



**AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO DE IRRADIAÇÃO  
PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS  
COM FEIXE DE ELÉTRONS**

**PAULO ROBERTO RELA**

Tese apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de  
Doutor em Ciências na Área de  
Tecnologia Nuclear - Aplicações

Orientadora:  
Dra. Maria Helena de Oliveira Sampa

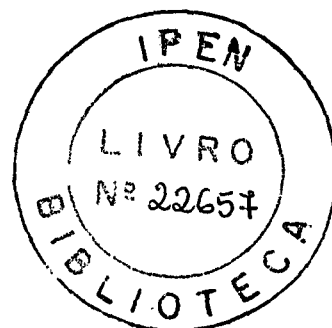
São Paulo  
2003

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO DE IRRADIAÇÃO  
PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS COM  
FEIXE DE ELÉTRONS**

**PAULO ROBERTO RELA**



**Tese apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de  
Doutor em Ciências na Área de  
Tecnologia Nuclear – Aplicações**

**Orientadora:**

**Dra. Maria Helena de Oliveira Sampa**

**São Paulo  
2003**

*Dedico este trabalho aos meus pais pelo exemplo de vida, à minha esposa e filhas que incentivaram à sua conclusão.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente contribuíram para que fosse possível a realização do presente trabalho e especialmente :

À Dra. Maria Helena de Oliveira Sampa pela sua preciosa orientação, incentivos constantes e amizade

Ao Dr. Valdir Sciani pela orientação inicial e amizade.

Ao MSc. Fábio Eduardo da Costa pelo empenho, motivação e a valiosa construção do sistema dosimétrico e aquisição de dados.

À Dra. Celina Lopes Duarte, pela realização dos ensaios de degradação de corantes e amizade

À Dra. Margarida Mizue Hamada , MSc. Nelson Minori Omi e Sr. Eduardo Pavão Araújo pelas contribuições na finalização deste trabalho.

À Eng<sup>a</sup>. Elisabeth Somessari e ao Eng Carlos Gaia pelo profissionalismo e dedicação na operação do acelerador de elétrons e dispositivos de irradiação.

Ao MSc. Wilson A.P. Calvo coordenador do Centro de Tecnologia das Radiações do IPEN pela infra-estrutura necessária à realização deste trabalho e amizade.

Ao Dr. Roberto Fulfaro titular da Diretoria Técnica do IPEN pelo incentivo e amizade.

À Agencia Internacional de Energia Atômica pelo financiamento do projeto e ao Dr. Paulo Barreto pela confiança e amizade.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Comissão Nacional de Energia Nuclear pela minha formação profissional.

# DEVELOPMENT OF AN IRRADIATION DEVICE FOR ELECTRON BEAM WASTEWATER TREATMENT

PAULO ROBERTO RELA

## ABSTRACT

When domestic or industrial effluents with synthetic compounds are disposed without an adequate treatment, they impact negatively the environment with damages to aquatic life and for the human being. Both population and use of goods and services that contribute for the hazardous waste are growing. Hazardous regulations are becoming more restrictive and technologies, which don't destroy these products, are becoming less acceptable. The electron beam radiation process is an advanced oxidation process, that produces highly reactive radicals resulting in mineralization of the contaminant. In this work was developed an irradiation system in order to optimize the interaction of electron beam delivered from the accelerator with the processed effluent. It is composed by an irradiation device where the effluent presents to the electron beam in an up flow stream and a process control unit that uses the calorimetric principle. The developed irradiation device has a different configuration from the devices used by others researchers that are working with this technology. It was studied the technical and economic feasibility, comparing with the literature the results of the irradiation device demonstrated that it has a superior performance, becoming an process for use in disinfection and degradation of hazardous organic compounds of wastewater from domestic and industrial origin, contributing as an alternative technology for Sanitary Engineering.

# DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO DE IRRADIAÇÃO PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS COM FEIXE DE ELÉTRONS

PAULO ROBERTO RELA

## RESUMO

Quando as águas residuárias ou efluentes industriais contendo compostos sintéticos, são lançados sem tratamento adequado em um corpo receptor, provocam profundos danos tanto à vida aquática quanto ao homem. A população e a utilização de produtos e serviços que contribuem para produção de efluentes perigosos está crescendo, as leis que regulamentam o destino final destes produtos estão cada vez mais restritivas e as tecnologias que não os degradam, estão se tornando cada vez menos aceitáveis. A radiação ionizante por meio feixes de elétrons é um processo oxidativo avançado, gerando radicais altamente reativos, apresentando-se como uma tecnologia eficiente na mineralização destes contaminantes. Neste trabalho desenvolveu-se um sistema de irradiação com o propósito de otimizar a interação do feixe de elétrons fornecido pelo acelerador com o produto a ser tratado, sendo constituído de um dispositivo de irradiação, que opera em fluxo ascendente oposto ao movimento do feixe de elétrons e de uma unidade de controle do processo, utilizando o princípio da calorimetria. O dispositivo desenvolvido apresenta configuração ímpar aos demais dispositivos utilizados por pesquisadores de outros países que militam nessa área. Estudou-se a viabilidade técnica e econômica e os resultados da avaliação demonstram que o dispositivo tem uma eficiência superior aos registrados na literatura, tornando-o disponível na desinfecção e degradação de agentes poluidores de águas de abastecimento, águas residuárias e lodos provenientes de estações de tratamento de esgotos contribuindo com uma metodologia alternativa para a Engenharia Sanitária.

# SUMÁRIO

	Página
<b>Lista de Tabelas</b> .....	i
<b>Lista de Figuras</b> .....	ii
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. QUÍMICA DAS RADIAÇÕES.....	2
1.2. EFEITOS DAS RADIAÇÕES NOS MATERIAIS.....	4
1.3. PROCESSAMENTO POR RADIAÇÃO IONIZANTE.....	11
1.3.1. Tipos de radiação ionizante.....	12
1.3.2. Penetração da radiação ionizante.....	14
1.3.3. Taxa de dose.....	15
1.4. ESTADO DA ARTE.....	15
1.4.1. Técnicas alternativas.....	18
1.4.2. Técnicas similares desenvolvidas.....	20
1.4.3. Tipos de irradiadores.....	28
1.4.4. Eficiência dos dispositivos de irradiação desenvolvidos.....	30
1.5. OBJETIVOS.....	31
1.6. CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS.....	32
<b>2. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	33
2.1. PLANTA PILOTO.....	33
2.2. ACELERADOR INDUSTRIAL DE ELÉTRONS.....	36
2.3. SISTEMA DE BOMBEAMENTO.....	39
2.4. SISTEMA DE IRRADIAÇÃO.....	41

	Página
2.4.1. Dispositivos de irradiação.....	42
2.4.2. Penetração do feixe de elétrons.....	44
2.4.3. Dimensionamento hidráulico dos sistemas de irradiação.....	47
2.4.4. Materiais utilizados na construção dos dispositivos de irradiação.....	55
2.4.5. Dispositivos de irradiação desenvolvidos.....	56
2.4.5.1. Primeiro dispositivo de irradiação.....	56
2.4.5.2. Segundo dispositivo de irradiação.....	59
2.4.5.3. Terceiro dispositivo de irradiação.....	61
2.4.6. Sistema de controle dosimétrico.....	65
2.4.6.1. Circuito eletrônico.....	67
2.4.7. Rendimento dos dispositivos de irradiação.....	71
2.4.8. Avaliação do Sistema de Irradiação.....	73
2.5. VIABILIDADE ECONÔMICA.....	75
2.5.1. Estimativa de custo.....	76
<b>3. RESULTADOS.....</b>	<b>79</b>
<b>3.1. EXPERIMENTOS REALIZADOS COM DISPOSITIVOS DE IRRADIAÇÃO.....</b>	<b>79</b>
3.1.1. Testes de desempenho do primeiro dispositivo.....	79
3.1.2. Testes de desempenho do segundo dispositivo.....	81
3.1.3. Testes de desempenho do terceiro dispositivo.....	84
<b>3.2. VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DO DISPOSITIVO DE IRRADIAÇÃO E DO SISTEMA DOSIMÉTRICO.....</b>	<b>93</b>

	Página
3.2.1. Estabilidade.....	93
3.2.2. Tempo de Resposta do Sistema Dosimétrico.....	100
3.2.3. Verificação do sistema dosimétrico.....	101
3.3. CUSTO UNITÁRIO DE PROCESSAMENTO.....	105
<b>4. ANÁLISE DOS DADOS.....</b>	<b>109</b>
4.1. DESEMPENHO DOS DISPOSITIVOS DE IRRADIAÇÃO.....	109
4.1.1. Desempenho do primeiro dispositivo de irradiação.....	109
4.1.2. Desempenho do segundo dispositivo de irradiação.....	110
4.1.3. Desempenho do terceiro dispositivo de irradiação.....	111
4.2. VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DO DISPOSITIVO DE IRRADIAÇÃO.....	112
4.3. TEMPO DE RESPOSTA DO SISTEMA DOSIMÉTRICO.....	113
4.4. VERIFICAÇÃO DO SISTEMA DOSIMÉTRICO.....	114
4.5. CUSTO UNITÁRIO DE PROCESSAMENTO.....	116
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>122</b>
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	123
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>124</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>130</b>
Anexo 1- Desenho CTR-0028/0000-I-3.00 .....	130
Anexo 2- Desenho TE-9725/000-I-3.....	131

## LISTA DE TABELAS

		Página
01	Eficiência teórica da conversão de raios X para alvo de Tungstênio.....	14
02	Relação de pesquisadores que desenvolveram dispositivos de irradiação para tratamento de efluentes por meio de feixe de elétrons e respectivos valores alcançados na eficiência de irradiação.....	30
03	Valores de “stopping power” e alcance dos elétrons para o meio água.....	47
04	Valores da altura $H$ do vertedor tipo parede delgada em função da vazão.....	51
05	Valores da altura $h$ do vertedor tipo parede espessa em função da vazão .....	51
06	Custos do investimento inicial para instalação de aceleradores de elétrons.....	77
07	Custos operacionais de aceleradores de elétrons com energias de 0,5MeV; 1,0MeV e 1,5MeV.....	78
08	Resultados do experimento de irradiação com o primeiro dispositivo de irradiação com otimização dos parâmetros de operação.....	80
09	Resultados do experimento de irradiação com o segundo dispositivo de irradiação com otimização dos parâmetros de operação.....	82
10	Resultados dos experimentos para vazões 30L/min e 60L/min do segundo dispositivo de irradiação .....	83
11	Resultados dos ensaios do terceiro dispositivo de irradiação utilizando-se o espaçamento $A$ das aletas de direcionamento do fluxo-circuito aberto .....	85
12	Resultados dos ensaios do terceiro dispositivo de irradiação com espaçamento $B$ das aletas de direcionamento de fluxo - <i>circuito aberto</i> .....	87

	Página
13 Resultados dos testes com condições operacionais otimizadas do terceiro dispositivo de irradiação- <i>circuito aberto</i> .....	88
14 Testes do terceiro dispositivo de irradiação utilizando-se o espaçamento A das aletas de direcionamento do fluxo- <i>circuito fechado</i> .....	90
15 Resultados dos ensaios do terceiro dispositivo de irradiação com espaçamento B das aletas de direcionamento de fluxo - <i>circuito fechado</i> .....	91
16 Resultados dos ensaios do terceiro dispositivo de irradiação com espaçamento C das aletas de direcionamento de fluxo - <i>circuito fechado</i> .....	92
17 Resultados dos ensaios de estabilidade da eficiência do terceiro dispositivo de irradiação nas condições de otimizadas dos parâmetros operacionais e na configuração <i>circuito aberto</i> .....	95
18 Resultados dos ensaios de estabilidade da eficiência do terceiro dispositivo de irradiação nas condições de otimizadas dos parâmetros operacionais e na configuração <i>circuito fechado</i> .....	96
19 Resultados dos ensaios de estabilidade da dose absorvida pelo efluente em função do tempo para o terceiro dispositivo de irradiação nas condições otimizadas dos parâmetros operacionais e configuração <i>circuito aberto</i> .....	98
20 Resultados dos ensaios de estabilidade da dose absorvida pelo efluente em função do tempo para o terceiro dispositivo de irradiação nas condições otimizadas dos parâmetros operacionais e configuração <i>circuito fechado</i> .....	99
21 Valores do fator de degradação do corante “Duacouro” para diferentes condições de irradiação.....	101
22 Ensaios de degradação do corante “Duacouro” e eficiência do terceiro dispositivo de irradiação em função da energia de aceleração do feixe de elétrons para diferentes vazões e na configuração <i>circuito aberto</i> .....	103
23 Ensaios de degradação do corante “Duacouro” e eficiência do terceiro dispositivo de irradiação em função da energia de aceleração do feixe de elétrons para diferentes vazões e na configuração <i>circuito fechado</i> .....	104

	Página
24	Custo unitário de processamento do terceiro dispositivo de irradiação para diferentes energias de aceleração e configuração <i>circuito aberto</i> ..... 106
25	Custo unitário de processamento do terceiro dispositivo de irradiação para diferentes energias de aceleração e configuração <i>circuito fechado</i> ..... 107
26	Técnicas alternativas e características operacionais em comparação com a desenvolvida no IPEN..... 119
27	Resultados de desempenho e custo unitário dos sistemas de irradiação desenvolvidos..... 120

**LISTA DE FIGURAS**

		Página
01	Interação da radiação gama, raio X ou elétron com a eletrosfera de um átomo.	3
02	Ilustração de tipos de radiação ionizante utilizadas em processos industriais.	11
03	Desenho ilustrativo da planta de irradiação utilizando Cobalto-60 instalada na cidade de Geiselbullach-Alemanha.	21
04	Desenho esquemático do dispositivo de irradiação utilizado na planta de irradiação de Boston's Deer Island Water Treatment Plant.	22
05	Esquema do dispositivo de irradiação instalado na Miami-Dade Water and Sewer Authority's Virginia Key West Treatment Plant- USA.	23
06	Desenho esquemático da unidade móvel de tratamento de efluente pertencente a empresa High Voltage Environmental Applications, Inc.-USA.	24
07	Ilustração do dispositivo de irradiação que apresenta configuração semi-cilíndrica onde o efluente entra em contato direto com a janela do acelerador.	25
08	Esquema da planta piloto desenvolvida por Pikaev para o tratamento de efluente industrial com fluxo na forma de aerosol.	26
09	Esquema da planta piloto de irradiação combinando acelerador de feixe de elétrons com gerador de ozônio.	27
10	Desenho esquemático da Planta Piloto de Tratamento de Efluentes do Centro de Tecnologia das Radiações do IPEN.	35
11	Diagrama elétrico de um circuito dobrador de tensão.	37
12	Esquema elétrico de associação de circuitos dobradores de tensão.	37
13	Diagrama funcional do acelerador de elétrons RDI (1,5MeV).	39

	Página
14	Diagrama funcional do circuito hidráulico e foto do painel de controle. 40
15	Medidor de vazão e posicionamento na Planta Piloto. 41
16	Esquema básico do dispositivo de irradiação desenvolvido neste trabalho. 43
17	Representação de um tubo de corrente, no qual escoam um fluido. 48
18	Representação de um vertedor de parede delgada com abertura retangular de escoamento do líquido. 49
19	Representação de um vertedor de parede espessa com abertura retangular de escoamento do líquido. 50
20	Poder de penetração do feixe de elétrons em função da energia, sobreposto ao gráfico da altura de carga do vertedor de parede delgada em função da vazão de efluente que passa através do sistema de irradiação. 52
21	Poder de penetração do feixe de elétrons em função da energia, sobreposto ao gráfico da altura de carga do vertedor de parede espessa em função da vazão de efluente que passa através do sistema de irradiação. 53
22	Desenho esquemático mostrando um corte transversal do primeiro dispositivo de irradiação construído. 58
23	Posição dos sensores de temperatura do primeiro dispositivo de irradiação. 58
24	Desenho esquemático mostrando um corte transversal do segundo dispositivo de irradiação construído. 60
25	Segundo dispositivo de irradiação com indicação da soleira do vertedor. 61
26	Desenho esquemático mostrando um corte transversal do terceiro dispositivo de irradiação construído. 63
27	Diferentes posições do terceiro dispositivo de irradiação construído. 64

	Página	
28	Dispositivo de irradiação montado sob o “scan horn” do acelerador de elétrons no interior da câmara de irradiação.	64
29	Elemento sensor térmico montado em acoplamento.	68
30	<i>Esquema elétrico do circuito utilizado no calorímetro</i>	69
31	Eficiência do primeiro dispositivo de irradiação em função da energia de aceleração do feixe de elétrons para diferentes vazões do efluente.	80
32	Eficiência do segundo dispositivo de irradiação em função da energia de aceleração do feixe de elétrons para diferentes vazões do efluente.	81
33	Eficiência do segundo dispositivo de irradiação em função da energia de aceleração do feixe de elétrons para vazões de 30L/min e 60L/min.	84
34	Testes com o terceiro dispositivo de irradiação com espaçamento A das aletas de direcionamento de fluxo com a na configuração <i>circuito aberto</i> (sem a janela de titânio).	86
35	Testes com o terceiro dispositivo de irradiação com espaçamento B das aletas de direcionamento de fluxo com a configuração <i>circuito aberto</i> (sem a janela de titânio).	87
36	Testes com o terceiro dispositivo de irradiação otimizado com espaçamento C das aletas de direcionamento de fluxo com a configuração <i>circuito aberto</i> (sem a janela de titânio).	89
37	Testes com o terceiro dispositivo de irradiação com espaçamento A das aletas de direcionamento de fluxo com a configuração <i>circuito fechado</i> (sem a janela de titânio)	90
38	Testes com o terceiro dispositivo de irradiação otimizado com espaçamento B das aletas de direcionamento de fluxo com a configuração <i>circuito fechado</i> (com a janela de titânio)	91
39	Testes com o terceiro dispositivo de irradiação otimizado com espaçamento C das aletas de direcionamento de fluxo com a configuração <i>circuito fechado</i> (com a janela de titânio)	92

	Página
40	Ensaio de eficiência em função da variação da dose do terceiro dispositivo de irradiação com parâmetros de operação otimizados e configuração <i>circuito aberto</i> . 93
41	Ensaio de eficiência em função da variação da dose para o terceiro dispositivo de irradiação com parâmetros de operação otimizados e configuração <i>circuito fechado</i> . 94
42	Valores das doses em função do tempo do terceiro dispositivo de irradiação nas condições de otimizadas dos parâmetros operacionais e na configuração <i>circuito aberto</i> . 97
43	Valores das doses em função do tempo do terceiro dispositivo de irradiação nas condições de otimizadas dos parâmetros operacionais e na configuração <i>circuito fechado</i> . 97
44	Ensaio do sistema dosimétrico para energia de 1,3MeV e corrente do feixe de elétrons de 4,0mA utilizando-se as configurações <i>circuito aberto</i> e <i>circuito fechado</i> . 100
45	Fator de degradação do corante "Duacouro" em função da dose absorvida pelo efluente para diferentes condições de irradiação. 102
46	Fator de degradação do corante "Duacouro" e eficiência em função da energia de aceleração do feixe de elétrons para a configuração de <i>caixa aberta</i> . 103
47	Fator de degradação do corante "Duacouro" e eficiência em função da energia de aceleração do feixe de elétrons para a configuração de <i>caixa fechada</i> . 104
48	Custo unitário de processamento em dólares americanos por metro cúbico processado em função da dose absorvida pelo efluente para a configuração <i>circuito aberto</i> . 108
49	Custo unitário de processamento em dólares americanos por metro cúbico processado em função da dose absorvida pelo efluente para a configuração <i>circuito fechado</i> . 108

## 1- INTRODUÇÃO

Quando as águas residuárias ou efluentes industriais são lançadas sem um tratamento adequado em um corpo receptor, provocam profundos danos tanto à vida aquática quanto ao homem, porque podem conter compostos orgânicos sintéticos em concentrações que podem chegar a níveis elevados em decorrência da bioacumulação, atingindo, assim, a cadeia alimentar. Muitos deles são tóxicos e além de serem fisiologicamente ativos, suspeita-se que também sejam carcinogênicos.

