o projeto arquitetônico final.

Portanto, essas informações são essenciais para que possa ser desenvolvido o *layout* interno definitivo da unidade móvel, e a conclusão dos desenhos técnicos e do projeto arquitetônico adequadamente, e para que seja o mais preciso possível, pois se trata de uma instalação com espaço restrito e o dimensionamento adequado dos ambientes é fundamental para melhor aproveitamento das áreas disponíveis.

Embora o projeto não esteja concluído, é possível constatar que, quando construída, a nova instalação proporcionará ao IPEN-CNEN/SP ingressar em uma nova e significativa área de atuação, de relevante importância para pesquisas científicas e para a preservação do meio ambiente.

Concluindo, essa instalação radioativa proporcionará desenvolvimento em pesquisas buscando sempre avanços científicos em benefício da população brasileira. Trata-se de um importante avanço para esse tipo de tecnologia pouco explorada no Brasil.

## TRABALHOS FUTUROS

Alguns equipamentos para a Unidade Móvel foram adquiridos, mas ainda não chegaram ou se encontram em fase de aquisição. Quando todos os equipamentos chegarem e/ou tiverem o processo de aquisição concluído, será importante acrescentar, nos desenhos, as suas medidas exatas para, assim, compatibilizar o espaço disponível, que é bastante restrito, com as medidas corretas dos respectivos equipamentos.

Após a chegada do acelerador de elétrons, ainda será preciso concluir as instalações da blindagem radiológica e do acelerador de elétrons na unidade móvel. Após a conclusão dessa instalação, será necessário realizar testes operacionais, tanto nos equipamentos de análise do laboratório, quanto no acelerador de elétrons.

Outro aspecto importante, que precisará ser realizado após os testes operacionais da Unidade Móvel, é a obtenção da licença de operação junto à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Com a licença, o próximo passo é divulgar a Unidade Móvel e começar a utilização em empresas que tenham interesse e necessidade de tratamento de efluentes industriais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 13-16 October, 2003, Viena, Austria. **Proceedings of a consultants meeting held in Daejeon**. Status of Industrial Scale Radiation Treatment of Wastewater and its Future.
- [2] CORCORAN, E.; NELLEMAN, C.; BAKER, E.; BOS, R.; OSBORN, D.; SAVELLI, H.(eds). **Sick Water? The central role of wastewater management in sustainable development**. A Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme, UN-HABITAT, GRID-Arendal. ISBN: 978-82-7701-075-5, Norway, 2010.
- [3] HESPANHOL, J. C.; MIERZWA, I. **Programa para Gerenciamento de Águas e Efluentes nas Indústrias, Visando o Uso Racional e a Reutilização**. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, V. 04, N.02 – p.11-15, 2000.
- [5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Office of Public Information and Communication. **Scientific Forum 2015: Radiation Technology Helps China's Industries Make Water Cleaner**. 2015. Disponível em: <https://www.iaea.org/newscenter/news/scientific-forum-2015-radiation-technology-helps-china's-industries-make-water-cleaner> >. Acesso em: 05 nov. 2019.
- [6] SAMPA, M.H.O.; RELA, P.R.; DUARTE, C.L. **“Industrial Wastewater Treatment in Brazil Using Electron Beam Accelerator”**. Editors: William J. Cooper, Kevin E. O'Shea and Randolph D. Curry, in Environmental Applications of Ionizing Radiation ,Capítulo 33, pages: 521-530, John Wiley & Sons, Inc., in 1998.
- [7] STEERE, A.R. **A Timeline of Major Particle Accelerator**. 2005. Dissertação (Mestrado em Física) - Michigan State University, United States of America.
- [8] KASHIWAGI, M.; HOSHI, Y. **Electron beam Processing System and Its Application**. SeiTechnical Review, 75, 2012.
- [9] APS. **Accelerators and Beams - Tools of Discovery and Innovation**. Published by the Division of Physics of Beams of the American Physical Society. 4<sup>th</sup> edition, 2013.
- [10] HAN, B.; KIM, S.; KIM, J. Electron Beam Technology in Korean Industries. **Journal of the Korean Physical Society**, Vol.59, No. 2, p.542-545, 2011.
- [11] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Radiation Processing: Environmental Applications**. IAEA/IAEAAL 0-00479, Viena, Austria. 2007.