Um outro problema que merece destaque é a formação de trihalometanos (THM's) durante a desinfecção com cloro em sistemas de tratamento de águas e que são utilizadas para o abastecimento público. Os trihalometanos são formados pelos seguintes compostos orgânicos: clorofórmio ( $\text{CHCl}_3$ ), bromofórmio ( $\text{CHBr}_3$ ), diclorobromometano ( $\text{CHBrCl}_2$ ) e o dibromoclorometano ( $\text{CHClBr}_2$ ). Estes compostos são formados quando o cloro adicionado reage com ácidos húmicos e fúlvicos presentes em águas que contém excesso de matéria orgânica de origem vegetal <sup>1,2</sup>.

Pelas razões expostas acima, em todo mundo tem-se dado grande ênfase na identificação e monitoramento de contaminantes das águas bem como ao desenvolvimento de tecnologias para a remoção desses poluentes das águas de abastecimento e residuárias.

Entre as modernas tecnologias que podem ser utilizadas com sucesso na remoção de poluentes, a que utiliza a radiação ionizante, encontra-se em fase avançada de estudos em vários países tecnologicamente desenvolvidos.

Com o propósito de contribuir com uma metodologia alternativa no campo da Engenharia Sanitária, o IPEN se uniu com entidades dessa área, criando o Projeto de Tratamento de Efluentes Utilizando a Radiação Ionizante. O objetivo deste projeto é demonstrar a viabilidade técnica e econômica da utilização da radiação ionizante proveniente de feixe de elétrons de alta energia gerado em acelerador, na desinfecção e degradação de agentes poluidores de águas de abastecimento, águas residuárias e lodos provenientes de estações de tratamento de esgotos<sup>3,4</sup>.

Neste trabalho, no campo da engenharia, é estudada a seleção de equipamentos mais adequados para produção de campos intensos de radiação ionizante, realizados o projeto de concepção, desenhos e construção de dispositivos de irradiação, integrando-os com o propósito de maximizar e uniformizar a interação da radiação com o material a ser beneficiado, de modo a se obter a maior eficiência durante o processamento, viabilizando a técnica disponível com a minimização dos custos envolvidos.

## 1.1 - QUÍMICA DAS RADIAÇÕES

A radiação gama proveniente de isótopos radioativos, os elétrons e os raios X gerados nos aceleradores, são conhecidos como radiações ionizantes, que interagem com os produtos e no resultado de colisões com os elétrons orbitais que constituem os materiais dos produtos, perdem energia para esses elétrons, que por sua vez são excitados adquirindo níveis mais altos de energia ou são expulsos completamente de suas órbitas colidindo com outros elétrons orbitais, conforme ilustração da Figura 1.

Este processo complexo conduz a produção de uma grande quantidade de átomos excitados e de átomos eletricamente carregados, ou grupos de átomos denominados íons. Os produtos da ionização, os íons, os elétrons secundários, átomos e moléculas excitadas subsequentemente perderão suas energias para o meio que os circundam e se reverterem em estados estáveis de radicais livres.

A energia proveniente da radiação ionizante ao interagir com a camada de efluentes, ou outro material qualquer, é absorvida pelo meio e redistribuída entre os átomos e moléculas que o constituem, produzindo, entre outras espécies, os radicais livres  $H^+$  e  $OH^-$ , altamente reativos.

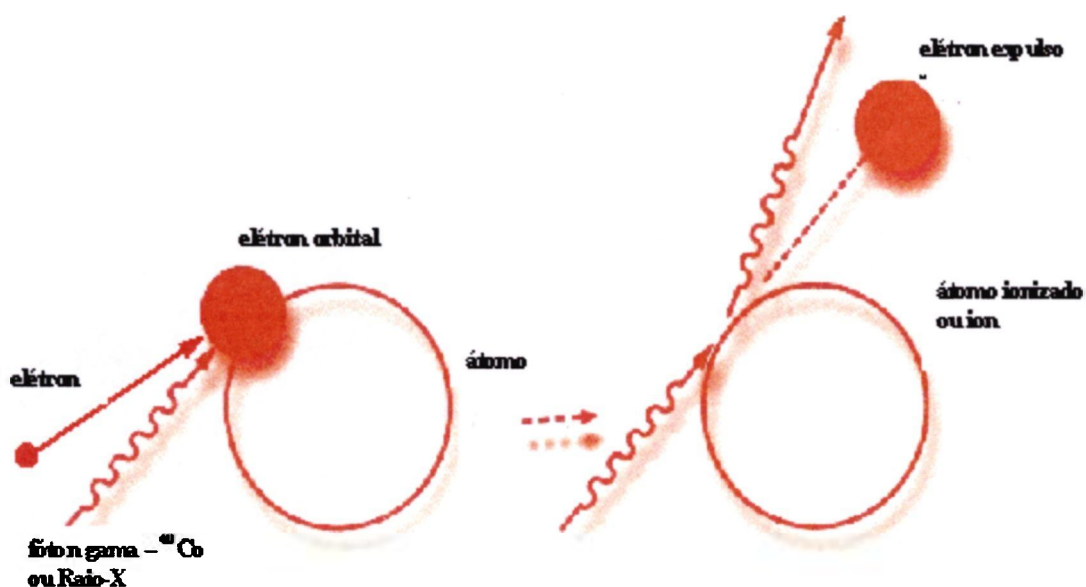


Figura 1: Interação da radiação gama, raio X ou elétron com a eletrosfera de um átomo.

No caso do tratamento de efluentes com radiações, os radicais ao interagirem com as moléculas produzirão oxidação, redução, dissociação e degradação. Os radicais livres podem combinar-se para formar algumas moléculas ativas, que são de grande utilidade para o tratamento da água, como é o caso do peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) e do ozônio ( $O_3$ ), produtos estes importantes também do ponto de vista de desinfecção.

A interação da radiação com os efluentes pode ser de modo direto ou indireto. A ação direta é considerada como a interação da radiação com a molécula-alvo, enquanto que a ação indireta ocorre quando a molécula alvo é

afetada por alguma espécie química formada após a interação da radiação com a água.

Especificamente na interação de feixe de elétrons com efluentes líquidos, a decomposição completa de um poluente é dependente de vários fatores: reatividade dos produtos primários da radiólise da água, presença de sais inorgânicos, compostos orgânicos, estrutura da molécula, temperatura, pH, concentração de oxigênio, a dose e a taxa de dose de irradiação.

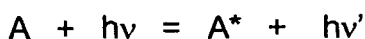
A fundamentação para o uso de feixes de elétrons de alta energia no campo da química das radiações<sup>5,6,7</sup>, mais especificamente nos efeitos da radiação em materiais, é apresentada a seguir de modo sumário.

## 1.2- EFEITOS DAS RADIAÇÕES NOS MATERIAIS

Os efeitos da irradiação nos materiais em geral, com a radiação ionizante são devidos ao grande número de interações da radiação com os átomos e moléculas. A principal interação é a ionização e é representada pela equação:



na qual o átomo **A** absorve a energia da interação da radiação para liberar seu elétron de ligação e tornar-se um íon carregado e essa energia de degradação pode continuar ionizando outros átomos durante a sua trajetória. Por exemplo, uma partícula de radiação (fóton) de 3,5MeV pode ionizar aproximadamente 100.000 átomos<sup>3</sup>. Se uma interação resulta na absorção de somente uma parte da energia de ionização, pode ocorrer um processo de excitação representado pela equação:



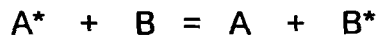
onde  $A^*$  é um átomo no seu estado excitado de energia com um elétron em uma órbita mais afastada (menor energia de ligação).

No evento da ionização, o átomo ionizado combina com o elétron livre para um estado excitado e esse átomo excitado retorna ao seu estado fundamental através de vários processos de relaxação, como por exemplo, por fluorescência:

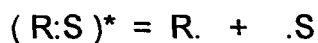


onde  $h\nu''$  é a energia liberada pelo elétron ao retornar de uma camada mais externa para a sua órbita mais interna.

Um outro processo é a transferência de energia:



onde  $B$  torna-se um átomo ou molécula excitada. Um outro processo importante de relaxação é a quebra de moléculas com ligações covalentes



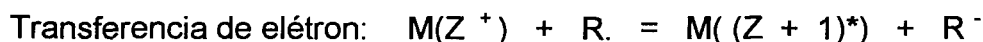
onde  $R\cdot$  e  $\cdot S$  são os radicais livres que possuem grandes energias de reatividade química.

Os radicais livres têm um importante papel no processo de tratamento por radiação, pois após a sua formação possuem uma vida muito curta mas muito ativa formando previamente as seguintes equações, pela interação com átomos e moléculas vizinhas<sup>5</sup>:

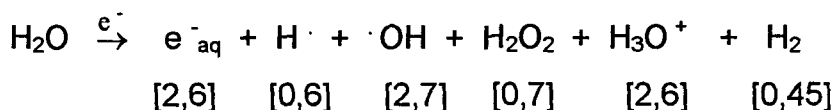




até que a energia dos radicais livres seja dissipada em um processo de terminação, tal como:



Para compostos puros, os efeitos resultantes são provenientes principalmente da ação direta, mas em soluções o principal mecanismo é a ação indireta da radiação. Para águas residuárias e de abastecimento o efeito da radiação deve ser relacionado principalmente com a interação da radiação com as moléculas de água e as espécies produzidas, apresentadas a seguir:



Ao contrário das reações fotoquímicas onde um fóton de luz inicia uma reação (molecular), um elétron de alta energia é capaz de iniciar milhares de reações para dissipar a sua energia. A eficiência de conversão de um elétron de alta energia, radiação ionizante, em um processo químico é definida como G (valores entre colchetes na reação acima). G é o número de radicais, estados excitados ou outros produtos, formados ou perdidos em um sistema após a absorção de 100eV de energia sendo esta unidade, representada pelo Sistema Internacional como: 1 molécula (100eV)<sup>-1</sup> ou 1,036x10<sup>-7</sup>molJ<sup>-1</sup>.

Entre os produtos formados na reação acima, os mais reativos são os redutores, elétron aquosos (e<sup>-</sup><sub>aq</sub>) e o átomo de hidrogênio (H) e o oxidante, radical hidroxila (·OH). Portanto, a química de interesse no processo de irradiação

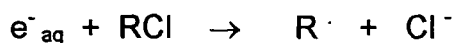
com feixe de elétrons de alta energia é aquela relacionada com essas três espécies.

### Elétron aquoso ( $e^-_{aq}$ )

O  $e^-_{aq}$  é um poderoso agente redutor e as suas reações são simples transferências de elétrons, apresentando a seguinte fórmula geral:



O  $e^-_{aq}$  reage com numerosos compostos químicos orgânicos e em particular com aqueles perigosos e tóxicos tais como os halogenados conforme a reação geral dessa equação:

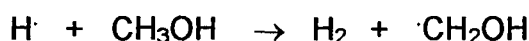


### Átomo de Hidrogênio

O H $\cdot$  provoca dois tipos de reações com os compostos orgânicos, a adição e a abstração de hidrogênio. Um exemplo de uma típica reação de adição é apresentada com o benzeno:



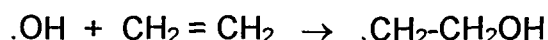
A segunda reação geral envolvendo o H $\cdot$  com metanol é abstração de hidrogênio:



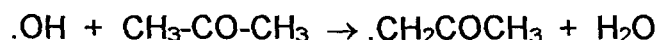
### Radical Hidroxila

O radical hidroxila pode provocar diversos tipos de reações com produtos químicos em soluções aquosas. Os tipos de reações que comumente ocorrem

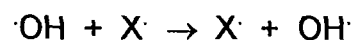
são adição, abstração de hidrogênio, transferência de elétrons e recombinação radical-radical. As reações de adição ocorrem facilmente com compostos aromáticos e alifáticos insaturados. Os compostos resultantes são radicais hidroxilados<sup>6</sup>:



As reações de abstração ocorrem com moléculas saturadas e muitas não saturadas, como por exemplos os aldeídos e cetonas:



As reações de transferência de elétrons são também comuns e ocorrerão quando soluções aquosas são irradiadas com elétrons de alta energia. Por exemplo, reações envolvendo íons halogênios ( $\text{X}^\cdot$ ) podem ocorrer como:



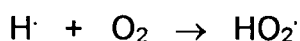
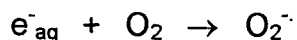
O radical  $\text{X}_2^\cdot$  pode rapidamente reagir com moléculas orgânicas formando compostos halogenados orgânicos. Os halogênios de maior interesse são o  $\text{Cl}^\cdot$  e o  $\text{Br}^\cdot$ . As reações do  $\cdot\text{OH}$  com os  $\text{Cl}^\cdot$  são insignificantes em soluções aquosas com pH acima de 2 e têm pouco interesse na aplicação do presente trabalho.

### Peróxido de Hidrogênio

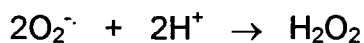
A reação que resulta na formação do  $\text{H}_2\text{O}_2$  é a recombinação radical-radical envolvendo o  $\cdot\text{OH}$ <sup>7</sup>:



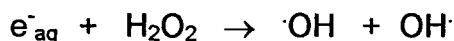
Uma segunda fonte de  $\text{H}_2\text{O}_2$  em soluções aquosas oxigenadas são as reações de  $e^-_{\text{aq}}$  e  $\text{H}^\cdot$  com  $\text{O}_2$ . Essas duas reações resultam na formação de oxigênio reduzido, o íon radical superóxido e/ou o ácido conjugado:



Os produtos dessas equações estão em equilíbrio e também levam a formação de  $\text{H}_2\text{O}_2$ :



A formação de  $\text{H}_2\text{O}_2$  durante o processo e a possibilidade da seguinte reação:



Os sólidos presentes em águas residuárias ou efluentes industriais podem ser concentrados por uma variedade de técnicas convencionais, como por exemplo: filtração, floculação, sedimentação, entre outros.

A radiação ionizante é capaz de aumentar a taxa de sedimentação ou alterar as características coloidais desses sólidos, pois em geral os colóides são estabilizados por cargas eletrostáticas que causam uma repulsão mútua entre as partículas que impedem a sua agregação em um tamanho suficiente no qual as forças de gravidade possam ocasionar uma sedimentação. A radiação produz um decréscimo ou destruição dessas forças eletrostáticas, pela produção de íons e elétrons livres que irão reagir com as espécies de carga oposta neutralizando a carga das partículas coloidais e causando conseqüentemente a sua sedimentação.

Simultaneamente, a radiação ionizante exerce um efeito letal nos microorganismos, bactérias, vírus, esporos e outros organismos como as algas, protozoários e parasitas, também através dos efeitos direto e indireto das radiações, cabendo destacar a existência de um alvo de ataque principal que é o material genético da célula, DNA e/ou RNA.

A medida da radiação ou melhor a dosimetria é feita em função da quantidade de radiação que interagem com a matéria, sendo a medida mais importante o da Dose Absorvida ( $D$ ) que é definida como a quantidade de energia ( $de$ ) que interage com uma certa quantidade de material ( $dm$ ) :

$$D = \frac{de}{dm} \quad (1.1)$$

A unidade de dose absorvida no Sistema Internacional é de Joule por quilograma e chamada de Gray (Gy) e na América do Norte ainda é utilizada a antiga unidade rad que é definida como sendo a energia de 100erg absorvida por um grama de material, esta unidade corresponde a um centésimo da unidade Gy, portanto  $1\text{Gy} = 100\text{rad}$ .

Os elétrons injetados nos processos de irradiação, interagem com a matéria e perdem energia em sucessivas interações, formando produtos radiolíticos. Existe uma extensa literatura sobre química da radiação que esclarecem os mecanismos básicos e as sequências das reações da maioria dos compostos orgânicos existentes nos efluentes industriais, sendo a relação mais importante que governa a formação de produtos radiolíticos é a que apresenta a eficiência da conversão da energia dos elétrons em um processo químico, que por sua vez é intimamente dependente da secção de choque (probabilidade de excitação e ionização) das soluções aquosas e de suas concentrações e definida como G.

### 1.3- PROCESSAMENTO POR RADIAÇÃO IONIZANTE

Na interação da radiação com os efluentes ocorrem reações complexas em frações de segundos, quando o material atravessa o campo de radiação produzida pelo feixe de elétrons. O bombardeamento de produtos por radiação gama, por raios X ou por elétrons são técnicas efetivas no processamento por radiação ionizante, sendo a principal diferença entre essas técnicas o tipo da radiação primária que interage com o produto a ser tratado, mostrado na Figura 2.

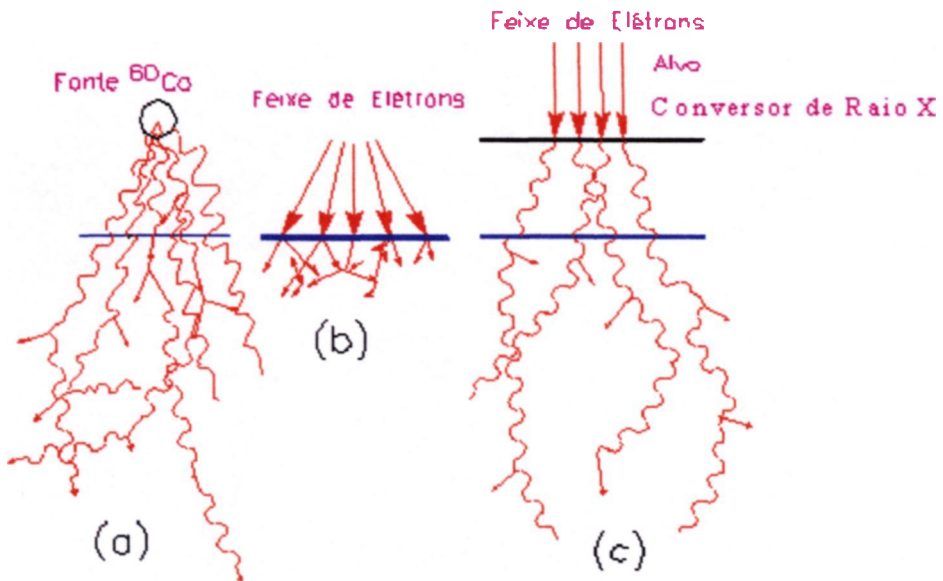


Figura 2: Ilustração de tipos de radiação ionizante utilizadas em processos industriais

Após a primeira interação, o mecanismo de transporte de energia no interior do produto é o mesmo para os três tipos de radiação, prevalecendo os elétrons secundários (elétrons expulsos de suas orbitas) que produzem a maioria das excitações e ionizações provocando os efeitos químicos.

### 1.3.1-Tipos de Radiação Ionizante

#### FONTES GAMA

Os irradiadores industriais utilizam o isótopo artificial  $^{60}\text{Co}$ , que é produzido em reatores nucleares. No decaimento radioativo natural o  $^{60}\text{Co}$  emite dois raios gama com energias de 1,17MeV e 1,33MeV. O principal uso dos irradiadores gama está focalizado na esterilização de produtos médicos e farmacêuticos, na redução de carga microbiana de especiarias, ervas medicinais, cosméticos e alimentos.

#### ELÉTRONS

Os elétrons são produzidos em aceleradores de elétrons, que podem ser definidos como sistemas onde se estabelece um potencial de alta voltagem entre um cátodo e um ânodo num tubo de vácuo. O cátodo emite feixe de elétrons, chamados raios catódicos ou feixes eletrônicos, que seguem o mesmo princípio do tubo de televisão, onde a grande diferença é que este último utiliza, aproximadamente, 25.000 volts de energia, enquanto o acelerador utiliza da ordem de milhões de volts.

É importante mencionar que os aceleradores de elétrons industriais disponíveis no mercado mundial são projetados e fabricados para usos específicos, podendo-se classificar os aceleradores por faixa de energia que definem suas características construtivas.

Os aceleradores de elétrons para aplicação industrial cobrem a faixa de energia de 0,3MeV a 10MeV, sendo que na faixa de 0,3MeV a 0,5MeV se encontram os aceleradores de baixa energia, tipo transformador no qual o potencial de aceleração é obtido a partir de indução eletromagnética como nos transformadores de tensão convencionais. A principal utilização destes aceleradores é na reticulação de polímeros constituintes de filmes finos para

embalagens tipo termoretrátil e também na cura de tintas e vernizes para recobrimento de diversos substratos.

Entre as faixas de baixa e alta energia, de 0,5MeV e 3MeV encontram-se as máquinas do tipo ICT (isolated core transform) e Dynamitron fabricadas pela Radiation Dynamics Inc. USA; são máquinas do tipo DC (corrente direta) que por serem máquinas industriais apresentam robustez e alta confiabilidade, permitindo uma disponibilidade operacional de no mínimo 8.000 horas por ano. As principais aplicações desses aceleradores de elétrons estão centradas na modificação da propriedades de polímeros, predominando a reticulação de isolantes de fios e cabos e de filmes para embalagens e pneus.

Na faixa de 3,0MeV a 10MeV encontram-se os aceleradores lineares do tipo Linac, onde ondas eletromagnéticas são injetadas em uma cavidade formando um guia de onda, permitindo em seu interior o surgimento de campos elétricos que se repetem em fase com o deslocamento dos elétrons, acelerando-os até altas energias (superior a 10MeV). Recentemente foi lançado comercialmente pela IBA (Bélgica) o acelerador tipo Rodhotron com eficiência superior aos Linacs, onde os elétrons descrevem órbitas circulares e ganham um incremento de energia a cada passagem pelo centro do acelerador até serem extraídos em direção ao alvo.

## RAIOS X

A geração dos raios X é feita em aceleradores, onde o feixe de elétrons incide sobre um alvo de material pesado gerando por efeito Bremsstrahlung os raios X. A eficiência deste tipo de gerador é bastante baixa, sendo que não mais do que as porcentagens apresentadas na Tabela 1 da energia dos elétrons incidentes se convertem em energia na forma de ondas eletromagnéticas (raios X).

Para os aceleradores industriais com conversores de raios X, a energia de aceleração dos elétrons é limitada em 5MeV com o propósito de não gerarem

fótons com energia que poderiam interagir com o núcleo de determinados elementos químicos (Cu, Zn, I, Se, entre outros)<sup>8</sup> constituintes dos materiais em processamento tornando-os radioativos.

TABELA 01– Eficiência teórica da conversão de raios X para alvo de Tungstênio<sup>9</sup>

Energia do Elétron Incidente (MeV)	Fator de Conversão para Raios X (%)
3	4,5
5	7,4
10	14,8

A principal aplicação industrial deste tipo de fonte de irradiação é em ensaios não destrutivos, radiografia de peças e estruturas metálicas que não requerem grande intensidade de radiação para a sensibilização dos filmes.

Na seleção da fonte apropriada de radiação ionizante para aplicação em processos industriais as variáveis descritas a seguir devem ser consideradas.

### 1.3.2 – Penetração da Radiação Ionizante

Para todas as fontes de irradiação a penetração da radiação ionizante é inversamente proporcional a densidade do produto a ser beneficiado. A espessura do material a ser tratado e a sua densidade são fatores determinantes na aplicação gama “versus” feixe de elétrons.

O poder de penetração do feixe de elétrons é menor do que o do gama. Por exemplo, para um material com densidade de  $1\text{g/cm}^3$  (semelhante a da água) o poder de penetração de um feixe de elétrons com energia de  $10\text{MeV}$  é de  $5\text{cm}$ , enquanto que para um irradiador gama utilizando  $^{60}\text{Co}$  com energia média de  $1,25\text{MeV}$  é de cerca de  $50\text{cm}$ <sup>10</sup>.

### 1.3.3- Taxa de Dose

Devido a característica do decaimento radioativo o processamento utilizando radiação gama ( $^{60}\text{Co}$ ) torna-o mais lento do que os que utilizam aceleradores de elétrons. Como exemplo, os irradiadores gama utilizados para esterilização e/ou redução de carga microbiana de diversos produtos e que operam em escala comercial, apresentam uma taxa de dose em torno de 20kGy/h em contraste com os aceleradores que apresentam uma taxa de dose muito maior chegando a 20kGy/segundo (72.000kGy/h) para um acelerador de energia de 10MeV e potência de 50kW <sup>11</sup>.

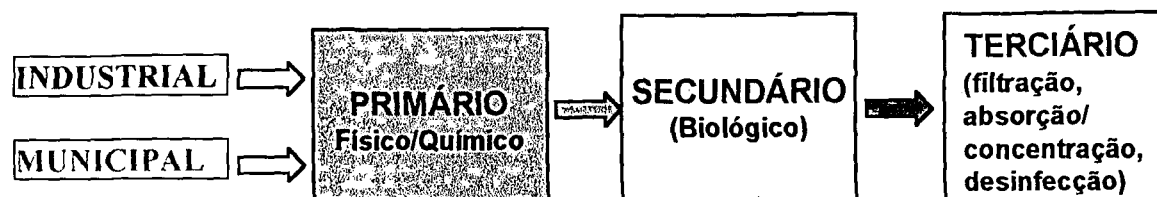
As considerações acima são determinantes do ponto de vista de desempenho técnico do processo a ser utilizado e dos valores dos exemplos acima apresentados, observa-se que a taxa de dose oferecida pelos aceleradores é predominante na seleção da fonte de irradiação. Além das variáveis técnicas apresentadas, outros fatores dos aceleradores de elétrons com relação as fontes radioativas são importantes na definição da fonte de irradiação, merecendo serem citados: otimização do capital investido, custos operacionais, segurança de operação e nível de aceitação pelo público.

## 1.4- ESTADO DA ARTE

Em se tratando de um desenvolvimento no campo da engenharia, a comparação de custos e eficiência do desenvolvimento do presente trabalho com sistemas similares que também utilizam feixes de elétrons e com técnicas alternativas que competem no tratamento de efluentes, é fundamental na análise dos resultados obtidos. Para tanto faz-se necessário a apresentação de modo sumário das técnicas concorrentes.

No tratamento de águas residuárias municipais e industriais a combinação de várias tecnologias podem ser aplicadas dependendo das características do

efluente e da qualidade desejada após o tratamento. De modo genérico seguem o seguinte esquema<sup>12</sup>:



Na fase de tratamento primário utilizam-se processos físico/químicos onde o efluente é preparado para a fase seguinte, que na maioria dos casos, emprega o processo biológico. Os processos físicos abrangem a remoção de sólidos em suspensão, areias, óleos e gorduras com a utilização de grades, peneiras (simples ou rotativas), caixa de areia, decantadores etc. Os métodos químicos e físico-químicos são utilizados para a remoção de material coloidal, cor, turbidez, odor ácidos, álcalis, metais pesados e óleos, onde a neutralização do efluente é necessária para evitar o lançamento de águas ácidas ou alcalinas no corpo receptor mas, também como medida necessária para proteção de tratamentos a jusante<sup>12</sup>.

Na fase de tratamento secundário predominam os processos biológicos que dividem-se em aeróbios e anaeróbios. Nos processos aeróbios a decomposição da matéria orgânica dos efluentes é realizada por microrganismos. Os processos aeróbios são os que utilizam microrganismos aeróbios e facultativos e podem ser classificados como lodos ativados, filtro biológico e lagoa de estabilização aeróbia. Nos processos anaeróbios a decomposição da matéria orgânica é feita na ausência de oxigênio, sendo a principal aplicação na digestão de rejeitos industriais de alta carga orgânica.

A fase de tratamento terciário tem o propósito de se obter um efluente de alta qualidade ou promover a remoção de substâncias recalcitrantes das fases anteriores. Os processos de tratamento terciários mais utilizados são: adsorção em carvão ativo, osmose reversa, eletrodialise, troca iônica, ultrafiltração, oxidação química e remoção de agentes patogênicos.

A radiação ionizante proveniente de feixes de elétrons gerados em aceleradores, apresentando a característica de produzir, durante o processo, espécies altamente reativas, pode ser aplicada em diferentes fases do tratamento de efluentes industriais e ou municipais:

- na fase de tratamento terciário: como processo eficiente de desinfecção de agentes patogênicos eliminando a necessidade de cloração do efluente, ou como processo oxidativo avançado atuando na destruição de compostos orgânicos recalcitrantes.;
- na fase de tratamento primário: neutralizando efluentes industriais por meio da decomposição de compostos orgânicos que podem causar choques aos microrganismos presentes nos tratamentos biológicos. Este processo de neutralização não requer a adição de reagentes químicos e também é um eficiente agente precipitador.

Estas aplicações apresentam grandes contrastes em comparação com os métodos tradicionais, os quais requerem a introdução de outras substâncias, como por exemplo, o cloro para a desinfecção e o cloreto férrico ou polímeros para a separação de lodo. Em determinadas técnicas usuais como absorção por carvão ativado e nitrificação-desnitrificação biológica o contaminante é apenas transferido de um meio para outro sem que ocorra a sua destruição.

Atualmente vários fatores contribuem para agravar os problemas causados por efluentes perigosos, é crescente o aumento da população bem como a utilização "per capita" de produtos e serviços considerados perigosos. A cada dia aumenta a quantidade de produtos considerados perigosos para o meio ambiente e em paralelo as regulamentações sobre o destino destes produtos apresentam-se mais restritivas. Como consequência, as tecnologias que não degradam estes produtos tornam-se menos aceitáveis e as soluções para enfrentar estes problemas consistem no desenvolvimento de novas tecnologias que sejam eficientes e econômicas.

Focalizando as recentes tecnologias, denominadas como processos oxidativos avançados, dedicadas para o tratamento de efluentes industriais, municipais, tratamento de água potável e efluentes contaminados de hospitais, as técnicas a seguir mencionadas apresentam-se como alternativas eficientes para promoverem a desinfecção de microorganismos e a destruição de compostos orgânicos. Cabe observar que o tratamento por radiação ionizante também se enquadra na categoria de processos oxidativos avançados.

#### 1.4.1- Técnicas Alternativas

**OXIDAÇÃO SUPERCRÍTICA DA ÁGUA<sup>13</sup>:** Conhecido como SCWO (“Supercritical Water Oxidation”) o processo tem como princípio a combustão, na presença de oxigênio, de produtos orgânicos, biológicos e alguns materiais inorgânicos em suspensão ou dissolvidos em água. O processo ocorre em um sistema fechado com pressão e temperatura acima do ponto crítico da água (217 bar, 374° C). Neste ambiente a viscosidade da água é cerca de 20 vezes menor do que o normal, aumentando a difusividade molecular por um fator 10 e também as propriedades de transporte de massa e de solvente da água, tornando a água completamente miscível com gases como dióxido de carbono e oxigênio.

Esta propriedade faz com que os compostos orgânicos sejam solúveis e que a mistura da reação de combustão ocorra em fase homogênea provocando a completa oxidação, mesmo para baixas concentrações de contaminantes. A faixa de concentração admissível varia de 0,1ppm a 100.000ppm. O processo SCWO ocorrendo em temperaturas menores do que as de incineração, não produz a formação de óxidos de nitrogênio. Para a capacidade de processamento de 100 toneladas por dia de efluente líquido, o custo da instalação é de US\$20,2 milhões (dólares americanos) e o custo unitário do tratamento de US\$66/kgal(mil galões) ou US\$17,4/m<sup>3</sup>.

**GENESYST GPV SCWO<sup>13</sup>:** Trata-se de uma variação do processo SCWO-GPV (“gravity pressure vessel”) onde o reator aberto é posicionado a uma

profundidade de 1.500m a 3.600m abaixo do nível do solo. Esta configuração permite o processamento contínuo de efluentes líquidos e lodos abrasivos que não podem ser bombeados à elevada pressão por métodos economicamente viáveis.

O posicionamento no subsolo aumenta as margens de segurança no que se refere a contenção de vazamentos e de falhas catastróficas. O processo GPV não requer permissão para sua utilização por parte da EPA (Environmental Protection Agency-USA) e não produz odores, gases  $\text{NO}_x$ , CO ou outros gases. Para a capacidade de processamento de 1.000gpm (galões por minuto) ou  $3,78\text{m}^3/\text{min}$ , o custo da instalação é de US\$46,6milhões e o custo unitário de tratamento de US\$29,07/kgal ou US\$7,67/ $\text{m}^3$ .

**UV/ $\text{O}_3$ / $\text{H}_2\text{O}_2$  OXIDATION<sup>13</sup>:** Este processo conhecido como ULTROX combina quantidades de agentes oxidantes  $\text{O}_3$  (ozônio) e  $\text{H}_2\text{O}_2$  (peróxido de oxigênio) com a catálise de luz UV (ultravioleta) para destruição de contaminantes orgânicos presentes em água. A luz ultravioleta transforma o ozônio e o peróxido de oxigênio em radicais altamente reativos ( $\text{OH}\cdot$ ), que oxidam os contaminantes orgânicos transformando-os em dióxido de carbono, água e traços de sais inorgânicos. Em adição, a luz UV pode excitar o soluto orgânico para níveis elevados, tornando-os fáceis de serem oxidados. O processo apresenta-se apropriado para baixos níveis de contaminação de compostos orgânicos com concentração de 0,01ppm a 150ppm.

A maior desvantagem deste processo é a necessidade de tratar o efluente previamente antes de ser processado. Emulsões de óleo/água devem ser quebradas, materiais em suspensão devem ser removidos, a faixa do pH deve ser ajustada, metais devem ser removidos e requerem geradores especiais de ozônio e também neutralizadores de modo a não haver liberação de ozônio para a atmosfera. Não é economicamente viável para o tratamento de águas contaminadas com tetracloreto de carbono e clorofórmio. Para a capacidade de processamento de 1.000gpm ( $3.785\text{L}/\text{min}$ ), o custo da instalação é da ordem de US\$500mil e o custo unitário do tratamento US\$0,24/kgal ou US\$0,06/ $\text{m}^3$ .

UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> OXIDATION<sup>13</sup>: Este processo segue o mesmo princípio do apresentado anteriormente com bom desempenho para concentrações entre 1ppm a 10.000ppb. Não utiliza o agente oxidante ozônio, entretanto requer um tratamento mais cuidadoso do efluente antes de ser submetido a este processo e deve ser combinado com um dos seguintes processos: arraste por vapor, ultrafiltração, oxidação catalítica da fase gasosa<sup>40</sup>. Para a capacidade de processamento de 150gpm (568L/min), o custo da instalação da ordem de US\$155mil e o custo unitário do tratamento de US\$0,54/kgal ou US\$0,14/m<sup>3</sup>.

UV/O<sub>3</sub> OXIDATION<sup>13</sup>: Este processo também é similar ao ULTROX, exceto pela não utilização do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Deve ser combinado com outro processo de tratamento (por exemplo, o tratamento biológico) e o efluente deve ter uma concentração máxima de 900ppm de demanda química de oxigênio (DQO). Para uma capacidade de processamento de 44gpm (166L/min) de hidrocarbonetos clorados o custo da instalação é de US\$52,5mil e o custo unitário do tratamento da ordem de US\$0,66/kgal ou US\$0,17/m<sup>3</sup>.