- [12] HANNA, S. M. **Examples of Radiation Wastewater Treatment Implemented In Various Countries**. In: Twelfth International Water Technology Conference, IWTC12 - Alexandria, Egypt, 2008.
- [13] Z. ZIMEK, K. ROMAN, S. DŁUGOŃ, W. GŁUSZEWSKI, M. SUDLITZ. **Research laboratory and feasibility study for industrial wastewater effluents treatment by radiation**. Centre for Radiation Research and Technology, Institute of Nuclear Chemistry and Technology - Warsaw, Poland, 2018. In: IAEA-TECDOC-1855. Vienna, Austria, 2018. Disponível em: <[https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:50033001](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:50033001)> Acesso em: 05 nov. 2019.
- [14] Eb-Tech Co., Ltd. **Environment System**. Disponível em: <[http://www.eb-tech.com/?page\\_id=557](http://www.eb-tech.com/?page_id=557)>. Acesso em: 05 nov. 2019.
- [15] High Voltage Environmental Applications, Inc. – **High-Energy Electron Beam Irradiation**. Disponível em: <<https://clu.in.org/products/site/ongoing/emertech/highvolt.htm>>. Acesso em: 05 nov. 2019.
- [16] TERAAMBIENTAL. **Conheça o método adequado de transporte e tratamento de efluentes**. Disponível em: <<https://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/bid/366939/conhe-a-o-m-todo-adequado-de-transporte-e-tratamento-de-efluentes>>. Acesso em: 05 nov. 2019.
- [17] BRASIL. Lei nº9605. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 12 de fevereiro de 1998. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9605.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm)>. Acesso em: 05 nov. 2019
- [18] TERAAMBIENTAL. **Confira os procedimentos para a coleta e transporte de resíduos para tratamento**. Disponível em: <<https://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/confira-os-procedimentos-para-a-coleta-e-transporte-de-residuos-para-tratamento>>. Acesso em: 17 jun. 2019.
- [19] ANANDAKRISHNAN, M. **Planning and popularizing science and technology for development**. United Nations. Tycooly Publishing, Oxford, 1985.
- [20] RELA, P.R. **Desenvolvimento de Dispositivo de irradiação para tratamento de efluentes industriais com feixe de elétrons**. 2003. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

[21] RELA, C.S. **Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica para implementação de uma unidade móvel para tratamento de efluentes industriais com feixe de elétrons**. 2006. 76p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

[22] ELECTRON BEAM TECHNOLOGY. **Cost assessment of e-beam wastewater treatment**. In: International Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Accelerators. Vienna, Austria 4 - 8 May 2009. Disponível em: < [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1433\\_CD/datasets/presentations/SM-EB-23.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1433_CD/datasets/presentations/SM-EB-23.pdf)>. Acesso em 05 nov. 2019.

[23] HAN, B.; KIM, S.; KIM, J. **Application and Economics of Electron Beam Wastewater Treatment**. Eb-Tech Co., Ltd., Daejeon, Republic of Korea. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/6312/7c364413b814fc613391c18394d90aa80d8f.pdf>>. Acesso em 05 nov. 2019.

[24] HAN, B.; KIM, S.; KIM, J. Application and Economics of Electron Beam Wastewater Treatment . **Presentation in International Symposium on the Utilization of Accelerators of IAEA, Dubrovnik, Croatia**. Eb-Tech Co., Ltd., Daejeon, Republic of Korea. Disponível em: < <https://pdfs.semanticscholar.org/6312/7c364413b814fc613391c18394d90aa80d8f.pdf>>. Acesso em 05 nov. 2019.

[25] BRASIL. Ministério das cidades. **Conselho Nacional de Trânsito – CONTRAN**. Resolução nº 210 de 13 de novembro de 2006. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 16 de novembro de 2006. Disponível em: < <https://www.sie.sc.gov.br/webdocs/deinfra/docs/aet/resolucao-210.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2019

[26] SÃO PAULO (Estado). **Companhia de Engenharia de Tráfego**. Cargas superdimensionadas. Disponível em: <<http://www.cetsp.com.br/consultas/caminhoes/cargas-superdimensionadas.aspx>>. Acesso em: 05 nov. 2019.

[27] BRASIL. Ministério da Infraestrutura. Departamento Nacional de Trânsito. Composições homologadas para o transporte de carga. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 16 de novembro de 2006. Disponível em: <[http://www.denatran.gov.br/download/Portarias/2009/PORTARIA\\_DENATRAN\\_63\\_09\\_ANEXOS.pdf](http://www.denatran.gov.br/download/Portarias/2009/PORTARIA_DENATRAN_63_09_ANEXOS.pdf)>. Acesso em: 19 mai. 2019