#### 1.4.2- Técnicas similares desenvolvidas

Em 1973 teve início a operação da planta de tratamento (desinfecção) de esgoto na cidade de Geiselbullach na Alemanha<sup>14</sup> utilizando como fonte de radiação o radioisótopo Cobalto-60. Esta planta com atividade de 120.000Ci, operando em bateladas, tinha capacidade de processamento de 30 toneladas por dia de lodo com 4% de sólidos com uma dose de 3kGy a um custo unitário de US\$100 a US\$130 por tonelada<sup>15</sup>.

A Figura 3 apresenta ilustração do dispositivo de irradiação utilizado em Geiselbullach. Esta unidade operou continuamente até 1993 quando houve a regulamentação do governo alemão proibindo a reutilização de lodo de esgoto, tratado como fertilizante, devido a presença de compostos dioxinas e furanos.

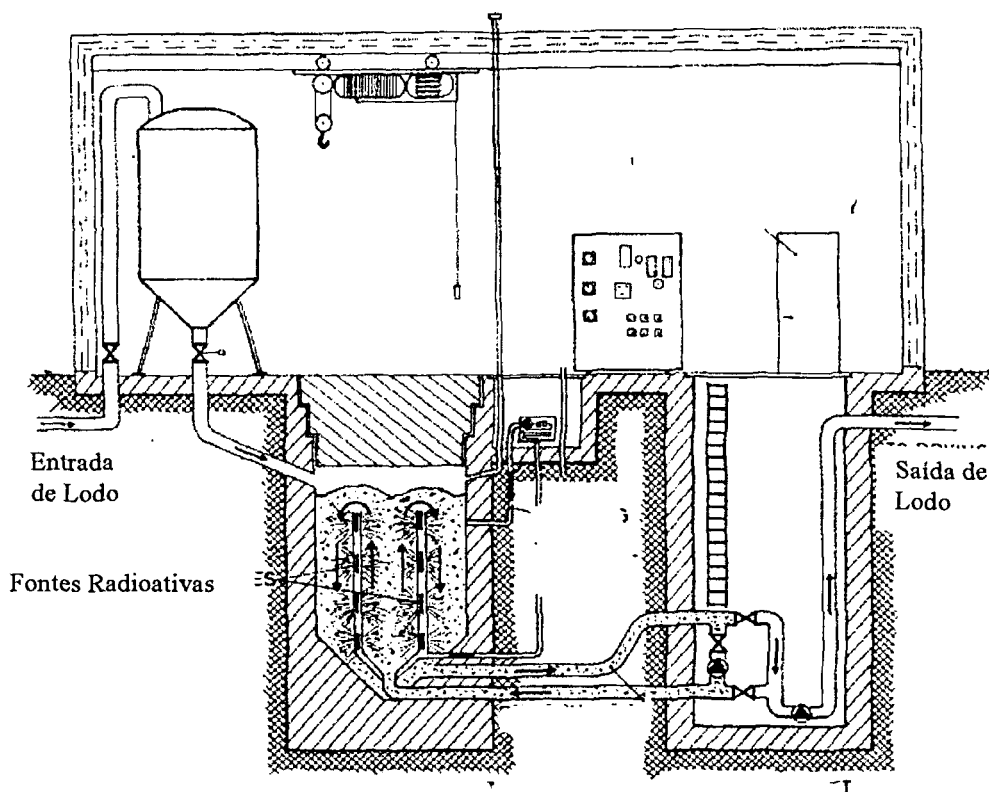


FIGURA 3: Desenho ilustrativo da planta de irradiação utilizando Cobalto-60 instalada na cidade de Geiselbullach- Alemanha<sup>15</sup>.

Com o propósito de se utilizar aceleradores de elétrons no tratamento de efluentes industriais e residenciais, desde 1973 uma elevada quantidade de pesquisas foram realizadas, em vários países, sobre a interação da radiação ionizante com os efluentes <sup>16 a 28</sup>.

Esses estudos provaram, conclusivamente, que os feixes de elétrons são extremamente eficientes na degradação de compostos orgânicos, entretanto, a expansão desta tecnologia inovadora dentro da área ambiental tem sido muito lenta devido a desafios e problemas tecnológicos que limitam o desenvolvimento da aplicação comercial deste processo, a saber<sup>29</sup> :

- Projeto e fabricação de aceleradores de baixo custo de modo a tornar a aplicação comercialmente viável;

- Projeto, construção e teste de dispositivo de irradiação onde os elétrons interagem com o efluente de forma confiável e eficiente;
- Projeto e construção de um dispositivo que permita monitorar em tempo real a dose de radiação absorvida pelo efluente durante o tratamento.

No início da década de 1970 pesquisadores do MIT (Massachusetts Institute of Technology-USA) liderados por J.G. Trump<sup>30</sup> iniciaram o projeto de uma planta de demonstração na unidade de tratamento denominada Boston's Deer Island Water Treatment Plant com o propósito de realizar estudos biológicos, de viabilidade técnica e econômica, utilizando feixe de elétrons para o tratamento de esgotos com fluxos realísticos. A planta teve início de operação em 1976, utilizando um acelerador de elétrons da High Voltage Engineering Company-USA com energia de 850keV e potência de 50kW. A capacidade de processamento de lodos, com o propósito de desinfecção com uma dose de 4kGy, era de 600toneladas/dia e o custo unitário de US\$0,8 por tonelada<sup>31</sup>. A Figura 4 apresenta ilustração do dispositivo de irradiação utilizado pela equipe de Trump.

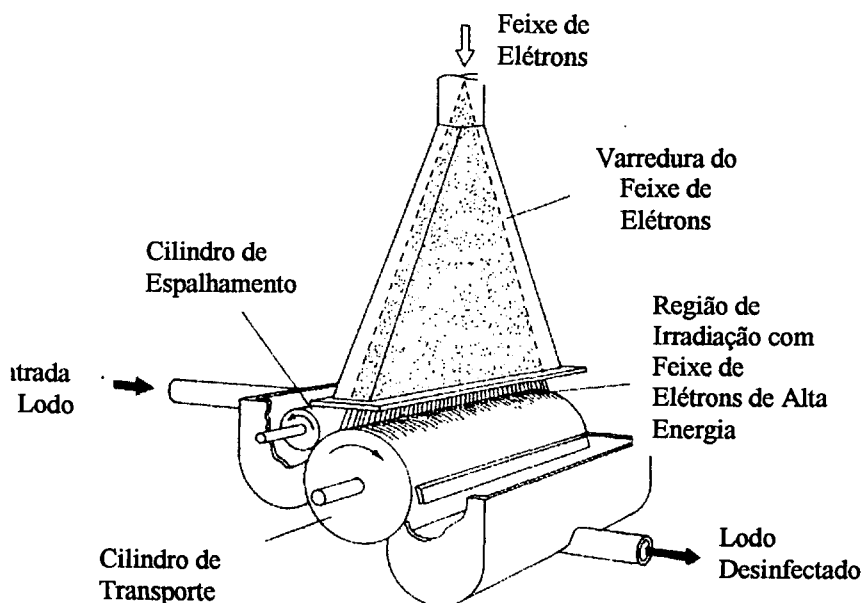


FIGURA 4: Desenho esquemático do dispositivo de irradiação utilizado na planta de irradiação de Boston's Deer Island Water Treatment Plant<sup>31</sup>.

Em 1980 pesquisadores liderados por Thomas D. Waite<sup>32,33</sup> da Universidade de Miami, continuaram estes estudos com a instalação de uma outra unidade de demonstração para desinfecção de lodos municipais na Miami-Dade Water and Sewer Authority's Virginia Key West Treatment Plant- USA. Utilizaram um acelerador de elétrons da High Voltage Engineering Company-USA com energia de 1,5MeV e potência de 75kW e apresentando um dispositivo de irradiação que utilizava queda por ação da gravidade de uma cortina de efluente, ilustrado na Figura 5. A capacidade de processamento era de 160gpm (605L/min) para tratamento de efluentes com dose de 4,84kGy e um custo unitário de US\$ 2,5/1000galões ou US\$0,6/m<sup>3</sup>.

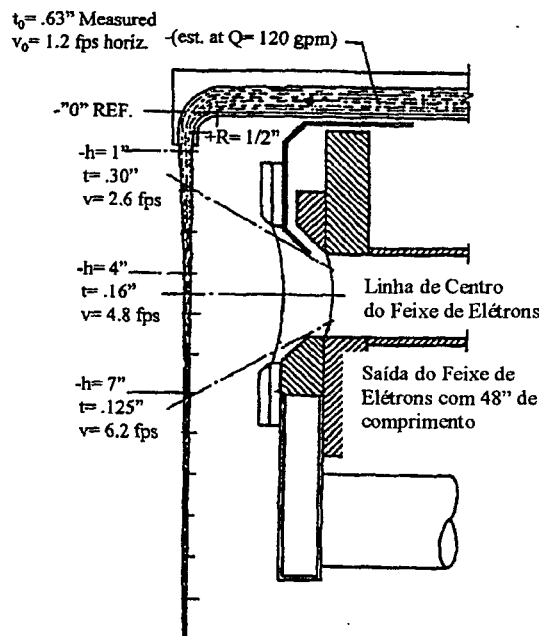


FIGURA 5: Esquema do dispositivo de irradiação instalado na Miami-Dade Water and Sewer Authority's Virginia Key West Treatment Plant-USA<sup>34</sup>.

Este mesmo grupo junto com a empresa High Voltage Environmental Applications, Inc., USA, desenvolveu uma unidade móvel para tratamento de efluentes instalando um acelerador de elétrons em uma carreta de caminhão com o propósito de facilitar a logística, fazendo com que a unidade se deslocasse até o ponto do tratamento. O sistema de tratamento móvel apresentado na Figura 6, é equipado com um acelerador de elétrons com energia de 500keV e potência do

feixe de elétrons de 20kW e sistema de bombeamento com capacidade de 40gpm (151L/min)<sup>35</sup>. Segundo avaliação feita pela EPA - Environmental Protection Agency -USA<sup>36</sup>, o custo unitário do tratamento para o tratamento de água subterrânea contaminada com compostos orgânicos voláteis (TCA-tricloroetano, DCA-dicloroetano, clorofórmio e tetracloreto de carbono) com concentração de até 840 $\mu$ g/L é de US\$5,16/1000galões ou US\$1,36/m<sup>3</sup>.

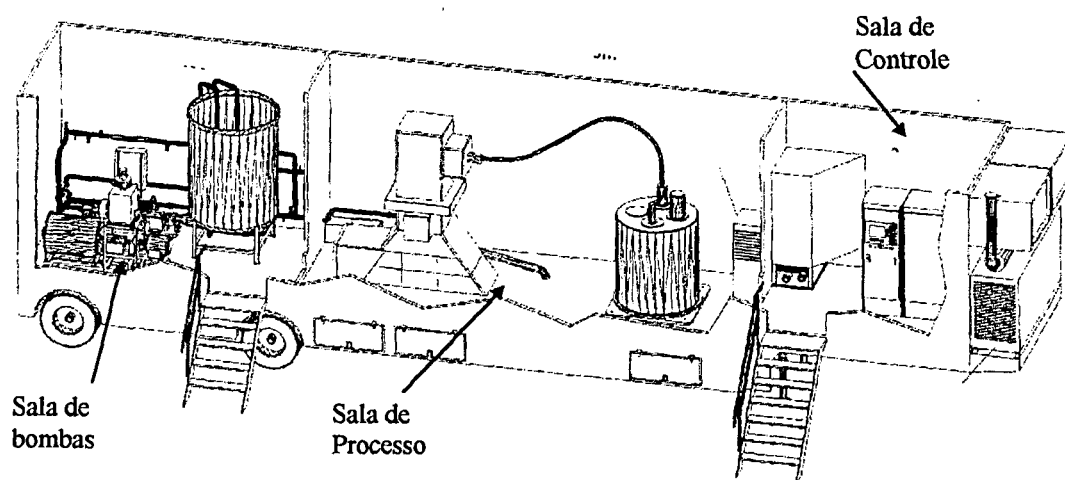


FIGURA 6: Desenho esquemático da unidade móvel de tratamento de efluente pertencente a empresa High Voltage Environmental Applications Inc., USA<sup>35</sup>

Também nos Estados Unidos da América outros profissionais que militam na área de aplicação ambiental da radiação ionizante desenvolveram sistemas de irradiação para tratamento de efluentes, sendo importante destacar o dispositivo de irradiação desenvolvido por M.N.Schuetz<sup>37</sup> da Raychem Corporation - USA que apresenta a característica de colocar o efluente a ser tratado em contato direto com a janela de titânio do acelerador por onde emergem os elétrons. Neste caso o efluente é irradiado em ambiente fechado, servindo também para refrigerar a janela do acelerador, porém apresenta a desvantagem, no caso de ruptura da janela que tem espessura mínima de 26 $\mu$ m, de contaminação em larga escala do

tubo acelerador. O sistema de irradiação desenvolvido por Schuetz, apresentado na Figura 7, é equipado com um acelerador de elétrons com energia de 500keV e potência de 50kW e apresenta capacidade de processamento de 100-400L/min

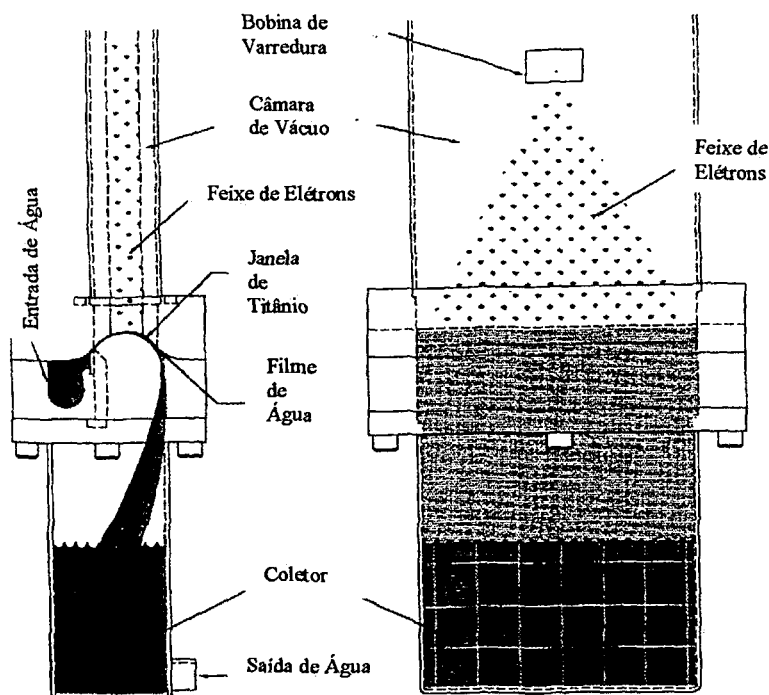


FIGURA 7: Ilustração do dispositivo de irradiação que apresenta configuração semi-cilíndrica onde o efluente entra em contato direto com a janela do acelerador<sup>37</sup>.

Alexei Pikaev<sup>38</sup> e colaboradores, desenvolveram um sistema de tratamento de efluentes que incorpora um dispositivo de irradiação onde o líquido a ser tratado apresenta-se para o feixe de elétrons na forma de "spray", conforme ilustração da Figura 8. O aerosol formado pelo jato de "spray" tem uma densidade de  $0,02\text{g/cm}^3$  a  $0,05\text{g/cm}^3$  e esta baixa densidade faz com que a penetração do feixe de elétrons seja da ordem de 20 a 50 vezes superior a penetração na água no estado líquido. Outra característica importante deste dispositivo é o de permitir a recirculação do ar fazendo com que aumente a

concentração do ozônio produzido pela interação do feixe de elétrons com oxigênio aumentando a disponibilidade de radicais altamente reativos.

O valor elevado da penetração do feixe de elétrons no aerosol permite a utilização de aceleradores de elétrons com energia de aceleração dos elétrons inferiores a 300keV, permitindo a aplicação de aceleradores tipo cortina que normalmente são utilizados na reticulação de filmes para embalagens. No sistema desenvolvido por Pikaev é utilizado um acelerador de elétrons com energia de 300keV e potência de 15kW e com capacidade de processamento de 500m<sup>3</sup>/dia para uma dose de irradiação do efluente de 1,3kGy. Nestas condições o custo unitário do efluente tratado é estimado em US\$2,24/m<sup>3</sup>. Neste sistema o efluente necessita previamente ser submetido a um processo de sedimentação e filtragem.

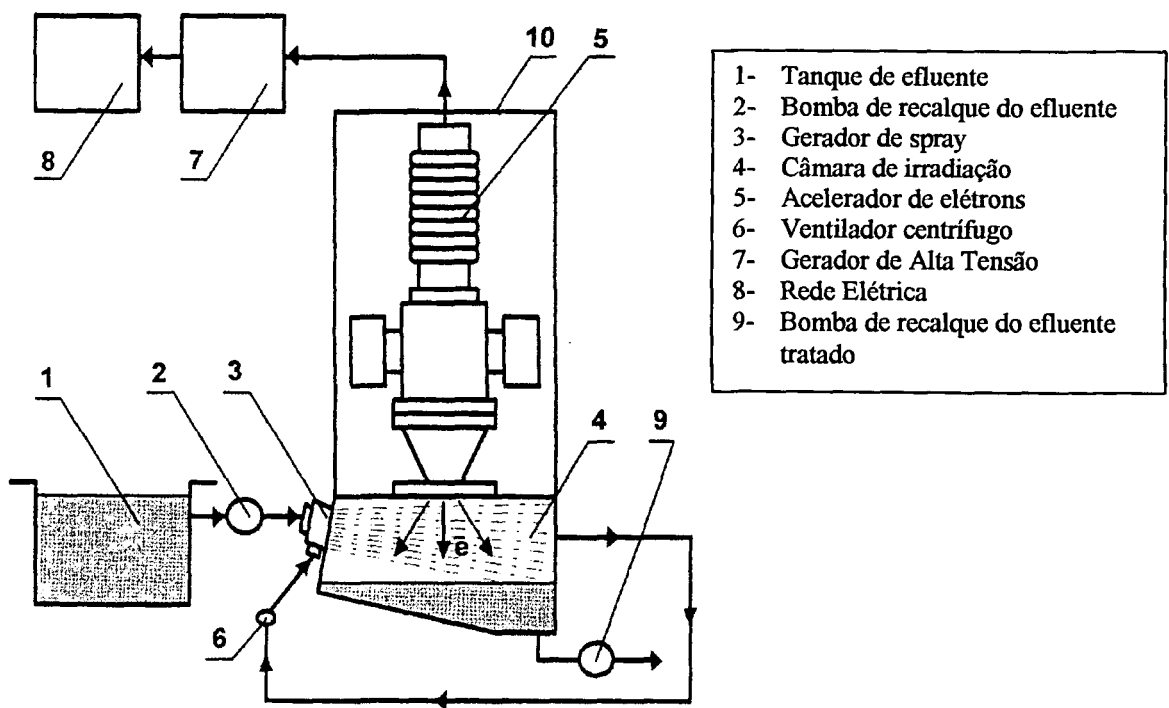


FIGURA 8: Esquema da planta piloto desenvolvida por Pikaev para o tratamento de efluente industrial com fluxo na forma de aerosol<sup>38</sup>.

Diferente do processo apresentado anteriormente e seguindo a linha de combinar o tratamento do efluente por feixe de elétrons com ozônio, foi desenvolvido por P. Gehringer e colaboradores<sup>39</sup> um sistema de irradiação que incorpora a utilização de um acelerador de elétrons com um gerador de ozônio

para tratamento de água do subsolo contaminadas com TCE (tricloroetileno) e PCE (percloroetileno).

A ilustração da planta de tratamento desenvolvida por Gehringer é apresentada na Figura 9 e utiliza um acelerador de elétrons com energia de 500KeV, potência de 12,5kW e capacidade de processamento de  $3\text{m}^3/\text{h}^{40}$ . A partir de resultados experimentais da planta piloto foi possível estimar o custo unitário de tratamento de água contaminada com 120ppb de TCE e para uma vazão de  $1.200\text{m}^3/\text{h}$  combinando feixe de elétrons (dose de 45Gy) com ozônio (3ppm) em US\$0,075/ $\text{m}^3$ .

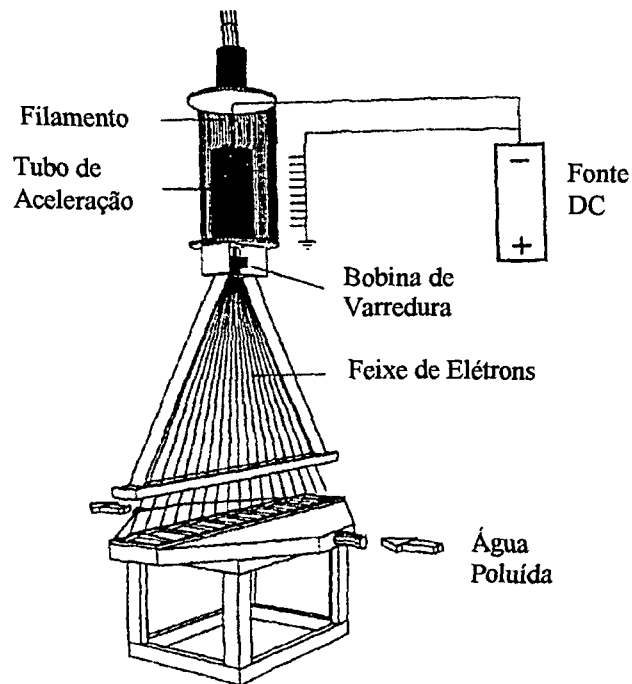


FIGURA 9: Esquema da planta piloto de irradiação combinando acelerador de feixe de elétrons com gerador de ozônio<sup>40</sup>

### 1.4.3- Tipo de Irradiadores

Das tecnologias que utilizam a radiação ionizante para o tratamento de efluentes, cabe citar as diferenças existentes entre os tipos de irradiadores utilizados.

Os irradiadores gama normalmente utilizam como fonte radioativa o isótopo Cobalto-60 apresentando as seguintes vantagens:

- Excelente poder de penetração, permitindo maior uniformidade de dose ao efluente tratado;
- Controle do processo de irradiação relativamente simples pois para um determinado valor da vazão, da atividade radioativa disponível na instalação, geometria da câmara de irradiação e característica do efluente, o único parâmetro a ser controlado é o tempo de exposição do efluente às fontes radioativas;
- A principal fonte de energia utilizada no processamento é fornecida pelo decaimento das fontes radioativas, tornando a instalação com um baixo consumo de energia elétrica.

As desvantagens na utilização dos irradiadores gama são:

- As fontes radioativas não podem ser desligadas e requerem, mesmo sem uso, uma atividade de monitoração constante de proteção radiológica;
- A produção e disponibilidade de fontes radioativas, especialmente o Cobalto-60, vem apresentando flutuações quanto ao fornecimento no mercado internacional;
- Dificuldade maior de licenciamento junto aos órgãos governamentais e também maior dificuldade de aceitação por parte da comunidade vizinha.

Os aceleradores de elétrons utilizados em larga escala em processos industriais, com mais de 800 instalações em operação no mundo, principalmente na reticulação de filmes para embalagens, de isolantes de fios e cabos e de

componentes de pneus, apresentam as seguintes vantagens no tratamento de efluentes:

- Por apresentar maior taxa de dose, permite o tratamento de maior volume de efluentes por unidade de tempo;
- Para uma mesma capacidade de processamento o custo do investimento inicial é menor que os irradiadores gama;
- Maior facilidade no licenciamento e aceitação por parte da comunidade pois uma vez interrompida a alimentação de energia elétrica é cessada a emissão de radiação.

As desvantagens na utilização dos aceleradores de elétrons são:

- Requer técnicos mais qualificados para manutenção;
- Tem consumo elevado de energia elétrica, aumentando os custos diretos de produção;
- O controle do processo depende vários parâmetros: vazão do efluente, corrente e tensão do feixe de elétrons.

O tratamento de efluentes industriais, municipais e de água potável com feixe de elétrons tem como ponto crucial no desenvolvimento desta tecnologia o dispositivo de irradiação onde o efluente apresenta-se para o feixe de elétrons. Deve-se ter como premissas básicas que todo o efluente seja exposto ao feixe de elétrons e que receba a quantidade mínima de radiação para se conseguir o efeito desejado. Sendo a penetração do feixe de elétrons limitada, é necessário que a geometria seja concebida de modo que o efluente apresente-se aos elétrons incidentes de forma uniforme e rápida, caso contrário, a eficiência da interação será incompleta tornando baixa a eficiência do processo.

#### 1.4.4- Eficiência dos dispositivos de irradiação desenvolvidos

A eficiência apresentada pelos diversos pesquisadores que desenvolveram dispositivos de irradiação para utilização em aceleradores de elétrons no tratamento de efluentes são apresentadas na Tabela 2 . Nesta tabela o valor da eficiência é o do aproveitamento do feixe de elétrons produzido pelo acelerador absorvido pelo efluente que circula pelo dispositivo.

Cabe mencionar que apenas no trabalho de T.Waite<sup>33,34</sup> o valor da eficiência é claramente definido e determinado experimentalmente por meio de dosimetria utilizando o princípio de calorimetria, nos demais dispositivos os dados apresentados para a eficiência são apenas citados sem referencias do modo como foram obtidos ou são citados como valores estimados.

TABELA 2- Relação de pesquisadores que desenvolveram dispositivos de irradiação para tratamento de efluentes por meio de feixe de elétrons e respectivos valores alcançados na eficiência de irradiação.

Dispositivo de Irradiação	Eficiência (%)
J.G.Trump – Boston's Deer Island Water Treatment Plant- USA <sup>31</sup>	35 a 45
T. Waite – Miami-Dade Water and Sewer Authority's Virginia Key West Treatment Plant- USA <sup>33</sup>	65,3
P. Geringher – Austrian Research Centre Seibersdorf <sup>39</sup>	60
A. K. Pikaev - Institute Of Physical Chemistry of Russian Academy of Sciency <sup>38</sup>	90
M.N. Schuetz - Raychem Corporation-USA <sup>37</sup>	80

Com o propósito de apresentar alternativas tecnológicas para atenuação dos problemas acima relacionados, o presente trabalho busca o desenvolvimento de um de um sistema de irradiação que apresente elevada eficiência da interação

do feixe de elétrons fornecido pelo acelerador com o produto a ser tratado e com uma configuração ímpar aos demais dispositivos utilizados por pesquisadores de outros países que militam nessa área.

## 1.5 OBJETIVOS

Estudar todos os parâmetros que influem na transferência de energia dos elétrons gerados no acelerador para o efluente em processamento no sistema de irradiação desenvolvido e instalado na planta piloto do IPEN, de modo a otimizá-lo para um processamento contínuo e eficiente no tratamento de efluentes municipais, industriais ou para água potável.

Estudar a configuração geométrica mais apropriada e adequação de materiais a serem utilizados na construção de um sistema de irradiação robusto e confiável para operação em escala semi-comercial, que permita a realização por parte de pesquisadores do IPEN e da comunidade envolvida com a Engenharia Ambiental e Sanitária a realização segura de testes com efluentes industriais reais.

Estudar a melhor configuração do sistema de irradiação que facilite as verificações de controle de qualidade assegurando que o processo esteja funcionando adequadamente, de acordo com as especificações do projeto e da quantidade de dose estabelecida para o tratamento dos efluentes.

Estudar a eficiência de processamento de efluentes com energia de feixe de elétrons na faixa de 500keV a 1.500keV visando a adequação dos parâmetros de operação para diferentes tipos de aceleradores e a caracterização do tipo ideal de acelerador no que se refere a energia e intensidade de corrente do feixe de elétrons permitindo em princípio, a seleção máquinas disponíveis comercialmente de modo a reduzir os custos unitários operacionais do processo e fornecer subsídios para a construção no futuro de máquinas dedicadas ao processo.

Estes estudos são acompanhados de análise econômica onde o parâmetro crítico a ser considerado será o custo de capital investido para uma planta destinada a este tipo de tratamento que depende fundamentalmente do tipo de acelerador a ser instalado.

## 1.6 CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS

O sistema de irradiação, objeto da presente estudo, operando com o fluxo da solução a ser tratada em direção oposta ao do bombardeio do feixe de elétrons ("up flow stream"), faz com que a eficiência do processo não seja tão dependente da energia dos elétrons emergentes do acelerador, ou do controle de espessura do líquido a ser tratado. Utilizando este princípio de operação, espera-se um melhor aproveitamento da energia do feixe de elétrons do que os utilizados por pesquisadores de outros países que estão trabalhando nesta área.

Desenvolvimento de um sistema de irradiação que permita a irradiação de produtos em circuito aberto ou fechado ao meio ambiente, comparando as respectivas eficiências. O sistema que permite a operação em circuito fechado, tornará possível estudos de degradação de produtos tóxicos e a amostragem segura dos produtos formados em consequência da irradiação para a sua caracterização em laboratório. A condição de circuito fechado é a que utiliza uma janela de material apropriado para tornar estanque o sistema de irradiação.

Desenvolvimento de um sistema de dosimetria utilizando sensores de temperatura de estado sólido de fácil construção e confiável para controle do processo, em tempo real, permitindo a obtenção de sinal que poderá retroalimentar o sistema de controle de vazão garantindo uniformidade de dose ao efluente tratado.

## 2- DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1- PLANTA PILOTO

Durante o desenvolvimento do Projeto Tratamento de Efluentes com Feixe de Elétrons, as amostras de águas de abastecimento, residuárias e lodos foram submetidas à irradiação no Acelerador Industrial de Elétrons do IPEN, de fabricação Radiation Dynamics Inc., modelo Dynamitron II com energia variável até 1,5MeV e corrente variável até 25mA.

Essas amostras em sistemas apropriados de irradiação, absorveram diferentes doses de irradiação tendo seus parâmetros físico-químicos determinados antes e após a irradiação com o propósito de avaliar os efeitos da interação com os feixes de elétrons. As medidas das doses absorvidas foram quantificadas por meio de cálculos utilizando os parâmetros da máquina, por meio de dosímetros de filmes plásticos de triacetato de celulose (CTA) calibrados previamente com dosimetria Fricke e também pela técnica de calorimetria<sup>41</sup>.

Vários experimentos foram realizados onde as amostras, em bateladas, foram introduzidas em sistemas de irradiação (sistema "batch") de alumínio e/ou vidro borossilicato (Pyrex) com capacidades que variaram de 50ml a 500ml especialmente construídos para essa finalidade e foram irradiadas à temperatura ambiente, em presença de ar, com diferentes doses de irradiação. A espessura das amostras (4mm), a energia dos elétrons (1,5MeV) e a velocidade de deslocamento da esteira com as amostras (6,72m/min) foram mantidas constantes em todos os experimentos. As doses aplicadas em todos os casos resultaram de uma única passagem sob o feixe de elétrons<sup>1</sup>.

Nesta etapa do desenvolvimento em escala laboratorial, foram estudados os efeitos da interação da radiação com o efluente do ponto de vista da degradação dos compostos orgânicos, mudança da velocidade de sedimentação e mudança de intensidade de cor. Os resultados obtidos permitiram correlacionar a dose de radiação necessária para se provocar um determinado efeito no produto a ser tratado<sup>23, 24, 26, 42</sup>.

Para aplicação desta tecnologia em escala comercial houve a necessidade de desenvolvimento de sistemas com capacidade de processamento de caudais da ordem 2m<sup>3</sup>/h, com as seguintes características:

- permitir uma absorção uniforme da dose requerida pelo efluente a ser tratado;
- controlar durante o processamento, em tempo real, a dose absorvida pelo produto;
- permitir a amostragem durante o processo de irradiação, para verificação da eficiência do processo;
- permitir a montagem de arranjos e configurações de modo a testar materiais, equipamentos e a instrumentação;
- otimização do processamento, obtendo-se parâmetros operacionais para aumento de escala do projeto, obtenção de dados para um estudo de viabilidade econômica do processo.

Dentro do escopo da presente tese, projetou-se e construiu-se uma planta em escala piloto nas instalações do Acelerador de Elétrons do IPEN. A planta piloto ilustrada na Figura 10, é constituída de 2 (dois) tanques de poliéster revestidos com fibra de vidro com capacidade de 1.500 litros cada, 2 bombas para homogeneização e transporte do líquido respectivamente, válvulas solenóides e manuais, sistema de irradiação, sistema de dosimetria e painel de controle.

A planta inicialmente foi desenvolvida com capacidade para processar até 2m<sup>3</sup>/h de efluentes industriais e/ou águas potáveis, residuárias e lodos com teor máximo de 8% de sólidos e a medida que os sistemas de irradiação foram modificados, com o propósito de se obter uma melhor "performance", houve a necessidade de aumentar a vazão do efluente processado, permitindo a

realização de ensaios de irradiação com doses baixas respeitando-se o limite mínimo de corrente de operação estável do acelerador de elétrons. Durante todo o processo de desenvolvimento várias melhorias e modificações foram introduzidas na planta piloto, buscando o aumento da eficiência e otimização operacional do sistema de irradiação.

Essas melhorias podem ser caracterizadas em dois estágios distintos de evolução (“up-grade”) e no último, a vazão final do efluente atingiu o valor de  $5\text{m}^3/\text{h}$  e implementou-se um sistema de aquisição de dados que permite, em tempo real, o registro dos parâmetros operacionais: corrente e tensão de aceleração dos elétrons, vazão e dose absorvida pelo efluente. Estes parâmetros são fundamentais para serem analisados na presente tese, pois possibilitam uma avaliação objetiva do desenvolvimento tecnológico e da viabilidade econômica do processo.

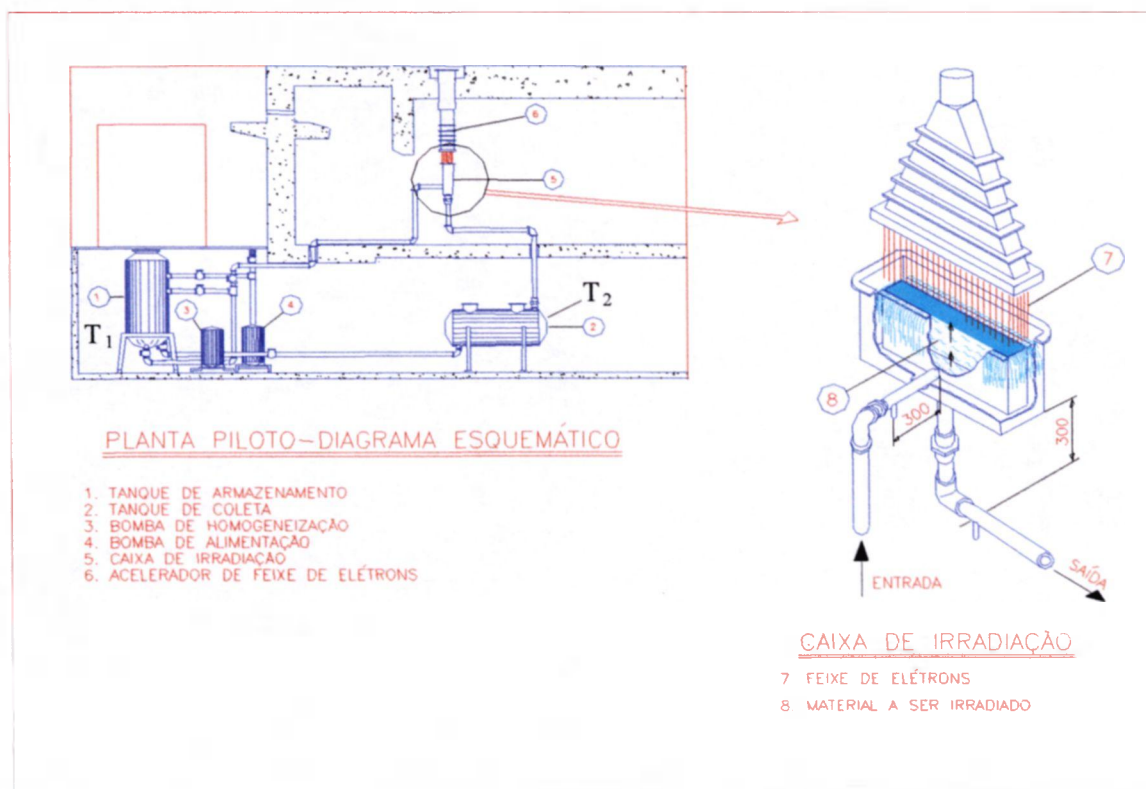


Figura 10: Desenho esquemático da Planta Piloto de Tratamento de Efluentes do Centro de Tecnologia das Radiações do IPEN<sup>1</sup>.