- [28] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Specific Safety Guide No. SSG-8. Radiation Safety of Gamma, Electron and X Ray Irradiation Facilities.** Disponível em: <[https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1454\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1454_web.pdf)> Acesso em: 05 nov. 2019
- [29] SALIMOV, R.A., CHEREPKOV, V.G., GOLUBENKO, J.I., KRAINOV, G.S., KORABELNIKOV, B.M., KUZNETSOV, S.A., KUKSANOV, N.K., MALININ, A.B., NEMYTOV, P.I., PETROV, S.E., PRUDNIKOV, S.N., VEIS, M.E.D.C. **high power electron accelerators of ELV-series: status, development, applications.** Radiation Physics and Chemistry 57 (2000) 661-665.
- [30] HAN, B., KIM, J., KANG, W., CHOI, J. S., & JEONG, K.-Y. Development of mobile electron beam plant for environmental applications. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 124, p.174-178, 2015.
- [31] TECNOGERA. **O que é um Sistema de refrigeração Chiller?**<<https://www.tecnogera.com/blog/o-que-e-um-sistema-de-refrigeracao-chiller>>. Acesso em: 05 nov. 2019.
- [32] Shimadzu do Brazil. **Equipamentos analíticos.** Disponível em: <<http://www.shimadzu.com.br>>. Acesso em 05 nov. 2019
- [33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Alumínio e suas ligas: Produtos extrudados – Propriedades mecânicas.** Segunda edição 28/02/2015. (NBR 7000:2005). Disponível em: <<https://edoc.site/nbr-7000-fev-2005-aluminio-e-suas-ligas-produtos-extrudados-propriedades-mecanicas-pdf-free.html>>. Acesso em 05 nov. 2019.
- [34] Belmetal – **Produtos e Soluções em Alumínio.** Transportes, Carroceria fechada – pág. PE-11 a PE-60. Disponível em <<http://www.belmetal.com.br/app/webroot/files/downloads/catalogs/archives/17/transportes.pdf>>. Acesso em 05 nov. 2019.
- [35] GOOGLE IMAGENS - **Chapa de duralumínio xadrez.** Disponível em: <<http://www.aluminioaltec.com.br/chapa-xadrez-de-aluminio>>. Acesso em 04 nov. 2019.
- [36] GOOGLE IMAGENS - **Placas de poliuretano.** Disponível em:<<https://www.terac.com.br/poliuretano/placas/placa-de-poliuretano-expandida-dens-32kgs-esp-25mm->

[m2?parceiro=8530&qclid=EAAlaQobChMI2eH3trzT5QIVjoORCh2fUA5xEAYYASABEqJn0vD\\_BwE](https://www.abacodivisorias.com.br/loja/produto/isolante-acustico-la-de-rocha/)>. Acesso em 05 nov. 2019.

[37] GOOGLE IMAGENS - **Placas de lã de rocha**. Disponível em: <<http://abacodivisorias.com.br/loja/produto/isolante-acustico-la-de-rocha/>>. Acesso em: 05 nov. 2019.

[38] INSTITUO DE PESQUIAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. Institucional – Notícias. **Vice-presidente da Rosatom vem ao IPEN-CNEN/SP para a entrega de prêmio inédito para América Latina – 06/06/2019. Disponível em:** <[https://www.ipen.br/portal\\_por/portal/interna.php?secao\\_id=38&campo=12252](https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=38&campo=12252)>. Acesso em: 05 nov. 2019.

[39] GOOGLE IMAGENS –**atomexpo2019trophy**. Disponível em: <[https://fr.sputniknews.com/sci\\_tech/201902281040190538-atomexpo-prix-russie-sotchi/](https://fr.sputniknews.com/sci_tech/201902281040190538-atomexpo-prix-russie-sotchi/)>. Acesso em: 05 nov. 2019.

[40] FraunhoferInstitut FEP and Schimdt-Seeger AG. E-ventusPureInnovation. Disponível em: <<http://www.e-ventus.de/Anlagen/451/>>. Acesso em: 05 nov. 2019.

[41] Truckvan. **Soluções**. Disponível em: <<http://truckvan.com.br>>. Acesso em 05 nov. 2019.

[42] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Radiation Treatment of Wastewater for Reuse with Particular Focus on Wastewaters Containing Organic Pollutants**. IAEA-TECDOC-1855. Viena, Austria, 2018. Disponível em: <<https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1855web.pdf>> Acesso em: 05 nov. 2019.