## 2.2- ACELERADOR INDUSTRIAL DE ELÉTRONS

O acelerador de elétrons é um dos desafios tecnológicos que limitam a implantação deste processo de tratamento de efluentes, portanto, procurou-se no presente trabalho estudar no acelerador disponível, a melhor condição de operação de modo a otimizar os parâmetros de operação e minimizar o custo unitário para o beneficiamento do efluente.

Os aceleradores de elétrons são máquinas semelhantes a um tubo de televisão, cabendo neste momento descrever com maiores detalhes o seu princípio de funcionamento.

No caso do acelerador Dynamitron instalado no IPEN, é utilizado no seu circuito principal, uma sequência de retificadores dobradores de tensão, mostrados na Figura 11. Neste circuito dobrador alimentado por corrente alternada, observa-se que quando a entrada for positiva em A, teremos o diodo  $D_1$  carregando o capacitor  $C_1$  com valor correspondente ao do pico da tensão de entrada, com relação ao terra, deste modo, teremos o capacitor  $C_1$  com a polaridade indicada na figura. Neste mesmo ciclo o diodo  $D_2$  interrompe a passagem de corrente, pois o seu ânodo estará polarizado positivamente. No meio ciclo seguinte a tensão da entrada passa ser negativa e, conseqüentemente, o diodo  $D_1$  para de conduzir (por estar inversamente polarizado), e o diodo  $D_2$  passa a conduzir, carregando  $C_2$  com valor máximo de tensão aplicada ( $V_{max}$ ). Desta forma teremos a tensão de  $C_1$  com relação ao terra igual a  $V_{max}$  e de  $C_2$  com o valor oposto  $-V_{max}$ , totalizando na saída um diferencial de tensão com valor absoluto de  $2V_{max}$ .

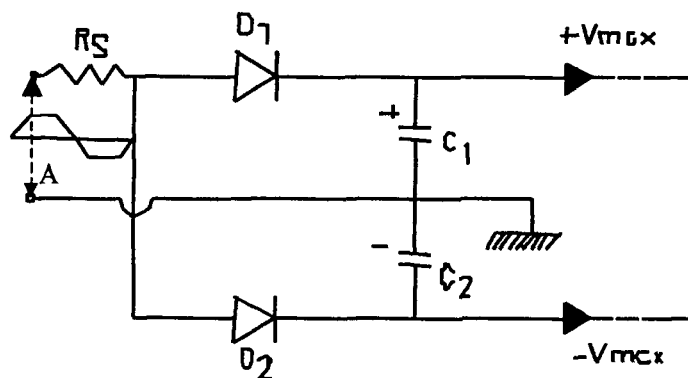


Figura 11: Diagrama elétrico de um circuito dobrador de tensão.

Fazendo-se uma associação de vários circuitos dobradores conforme indicação da Figura 12, obtém-se circuitos multiplicadores de tensão com tensões de saída muito elevadas, estes circuitos são amplamente utilizados em receptores de televisão (da ordem de 20kV).

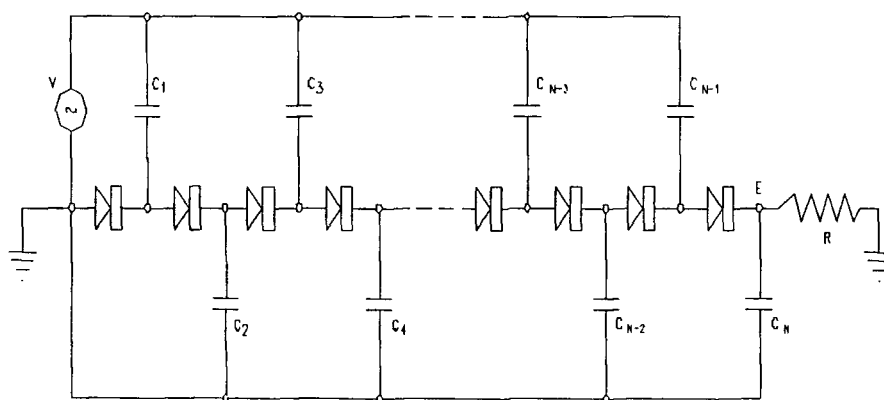


Figura 12: Esquema elétrico de associação de circuitos dobradores de tensão

Nos aceleradores Dynamitron, cujo esquema elétrico principal é indicado na Figura 13, o circuito multiplicador de tensão é alimentado por um transformador que opera com alta frequência (para minimizar os valores dos capacitores) e voltagem, da ordem de 100 kHz e 100kV, operando em

radiofrequência (R.F.) através dos eletrodos A e B, carregando os capacitores  $C_1$ ,  $C_2$  a  $C_n$  constituídos pelos anéis de corona e os próprios eletrodos de R.F., formando os sucessivos circuitos dobradores de tensão. Esta configuração permite, de acordo com as características construtivas dos aceleradores, obter tensões até 5MV, permitindo aos elétrons adquirirem energia de 5MeV.

No acelerador Dynamitron uma vez estabelecida a tensão no terminal de alta tensão indicada na Figura 13, os elétrons são gerados por meio de aquecimento de um filamento de tungstênio, onde são acelerados em um tubo chamado de acelerador, à velocidade próximas a da luz (cerca de 99% do seu valor, ou seja, a uma velocidade próxima a 300.000km/s). A pressão no interior do tubo acelerador é de ordem de  $10^{-6}$ mmHg. Os elétrons após serem acelerados e acumularem energia cinética no interior do tubo acelerador, são focalizados e em seguida defletidos por meio de um campo magnético oscilante, possibilitando um ajuste na largura de varredura do feixe, e finalmente atravessando uma janela de titânio (com espessura da ordem de 50 microns), abandonando a região com vácuo, incidindo nos produtos a serem beneficiados.

O acelerador industrial de elétrons do IPEN opera com os seguintes parâmetros:

- Tensão de alimentação: 440V;
- Frequência do circuito oscilador (radiofrequência): 100kHz;
- Tensão de circuito oscilador: 100kV;
- Tensão máxima do acelerador de feixes de elétrons (tensão de aceleração dos elétrons): 1,5 MV;
- Corrente máxima do feixe de elétrons: 25mA;
- Potência máxima do feixe de elétrons (produto da tensão máxima de aceleração de 1,5MV, com o valor da corrente máxima do feixe de elétrons 25mA: 37,5kW;
- Largura ajustável do feixe de elétrons: de 30cm a 120cm;
- Frequência de varredura do feixe de elétrons: 100Hz;
- Diâmetro do feixe de elétrons ao incidir nos materiais a uma distância média de 20cm da janela de titânio: 2cm

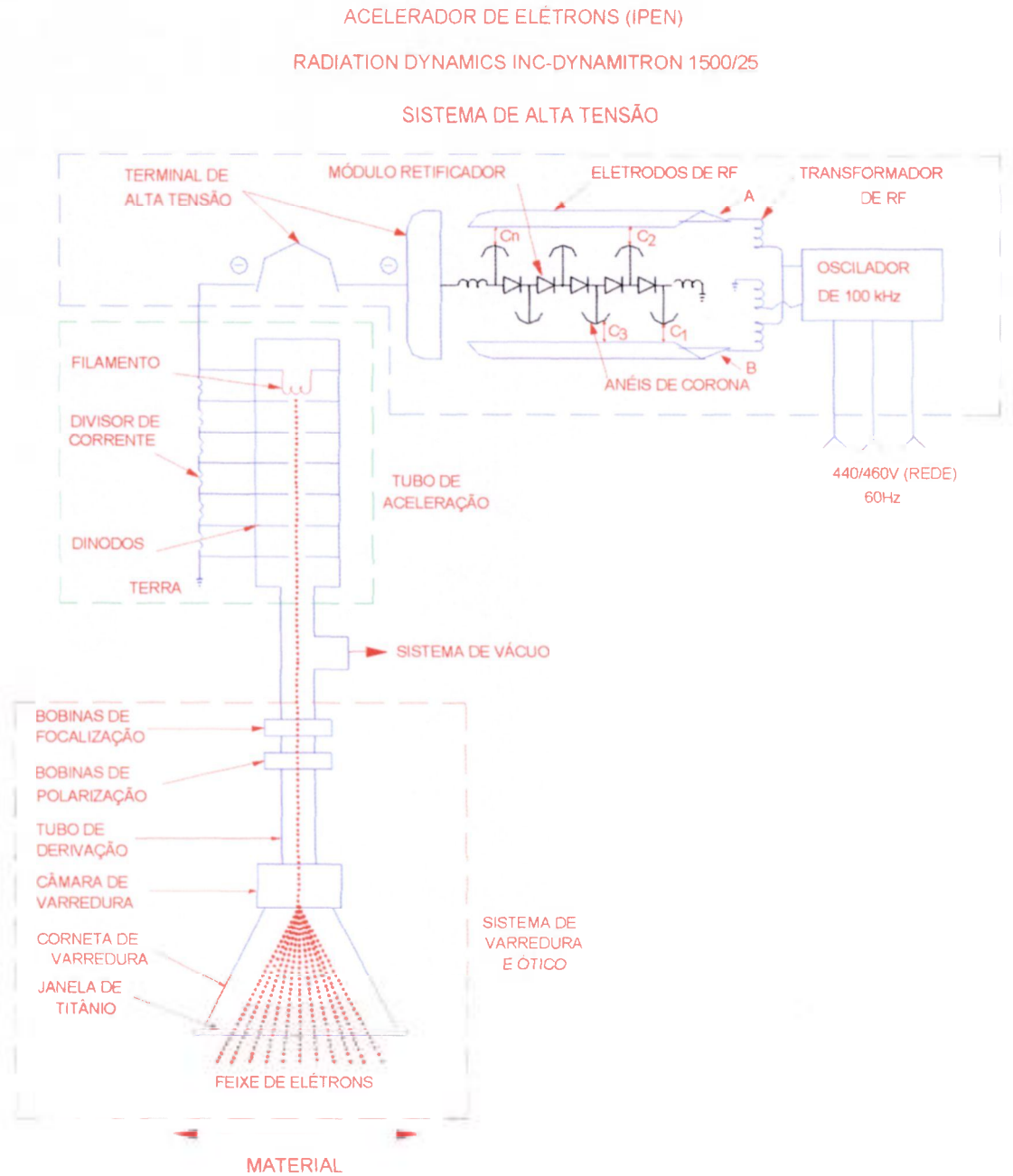


Figura 13: Diagrama funcional do acelerador de elétrons RDI (1,5MeV)

### 2.3- SISTEMA DE BOMBEAMENTO

Conforme é ilustrado na Figura 10 o sistema de bombeamento dos líquidos na planta piloto é constituído de duas bombas centrífugas, modelo 170 R50 (1HP)

de fabricação da Dankor; a bomba indicada como posição 3 é responsável pelo recalque do efluente no dispositivo de irradiação e a bomba indicada como posição 4 é responsável pela homogeneização do efluente no tanque de armazenamento de produto a ser processado.

Na Figura 14 é apresentado o diagrama funcional do circuito hidráulico e fotografia do correspondente painel de controle que por meio de manobras das válvulas solenóides, com tensão de alimentação de 220VAC e indicadas pelas letras VS, é possível as seguintes operações:

- a- Bombeamento do tanque  $T_1$  para o dispositivo de irradiação e coleta do produto no tanque  $T_2$ .
- b- Bombeamento do tanque  $T_2$  para o tanque  $T_1$ , manobra esta utilizada para reprocessamento do efluente ou realização de experimentos com diferentes doses absorvida pelo mesmo (doses acumuladas).
- c- Bombeamento do efluente do tanque  $T_2$  para fora da planta piloto, utilizada para transferencia do efluente para um tanque auxiliar móvel.

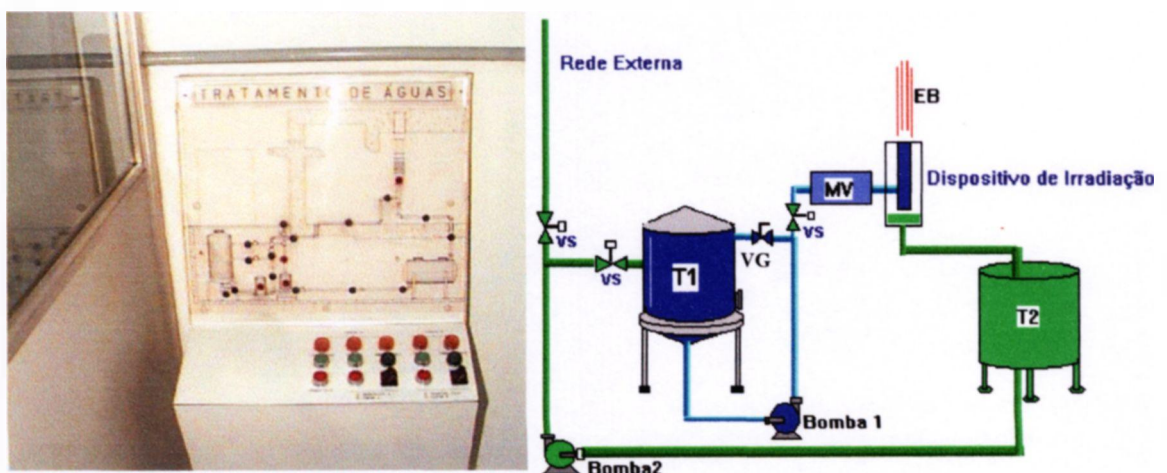


FIGURA 14: Diagrama funcional do circuito hidráulico e foto do painel de controle

A vazão do efluente no dispositivo de irradiação é controlada por uma válvula de acionamento manual tipo gaveta, indicada pela letra VG, de 1 polegada de diâmetro, monitorada por um medidor de vazão, indicado na figura como MV, tipo turbina, de fabricação Digiflow, modelo 1100. O medidor de vazão fornece um sinal elétrico a uma interface analógica/digital convertendo o sinal para o processamento no computador e a dose absorvida em tempo real pelo efluente. Na Figura 15 é mostrado o sistema de medição de vazão e seu posicionamento na planta piloto.

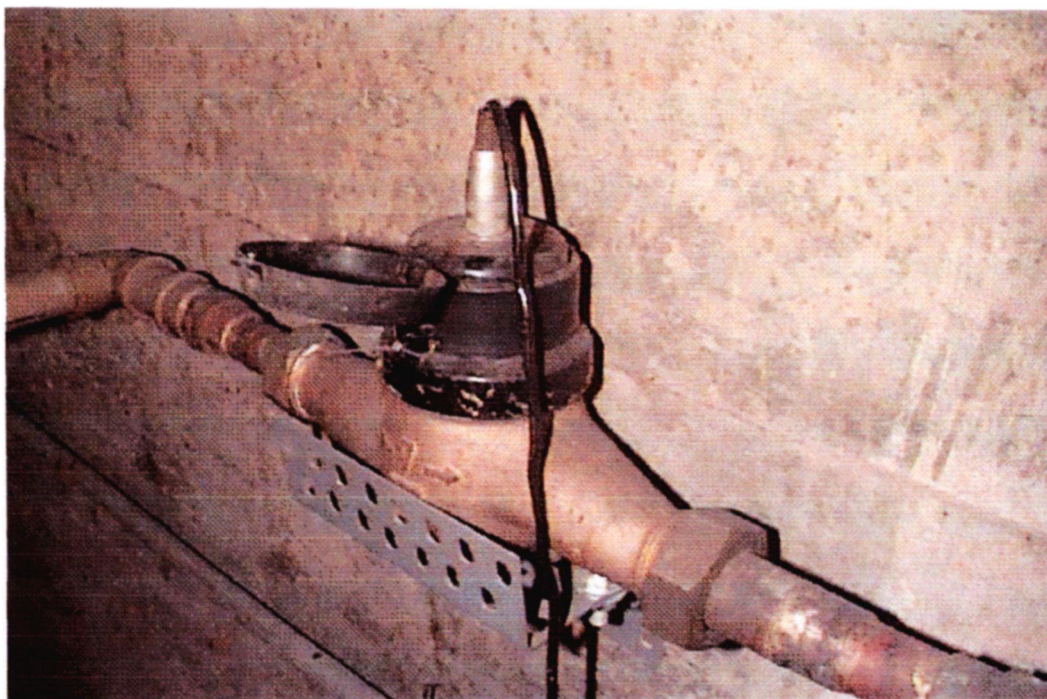


Figura 15: Medidor de vazão e posicionamento na Planta Piloto

## 2.4- SISTEMA DE IRRADIAÇÃO

Para o sucesso da operação contínua do tratamento de efluentes por meio de feixe de elétrons, há a necessidade do desenvolvimento de um sistema que possibilite o máximo aproveitamento dos elétrons e suas respectivas energias na interação com o produto em processamento, sendo fundamental o modo como

este produto se apresenta ao bombardeamento dos elétrons gerados pelo acelerador e neste sentido, a configuração geométrica do dispositivo de irradiação governa a eficiência do processo. Ao mesmo tempo há a necessidade de monitorar se os objetivos do tratamento estão sendo alcançados, ou melhor, se a transformação desejada foi realizada, caso contrário, devem ocorrer ajustes até conseguir os efeitos programados.

Para o tratamento com aceleradores de elétrons, o parâmetro a ser avaliado é a dose de radiação ionizante recebida pelo produto, havendo a necessidade de adequação de uma metodologia que permita a avaliação instantânea da dose absorvida pelo fluxo contínuo do produto.

Com o propósito de se atender as necessidades acima apresentadas, buscou-se o desenvolvimento do sistema de irradiação constituído dos dispositivos de irradiação e do sistema de controle dosimétrico, que operam de modo integrado e que estão descritos a seguir.

#### **2.4.1- Dispositivos de Irradiação**

As características operacionais do acelerador utilizado, que condiciona o feixe de elétrons (energia, largura do sistema de varredura e diâmetro do feixe), mais os valores determinados do poder de penetração do feixe de elétrons e o perfil hidrodinâmico do fluido se constituem nos parâmetros básicos a serem utilizados no dimensionamento geométrico dos dispositivos de irradiação.

A configuração básica do dispositivo de irradiação desenvolvido é indicada na Figura 16, onde o efluente em tratamento, movendo-se continuamente no sentido vertical dentro de um duto de seção retangular, se apresenta ao feixe de elétrons e após sofrer o bombardeamento verte pelas laterais da parede do duto caindo no interior de outro duto, também de seção retangular, que é conectado a tubulação de um tanque de armazenamento.

O princípio de operação, em contra fluxo com o feixe de elétrons, faz com que o sistema de irradiação não seja tão dependente do poder de penetração do feixe de elétrons como os demais sistemas desenvolvidos por outros pesquisadores.