[42] IGAMI, M. P. Z. (Org) ; VIEIRA, M. M. F.(Org.) **Guia para a elaboração de teses e dissertações**: programa de Pós-graduação Tecnologia Nuclear – IPEN/USP . 3 ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2017. Disponível em:<[https://intranet.ipen.br/portal\\_por/conteudo/biblioteca/arquivos/NOVO\\_GUIA\\_TESSES E DISSERTACOES.pdf](https://intranet.ipen.br/portal_por/conteudo/biblioteca/arquivos/NOVO_GUIA_TESSES_E DISSERTACOES.pdf)> Acesso em: 05 nov. 2019

[43] LAS CASAS, A. **Tratamento de Efluentes Industriais Utilizando a Radiação ionizante de Acelerador Industrial de Elétrons e por adsorção com carvão ativado. Estudo Comparativo**. 2004. 86p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

**[44] HAN, B. Aplicação de E-BEAM na Coreia e Leste da Ásia.** In: NICSTAR 2015. Março, Mumbai, Índia, 2015. Disponível em : [http://iiaglobal.com/uploads/documents/S3.37%20Bumsoo%20Han%20\(EB%20Tech\).pdf](http://iiaglobal.com/uploads/documents/S3.37%20Bumsoo%20Han%20(EB%20Tech).pdf)> Acesso em: 05 nov. 2019.

## ANEXOS

### Design and construction of a mobile irradiation unit for the treatment of industrial effluents in Brazil

Lainetti, F. F.<sup>1</sup>; Duarte, C. L.<sup>1</sup>; Somessari, S. L.<sup>1</sup>; Sprenger, F. E.<sup>1</sup>; Feher, A.<sup>1</sup>; Sampa, M. H. O.<sup>1</sup>; Fuga, D.<sup>2</sup>; Rodrigues, M.<sup>2</sup>; Calvo, W. A. P.<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Nuclear and Energy Research Institute, Radiation Technology Center  
(IPEN-CNEN/SP)

<sup>2</sup> Truckvan Industry  
[fabilainetti@usp.br](mailto:fabilainetti@usp.br)

#### Abstract

In the world, there is a growing increase in the demand for water for human consumption, as well as the prioritization of the use of available water resources for public supply. According to the 2010 UNEP (United Nations Environment Program) report, 2 million t of sewage, industrial and agricultural waste are dumped into the waterways worldwide. In developing countries, such as Brazil, about 90% of wastewater is dumped untreated into rivers, lakes or oceans. Therefore, it is necessary to adopt strategies that aim to maximize the use of water resources and minimize the negative impacts related to the generation of effluents by the industries. The needs to preserve the environment as well as the quest for sustainable development have generated various actions by non-governmental groups and changes in legislation in many countries. As a consequence, restrictions have been imposed regarding the release of effluents into the environment. Currently, several technologies are used in the treatment of industrial effluents for recovery and reuse of these waters. The Nuclear and Energy Research Institute (IPEN-CNEN/SP) decided to develop and build a mobile beam irradiation unit for the treatment of industrial effluents. The mobile unit will have as one of its main advantages the possibility of treating effluents in the place where the source is located, eliminating costs and bureaucratic problems associated with the transportation of waste, besides publicizing the technology in several places in Brazil. To implement the project, IPEN-CNEN/SP -CNEN/SP has been consolidating partnerships with national and international companies. The resources for the development of the unit have been supplied by the Brazilian Innovation Agency (FINEP) and International Atomic Energy Agency, financing the "IAEA TC Project BRA1035 – Mobile electron beam accelerator to treat and recycle industrial effluents". The Institute hired a specialized company – Truckvan – for the unit design and development. Several meetings have been realized with the company and the IAEA experts aiming the compatibility of the design and the exchange of information necessary for the project development. Regarding the mobile lab, several layout options have been developed to better meet the needs of each device and its users. The layout has been discussed with the objective of facilitating the maintenance of the equipment; the well-being and ergonomics of operators; optimization of spacing and also to make compatible the need for the presence of equipment and space for operators. Thus, several studies have been prepared to allow the discussion between the areas involved and to optimize the project, as well as the visualization of the spaces available. In this paper is presented the approach adopted for the architectural design of a mobile irradiation unit in Brazil.

**Keywords:** Mobile accelerator, electron beam, industrial effluents, IAEA TC Project BRA1035, wastewater treatment.

# Architectural design of a mobile irradiation unit for the treatment of industrial effluents in Brazil

Lainetti, F. F. <sup>1</sup>; Duarte, C. L. <sup>1</sup>; Somessari, S. L. <sup>1</sup>; Sprenger, F. E. <sup>1</sup>; Feher, A. <sup>1</sup>; Sampa, M. H. O. <sup>1</sup>; Gaspar, R. R. <sup>1</sup>; Fuga, D. <sup>2</sup>; Rodrigues, M. <sup>2</sup>; Calvo, W. A. P. <sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Nuclear and Energy Research Institute, Radiation Technology Center (IPEN/CNEN-SP)

<sup>2</sup> Truckvan Industry

fablainetti@usp.br; wapcalvo@ipen.br

## OBJECTIVES

The aim of this study is to develop an architectural design of a mobile electron beam irradiation unit at the Nuclear and Energy Research Institute (IPEN-CNEN/SP) in partnership with the Truckvan Industry, which is known to have experience in this business area. Moreover, this study will also design an internal layout of the mobile unit, focusing on the constructive characteristics, on the materials used in the construction and on the specified equipment that will be installed for industrial effluents treatment and samples analysis.

## INTRODUCTION

In the world, there is a growing increase in the demand for water for human consumption, as well as the prioritization of the use of available water resources for public supply. In developing countries, such as Brazil, about 90% of wastewater is dumped untreated into rivers, lakes or oceans. Therefore, it is necessary to adopt strategies that aim to maximize the use of water resources and minimize the negative impacts related to the generation of effluents by the industries.

The Radiation Technology Center at the Nuclear and Energy Research Institute (IPEN-CNEN/SP) decided to develop and build a mobile electron beam irradiation unit for the treatment of industrial effluents. The mobile unit will have as one of its main advantages the possibility of treating effluents in the place where the source is located, eliminating costs and bureaucratic problems associated with the transportation of waste, besides publicizing the technology in several places in Brazil. To implement the project, IPEN-CNEN/SP has been consolidating partnerships with national and international companies. The resources for the development of the unit have been supplied by the Brazilian Innovation Agency (FINEP) and International Atomic Energy Agency, supporting the IAEA TC Project BRA 1035 – Mobile electron beam accelerator to treat and recycle industrial effluents. The Institute has associated with a specialized industry (Truckvan) in a innovation project for the unit design and development.

## RESULTS

In the Figure 1 is shown the architectural design of the mobile electron beam irradiation unit developed by IPEN-CNEN/SP in partnership with Truckvan Industry.

The mobile unit is constitute by a cart, whose cargo compartment contains all the necessary equipment for the treatment of solid, liquid and gaseous wastes by electron beam irradiation. The idealized project divides the cart in the following modules: a) control room and laboratory for technical and scientific dissemination of the technology; b) industrial electron beam accelerator, hydraulic units, ventilation system, cooler and bunker with irradiation device; and c) transformer and power source supply.



Figure 2 - Internal layout of the laboratory analysis equipment.

To attend the installation necessities, several distribution trials and volumetric studies were done to optimize the area distribution. The layout has been discussed with the objective of facilitating the maintenance of the equipment; operators well-being and ergonomics; space optimization and also to make compatible the need for the presence of equipment and space for operators. A 3D model study of the space of the control room and laboratory was done to facilitate understanding. The internal distribution of the laboratory analysis equipment (GC/MS, TOC and UV-vis) is shown in the figure 2.

After evaluate the volume and area from all equipment in the mobile unit, it was possible to initiate the truck structural design. This project was performed by the engineers at IPEN-CNEN/SP in partnership with Truckvan Industry.



Figure 3 – Construction of the mobile electron beam irradiation unit.

With the truck frame done, it was possible to build the mobile unit trunk. All the external finish of the mobile unit was done with a white paint and then, an adhesive was applied to the visual identification as show in the Figure 3.

Inside the mobile unit, polyurethane plates and stone wool were used in the walls and ceiling for thermic isolation. The whole unit ceiling, walls from control room, analytic laboratory and technical-scientific disclosure, which is localized in the front of the trunk, were coated with medium density fibreboard (MDF) plates and white Formica®. In the remainder of the mobile unit, in the place where the heavy equipment are and the place where the industrial effluents treatment will occur, the internal walls were coated with plaid duraluminium plates.

## CONCLUSIONS

The project of the mobile electron beam irradiation unit is not fully completed as some technical information such as the equipment models, dimensions and installation characteristics are required to finish and still need to be confirmed by some manufactures. The absent equipment are from the radiological shielding (NUCLEP Industry), the industrial electron beam accelerator of 700 keV and 20 kW (EBTech, Co), the irradiation device and the activated carbon filter.

Although the project is not completed, it is possible to confirm that after being built, the new installation will allow IPEN-CNEN/SP to enter into a new and significant range of activity, with a relevant importance for the environment preservation.

## ACKNOWLEDGES

Financial support of the IAEA, FINEP and IPEN-CNEN/SP in this R&D project.



Figure 1 – Architectural design of the mobile electron beam irradiation unit.

**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.