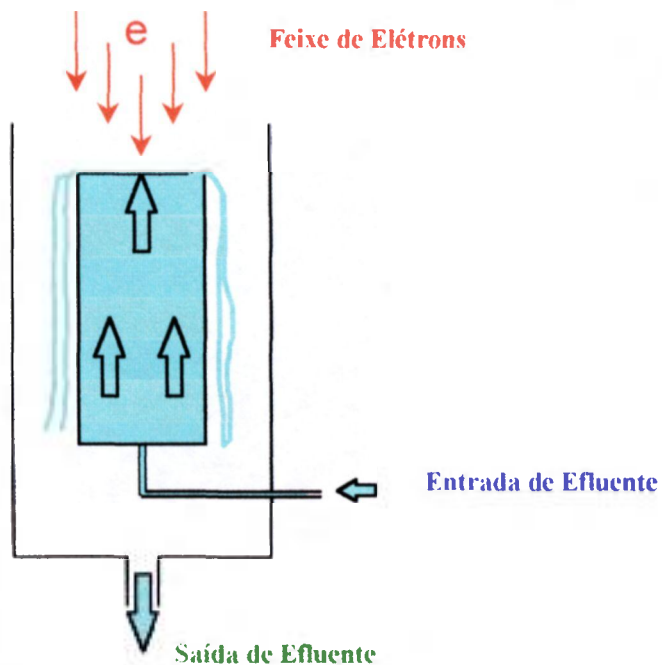


FIGURA 16: Esquema básico do dispositivo de irradiação desenvolvido nesse trabalho.

No desenvolvimento do presente trabalho foi necessário construir três dispositivos de irradiação, cuja geometria foi evoluindo de acordo com o rendimento alcançado em cada um dos dispositivos. Para cada um foi executado projeto de concepção, básico e detalhado, seguido da sua construção, montagem na planta piloto e testes de desempenho. Durante o desenvolvimento dos dispositivos de irradiação foram estudados:

- a- interação da radiação (feixe de elétrons) com líquidos;
- b- dimensionamento dos parâmetros hidrodinâmicos;
- c- material para o dispositivo de irradiação;

Embora o acelerador disponível no IPEN, permita uma varredura do feixe de elétrons de 120cm, adotou-se a largura de 60cm para todos os dispositivos de irradiação desenvolvidos. Esta dimensão permitiu obter um melhor rendimento do acelerador disponível, concentrando-se em uma dimensão menor os elétrons emitidos, conseqüentemente aumentando a taxa de dose disponível no acelerador e do ponto de vista hidráulico permitiu obter perfis desejados de fluxo com vazões reduzidas.

#### **2.4.2- Penetração do Feixe de Elétrons**

No presente trabalho procurou-se desenvolver um sistema de irradiação cuja eficiência do processo não seja tão dependente da energia dos elétrons, ou do controle da espessura do líquido a ser tratado. A penetração do feixe de elétrons é importante para se avaliar se o tempo de residência que um elemento de volume fica submetido ao bombardeamento pelo feixe de elétrons é suficiente para provocar as interações desejadas e também para a verificação do dimensionamento da espessura da lâmina de água do vertedouro do sistema de irradiação, de modo assegurar que todo o fluído que se move no dispositivo de irradiação é submetido ao bombardeamento com o feixe de elétrons, não existindo caminhos que possam ser percorridos pelo fluído sem sofrerem a interação com os elétrons.

O ponto, ou melhor, o caminho mais susceptível a não sofrer a interação é apresentado na Figura 16, junto a borda inferior do vertedor onde o líquido se desloca junto a parede do dispositivo de irradiação e a seguir abandona o dispositivo livre da interação com o feixe de elétrons e neste ponto, o poder de penetração deve ser superior a espessura da lâmina de água. O dimensionamento da espessura de água e a verificação são apresentados com detalhes no dimensionamento hidráulico do dispositivo de irradiação.

Nas aplicações da radiação na Física, Química, Biologia, Engenharia e Medicina, é importante ter uma informação precisa a respeito do poder de

frenamento linear ("linear stopping power") de partículas carregadas em diversos meios, sendo o poder de frenamento a média da taxa de perda de energia de partículas carregadas ao longo de seu percurso em determinado meio, sendo definido como a seguinte razão <sup>43</sup>:

$$S = \frac{dE}{dx} \quad (1.2)$$

Onde  $dE$  é o diferencial de energia da partícula carregada transferida ao meio quando percorre uma distância  $dx$ . A expressão clássica que descreve a perda de energia é conhecida como a fórmula de Beth apresentada a seguir<sup>41</sup>:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^2 z^2}{m_0 v^2} N B \quad (2.2)$$

Sendo:

$$B = Z \left[ \ln \left( \frac{2 m_0 v^2}{I} \right) \ln \left( 1 + \frac{v^2}{c^2} \right) \frac{v^2}{c^2} \right] \quad (3.2)$$

Nesta expressão  $v$  e  $z$  são a velocidade e a carga da partícula incidente,  $N$  e  $Z$  são número de átomos por grama e o número atômico do meio absorvedor,  $m_0$  é a massa de repouso do elétron e  $e$  é a carga do elétron e  $c$  a velocidade da luz. O parâmetro  $I$  representa o potencial médio de excitação e ionização do meio absorvedor e normalmente é um parâmetro determinado experimentalmente para cada elemento absorvedor.

Da fórmula acima pode-se observar que o valor de  $S$  varia de acordo com  $1/v^2$  ou inversamente com o valor da energia e também observa-se através do produto  $NZ$  que a perda de energia é maior para materiais com alta densidade e elevado número atômico.

Uma vez determinado a perda de energia do elétron ao longo do processo de interação é possível determinar o seu alcance ( $r_0$ ) no meio com densidade  $\rho$  através da relação:

$$r_0 = (E_0 \rightarrow E_f) = \rho \cdot \int_{E_f}^{E_0} s \cdot (E)^{-1} \cdot dE \quad (4.2)$$

Onde  $E_0$  é a energia do elétron incidente no meio e  $E_f$  a energia final do elétron que normalmente é da ordem de 10eV (energia comparável com o menor potencial de ionização da maioria dos materiais absorvedores).

Os valores de “stopping power” e do alcance dos elétrons calculados de acordo com o desenvolvimento das expressões acima são apresentados com detalhes na referência bibliográfica ICRU-Stopping Power for Electrons and Positrons<sup>44</sup> e a Tabela 3 apresenta os valores de “stopping power” e de alcance dos elétrons para a água na faixa de energia de interesse do presente trabalho que é definida em função da energia de aceleração do feixe de elétrons do acelerador do IPEN, variando de 0,5MeV a 1,5MeV.

A unidade utilizada é  $\text{g/cm}^2$  sendo expressa em termos de massa de material por unidade de área, ou seja a penetração de um  $\text{g/cm}^2$  é o mesmo que a penetração de um centímetro na água. Cabe observar que os valores das energias apresentadas na Tabela 3 são as incidentes no efluente a ser tratado já descontados os valores da degradação das energia ocasionadas pela interação do feixe de elétrons com a janela de titânio do acelerador e da interação com o ar antes atingir o efluente .

Tabela 3 – Valores de “stopping power” e alcance dos elétrons para o meio água<sup>44</sup>

Energia (MeV)	“Stopping power” (MeV.cm <sup>2</sup> /g)	Alcance (g/cm <sup>2</sup> )
0,5	2,03	0,18
0,6	1,96	0,23
0,7	1,91	0,27
0,8	1,89	0,33
0,9	1,87	0,38
1,0	1,85	0,44
1,2	1,83	0,57
1,5	1,82	0,71

### 2.4.3- Dimensionamento Hidráulico dos Sistemas de Irradiação

O dimensionamento hidráulico dos sistemas de irradiação desenvolvidos, principalmente dos parâmetros que influenciam na espessura da lâmina de água na região vertente, foram feitos utilizando-se da fundamentação do Teorema de Bernoulli<sup>45</sup> para líquidos perfeitos (líquido incompressível), apresentado através da seguinte fórmula:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 = \text{constante} \quad (5.2)$$

Sendo  $v_1$ ,  $p_1$  e  $z_1$  velocidade, pressão e altura manométrica do líquido que escoar pela secção  $ds_1$ ;  $v_2$ ,  $p_2$  e  $z_2$  velocidade, pressão e altura do líquido que escoar pela secção  $ds_2$ ,  $g$  a aceleração da gravidade e  $\gamma$  a densidade do líquido, representados na Figura 17.

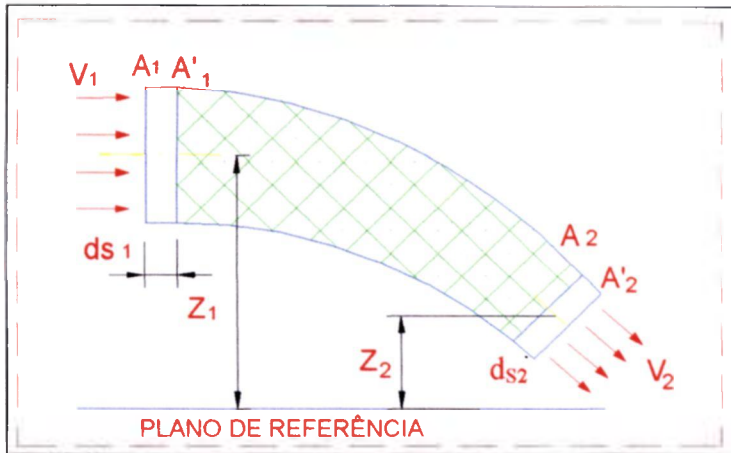


FIGURA 17: Representação de um tubo de corrente, no qual escoo um fluido<sup>43</sup>

Duas configurações foram estudadas estendendo-se o Teorema de Bernoulli, que é o mesmo princípio da conservação de energia, para casos práticos de vertedores ou vertedouros, que podem ser definidos como simples aberturas ou entalhes sobre os quais um líquido escoo e adotando-se modelos matemáticos simples que permitam correlacionar a carga manométrica ou altura da borda do vertedor com relação a superfície da água com a vazão do efluente.

Inicialmente, a configuração que apresenta uma parede delgada, representada na ilustração da Figura 18, permite obter por meio da fórmula prática de Francis apresentada por Azevedo Netto<sup>45</sup> a seguinte relação:

$$Q = 1,838 L H^{3/2} \quad (6.2)$$

Onde  $Q$  é o valor da vazão em  $m^3/s$ ,  $L$  a largura do vertedor e  $H$  a carga manométrica ou altura da borda do vertedor com relação a superfície da água e ambas as dimensões com unidade em m(metro). A dimensão  $h$ , mostrada na figura 18, é a da altura da superfície superior do efluente na região de queda livre do vertedor. Para a configuração de vertedor de parede delgada com espessura variando de 1mm a 2mm o valor de  $h$  é bastante próximo do valor correspondente ao da linha de energia do vertedor, sendo considerado  $h \approx H$ <sup>45</sup>.

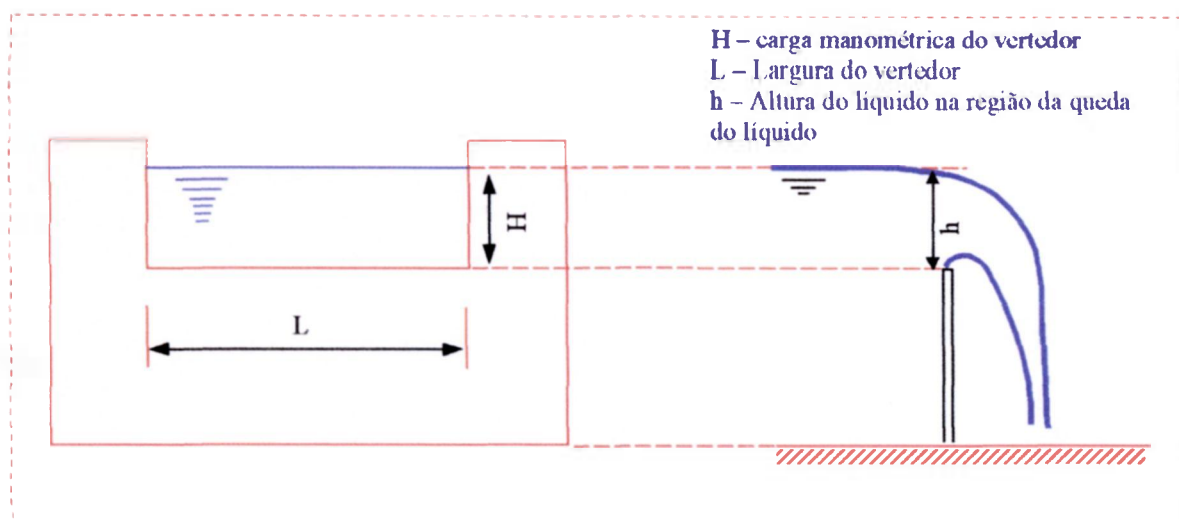


FIGURA 18: Representação de um vertedouro de parede delgada com abertura retangular de escoamento do líquido.

Para a configuração de vertedor com parede espessa ilustrado na Figura 19, a equação apresentada a seguir que estabelece a relação vazão em função da altura da carga do vertedor ( $H$ ), também foi deduzida a partir da equação de Torricelli <sup>46</sup>:

$$Q = 1,71 L H^{3/2} \quad (7.2)$$

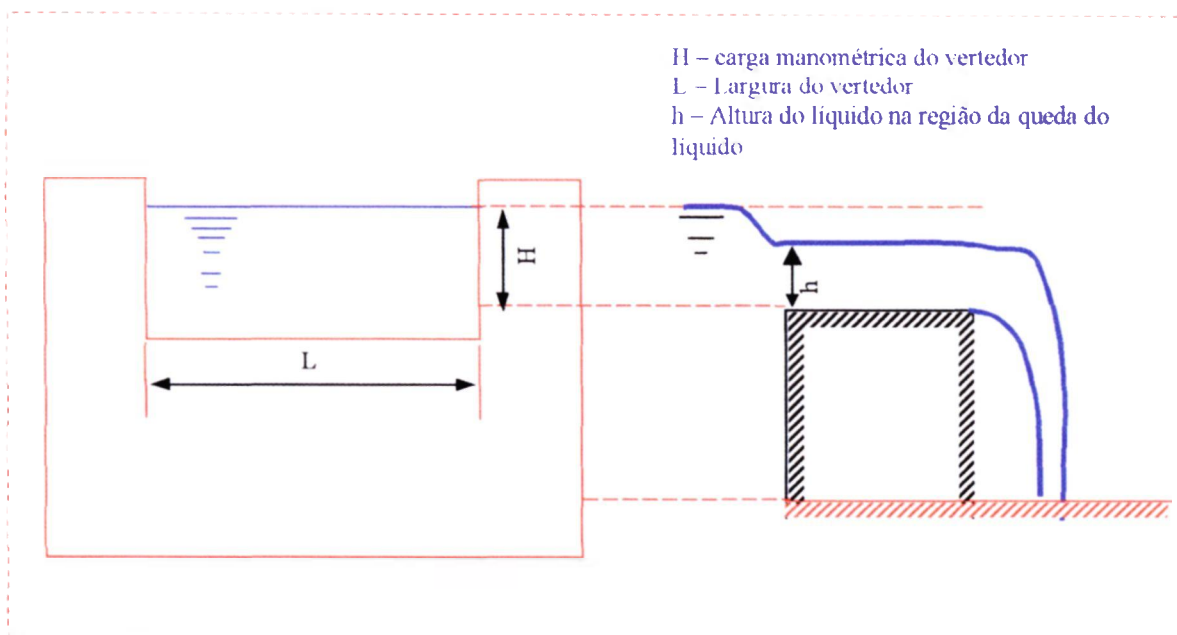


FIGURA 19: Representação de um vertedouro de parede espessa com abertura retangular de escoamento do líquido.

A diferença entre as duas configurações apresentadas acima está no valor de  $h$ , que para o vertedor de parede espessa tem valor igual a  $h=2/3H$ <sup>45,46</sup>. O aumento da espessura da parede do vertedor faz com que a espessura da lâmina do líquido ao abandonar o vertedor seja reduzida.

Considerando que o dispositivo de irradiação verte água pelos dois lados, os valores de  $H$  e  $h$  foram calculados utilizando-se das fórmulas acima apresentadas e o valor da vazão do sistema dividido por dois ( $Q/2$ ). Para os valores de vazão compatíveis com o sistema de bombeamento da planta piloto de irradiação e para uma largura de 0,6m do vertedouro, foram obtidos os valores de  $H$  e  $h$  apresentados nas Tabela 3 e Tabela 4 que correspondem, respectivamente, as configurações de vertedor de parede delgada e vertedor de parede espessa.

TABELA 4 - Valores da altura  $H$  do vertedor tipo parede delgada em função da vazão

$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q/2$ (m <sup>3</sup> /s)	$H \approx h$ (m)
$3,3 \times 10^{-4}$ [20 L/min]	$1,65 \times 10^{-4}$	$2,8 \times 10^{-3}$ [0,28 cm]
$4,9 \times 10^{-4}$ [30 L/min]	$2,45 \times 10^{-4}$	$3,6 \times 10^{-3}$ [0,36cm]
$6,7 \times 10^{-4}$ [40 L/min]	$3,35 \times 10^{-4}$	$4,5 \times 10^{-3}$ [0,45cm]
$8,3 \times 10^{-4}$ [50 L/min]	$4,15 \times 10^{-4}$	$5,2 \times 10^{-3}$ [0,52cm]
$10,0 \times 10^{-4}$ [60 L/min]	$5,0 \times 10^{-4}$	$5,9 \times 10^{-3}$ [0,59cm]

TABELA 5 - Valores da altura  $h$  do vertedor tipo parede espessa em função da vazão

$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q/2$ (m <sup>3</sup> /s)	$H$ (m)	$h(2/3H)$ (m)
$3,3 \times 10^{-4}$ [20 L/min]	$1,65 \times 10^{-4}$	$3,0 \times 10^{-3}$ [0,30 cm]	$2,0 \times 10^{-3}$ [0,20 cm]
$4,9 \times 10^{-4}$ [30 L/min]	$2,45 \times 10^{-4}$	$3,8 \times 10^{-3}$ [0,38cm]	$2,5 \times 10^{-3}$ [0,25 cm]
$6,7 \times 10^{-4}$ [40 L/min]	$3,35 \times 10^{-4}$	$4,7 \times 10^{-3}$ [0,47cm]	$3,1 \times 10^{-3}$ [0,31 cm]
$8,3 \times 10^{-4}$ [50 L/min]	$4,15 \times 10^{-4}$	$5,4 \times 10^{-3}$ [0,54cm]	$3,6 \times 10^{-3}$ [0,36 cm]
$10,0 \times 10^{-4}$ [60L/min]	$5,0 \times 10^{-4}$	$6,1 \times 10^{-3}$ [0,61cm]	$4,0 \times 10^{-3}$ [0,40 cm]

As Figuras 20 e 21 permitem visualizar, respectivamente, para as configurações de vertedor de parede delgada e parede espessa, sob a forma de gráficos, os valores das alturas do vertedor em função da vazão através do dispositivo de irradiação e o poder de penetração do feixe de elétrons em função da energia.

Observa-se a partir desses gráficos que os dispositivos de irradiação podem operar com segurança sem a ocorrência de regiões do fluxo contínuo que não sejam submetidas a interação com o feixe de elétrons, comprometendo, deste modo, a eficiência do processo.

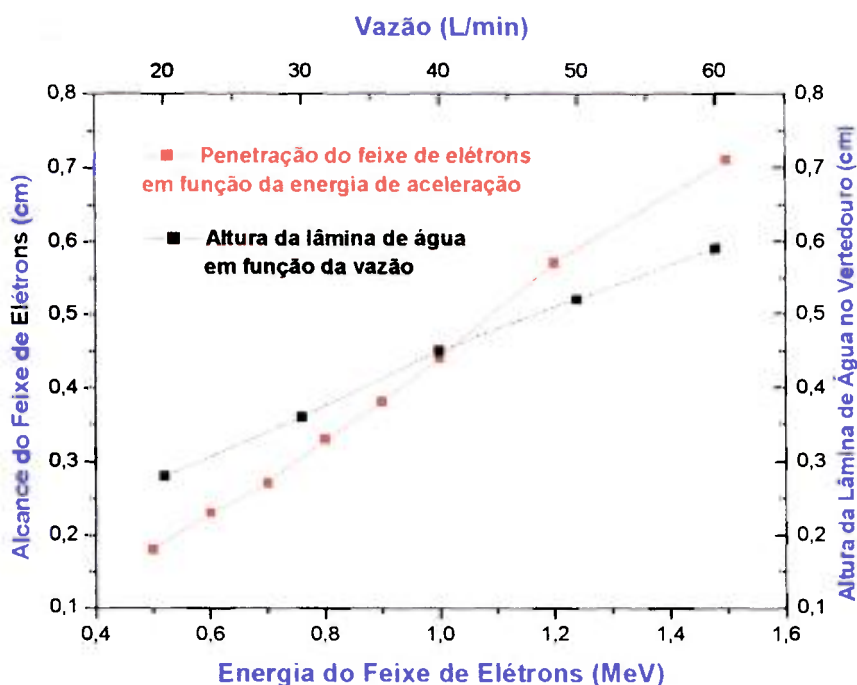


FIGURA 20: Poder de penetração do feixe de elétrons em função da energia, sobreposto ao gráfico da altura de carga do vertedouro de parede delgada em função da vazão de efluente que passa através do sistema de irradiação.

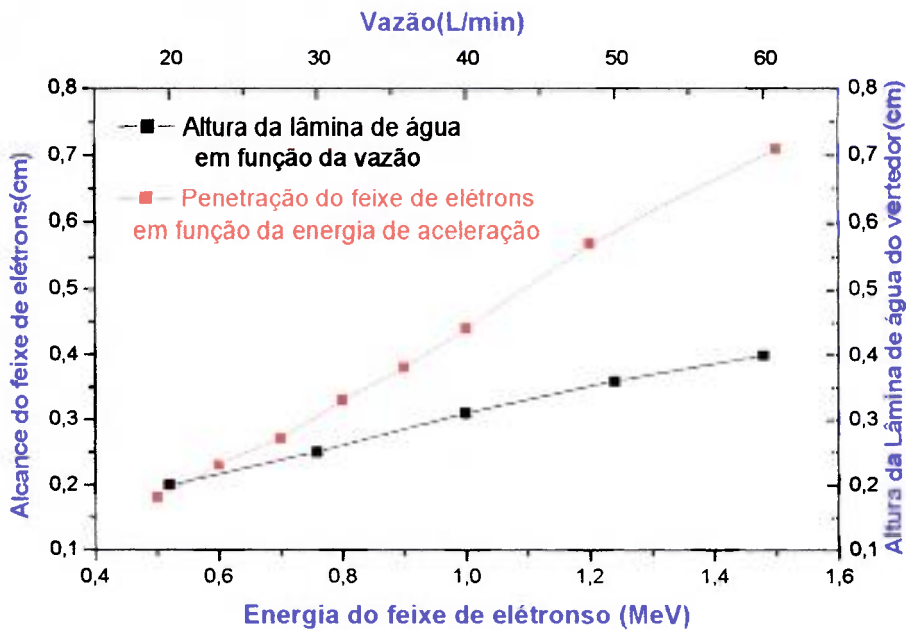


FIGURA 21: Poder de penetração do feixe de elétrons em função da energia, sobreposto ao gráfico da altura de carga do vertedouro de parede espessa em função da vazão de efluente que passa através do sistema de irradiação.

Por exemplo, para uma vazão de 60L/min a utilização de energia de aceleração do feixe de elétrons inferiores a 0,96 MeV, faz com que a penetração do feixe no vertedor de parede delgada se torne inferior a altura de carga do vertedouro ( $H$ ), criando uma região de passagem sem a ocorrência da interação desejada. Para o vertedor com parede espessa a vazão de 20L/min requer que a energia de aceleração do feixe de elétrons seja superior a 0,55MeV .

Utilizando a equação (7.2) e o valor obtido na Tabela 3 para penetração do feixe de elétrons pode-se estimar a limitação da vazão para o vertedouro de parede espessa para um acelerador de 1,5MeV com largura de varredura do feixe de elétrons de 180cm, que é a máxima largura para esse tipo de acelerador, em 400L/min ou 24m<sup>3</sup>/hora.

Considerando-se a situação mais crítica de operação estudada durante o presente trabalho onde a maior vazão (60L/min) e a menor energia de aceleração

dos elétrons (0,5MeV) são utilizados durante o processamento, o tempo de residência de um determinado elemento de volume durante o seu deslocamento sob a região de interação do feixe de elétrons pode ser estimado por meio por meio de:

- Secção transversal ( $S$ ) adotada para o dispositivo de irradiação: 0,60m de comprimento e 0,02m de largura (diâmetro do feixe de elétrons)  $S = 0,012\text{m}^2$ ;
- Vazão ( $Q$ ) =  $1,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  (60L/min);
- Velocidade média ( $v$ ) do fluido através da secção transversal, determinada pela formula  $Q=v.S$ , portanto  $v = 0,083\text{m/s}$ ;
- Penetração do feixe de elétrons para energia de 0,5MeV igual a 0,0018m (0,18cm), valor obtido da Tabela 2;
- Tempo de residência ( $t$ ) – A partir dos dados apresentados acima, o tempo que um elemento de volume com velocidade  $v = 0,083\text{m/s}$  gasta para se deslocar no dispositivo de irradiação uma distância equivalente ao valor da penetração do feixe de elétrons ( $E = 0,0018\text{m}$ ), pode ser determinado de modo simplificado, utilizando-se a fórmula do movimento retilíneo uniforme  $E = v.t$  ou  $t = E/v$ . Para o presente caso o valor do tempo de residencia é  $t = 0,0217\text{s}$

Comparando-se o tempo de residência com o tempo de varredura do feixe de elétrons ou seja com o tempo que o feixe leva para percorrer todo o comprimento do dispositivo e voltar para a mesma posição, igual a 1/100s (100Hz), valor este fornecido pela unidade eletrônica responsável pela deflexão cíclica do sistema de varredura do acelerador, observa-se que o tempo de residência calculado é no mínimo duas vezes superior ao tempo de varredura, isto quer dizer que o elemento de volume fica exposto à interação com o feixe de elétrons pelo menos duas vezes enquanto percorre a distancia equivalente a penetração do feixe de elétrons, garantindo que o líquido processado foi submetido a um campo de irradiação durante a sua passagem pelo dispositivo de irradiação.

#### 2.4.4- Materiais Utilizados na Construção dos Dispositivos de Irradiação

As principais características requeridas para o material em contato com os efluentes e com o meio externo, onde está instalado o dispositivo de irradiação no interior do da câmara de irradiação do acelerador de elétrons são as seguintes:

- Quimicamente estável e resistente a corrosão: com relação aos efluentes, na sua maioria são constituídos de compostos orgânicos e com extensa faixa de variação de pH, que durante a irradiação formam radicais agressivos acelerando a taxa de corrosão por um fator de 10 a 20<sup>47</sup>. Com relação ao meio externo, o dispositivo está exposto a uma atmosfera altamente agressiva devido a grande concentração de ozônio proveniente da ionização do oxigênio presente no ar, provocado pela interação com o feixe de elétrons, antes de incidir com o líquido do processo.
- Baixa condutividade térmica: devido ao sistema de monitoração do processo utilizar o princípio de calorimetria as paredes em contato com o fluido devem apresentar uma inércia térmica de modo a não transferir instantaneamente calor do líquido para o dispositivo de irradiação e vice versa, evitando instabilidade no sistema de medição.
- Boas propriedades de usinagem e soldagem: a confecção do dispositivo envolve grande quantidade de serviços de usinagem e soldagem do material empregado e principalmente durante a soldagem, estas propriedades representam facilidade em modificações posteriores e também na redução de custos de fabricação.

Atendendo as características acima, foi selecionado o aço inoxidável AISI 304 para construção de toda estrutura do dispositivo de irradiação e as tubulações, por apresentar as seguintes propriedades<sup>48</sup> :

- Composição básica: Cr(18%); Ni(8%); C(0,08%); Fe(71%); outros elementos de liga (3%). Estes elementos químicos e principalmente o Cromo, conferem a esta liga grande resistência a corrosão devido a camada apassivadora formada por Óxido de Cromo;
- Condutividade térmica : 113 Btu/sqft/hr/in<sup>0</sup>F, inferior a dos aços carbonos e das ligas de alumínio;
- Soldabilidade: apresenta excelente soldabilidade quando utilizado o processo TiG (“Tungsten Inert Gas”);
- Usinagem: similar aos aços carbono utilizados em construção mecânica, as chapas de aço inoxidável laminadas apresentam um grau de dureza um pouco acima dos aços carbono normalizados, apresentando uma dificuldade superior nas operações de furação e rosqueamento.

## **2.4.5- DISPOSITIVOS DE IRRADIAÇÃO DESENVOLVIDOS**

### **2.4.5.1- Primeiro Dispositivo de Irradiação**

A partir dos resultados do dimensionamento hidráulico, da seleção do material de construção do dispositivo de irradiação, das características do acelerador de elétrons disponível no IPEN, principalmente da energia de aceleração dos elétrons e da capacidade de varredura do feixe de elétrons, construiu-se o primeiro protótipo ilustrado na Figura 22.

Nesta versão básica optou-se pela configuração de vertedouro de parede delgada com 3mm de espessura considerando as seguintes características: facilidade de construção, de alinhamento da varredura do feixe de elétrons com relação ao eixo transversal do dispositivo de irradiação e principalmente pela

facilidade de nivelamento de modo a permitir uma espessura constante da altura da borda do vertedor com relação a superfície da água.

Pode-se observar na Figura 22 que o dispositivo é constituído basicamente de duas caixas de aço inoxidável, a menor recebe através de uma tubulação o efluente a ser tratado, a maior envolvendo a menor faz a coleta do líquido que foi bombardeado pelo feixe de elétrons.

Com o propósito de se uniformizar o fluxo ao longo de seu percurso vertical e se apresentar ao feixe de elétrons de uma maneira constante ao longo de todo o nível superior, formando uma lâmina de água de espessura constante, foram instalados no fundo da caixa interna de aço inoxidável, bem próximo a tubulação de admissão de água, difusores constituídos de tubos de alumínio, com furos não concêntricos forçando o líquido a percorrer uma série de chicanas, procurando tornar a distribuição de velocidade uniforme ao longo da seção longitudinal do dispositivo de irradiação, evitando desta forma, o estabelecimento de rotas preferenciais com aumento de vazão em pontos localizados, tornando tempo de residência menor do que o desejado, diminuindo a quantidade de interação do feixe de elétrons incidente.

Junto a tubulação de entrada de efluente foram instalados os sensores térmicos que forneciam sinal elétrico, que convertidos por meio de circuitos eletrônicos permitiram, em tempo real, a monitoração do processo.

Inicialmente foram instalados como elementos sensores de temperatura 4 termistores no interior da caixa que direciona o fluxo para o feixe de elétrons, esta disposição de sensores de temperatura é apresentada na Figura 23 e foi substituída no segundo dispositivo de irradiação

As dimensões de 60cm de comprimento e 2cm de largura da seção superior da caixa interna do dispositivo de irradiação, que é a mesma da superfície superior do efluente que se apresenta ao feixe de elétrons, coincidem respectivamente com a amplitude da varredura e com o diâmetro do feixe de elétrons e a distância do nível superior com relação a janela de titânio de onde

energia o feixe de elétrons foi de 30cm. Esta distância foi mantida para os demais dispositivos estudados.

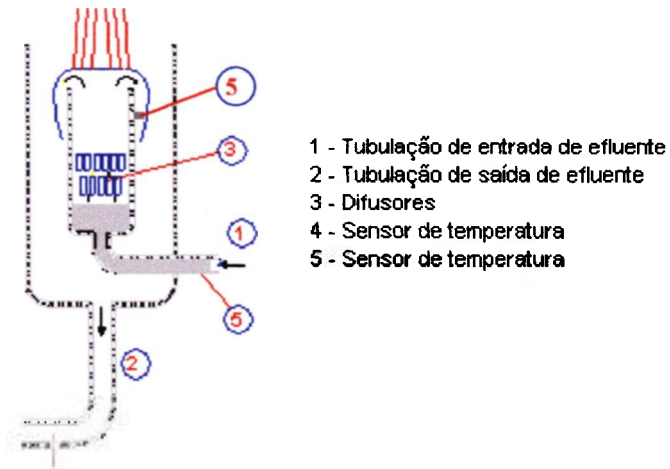


FIGURA 22: Desenho esquemático mostrando um corte transversal do primeiro dispositivo de irradiação construído

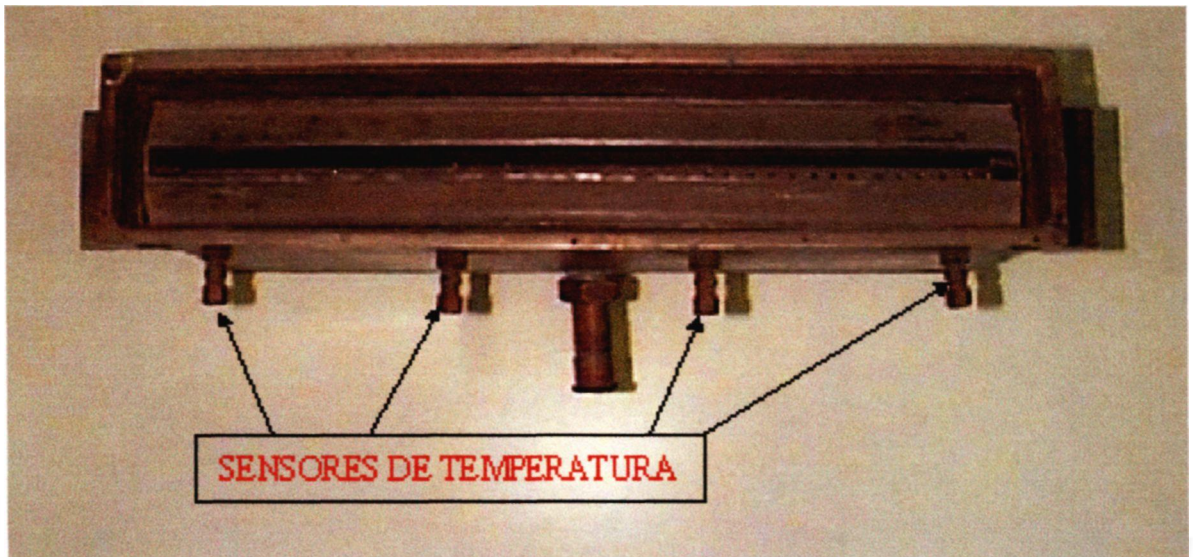


FIGURA 23: Posição dos sensores de temperatura do primeiro dispositivo de irradiação

### 2.4.5.2- Segundo Dispositivo de Irradiação

Em razão do baixo desempenho apresentado pelo primeiro dispositivo de irradiação, quando comparado com os dados disponíveis na literatura de outros sistemas de irradiação<sup>31,33,38,39</sup>, vários experimentos foram realizados procurando-se alterar a geometria do vertedor, passando-se para a configuração tipo vertedor de parede espessa que permite, no ponto de extravaso do efluente, uma altura menor para o mesmo valor de vazão da configuração vertedor de parede delgada. O propósito da alteração foi o de aumentar a interação do feixe de elétrons com o fluxo que passava através da seção transversal do dispositivo.

Neste sentido, procurou-se experimentalmente, uma geometria que aumentasse a espessura da soleira do vertedor procurando diminuir a altura da borda de extravaso do vertedor junto a parede interna da caixa com relação a superfície da água aumentando o tempo de residência do efluente no momento em que este se apresentava para o feixe de elétrons, permitindo que a geometria do feixe cobrisse toda a superfície do efluente no seu movimento ascendente.

A partir dos cálculos realizados no dimensionamento hidráulico dos vertedouros, verificou-se que a razão do baixo desempenho do primeiro dispositivo de irradiação, estava associada a pequena espessura das paredes da caixa que se comportava como um duto de seção retangular, onde vertia o efluente. A largura das soleiras restringiam-se à apenas a espessura da chapa da caixa interna (3mm). Na literatura<sup>43,44</sup> observa-se que a geometria de vertedor de parede espessa (soleiras) apresenta, teoricamente para a mesma vazão, uma altura da borda do vertedor ( $h$ ) menor.

A partir desta informação, várias formas geométricas foram testadas, alterando-se basicamente a inclinação e a largura da soleira do vertedor do dispositivo de irradiação até alcançar a forma geométrica otimizada apresentada na Figura 24, que possibilitou um desempenho equivalente aos registrados na literatura e para algumas vazões superiores.

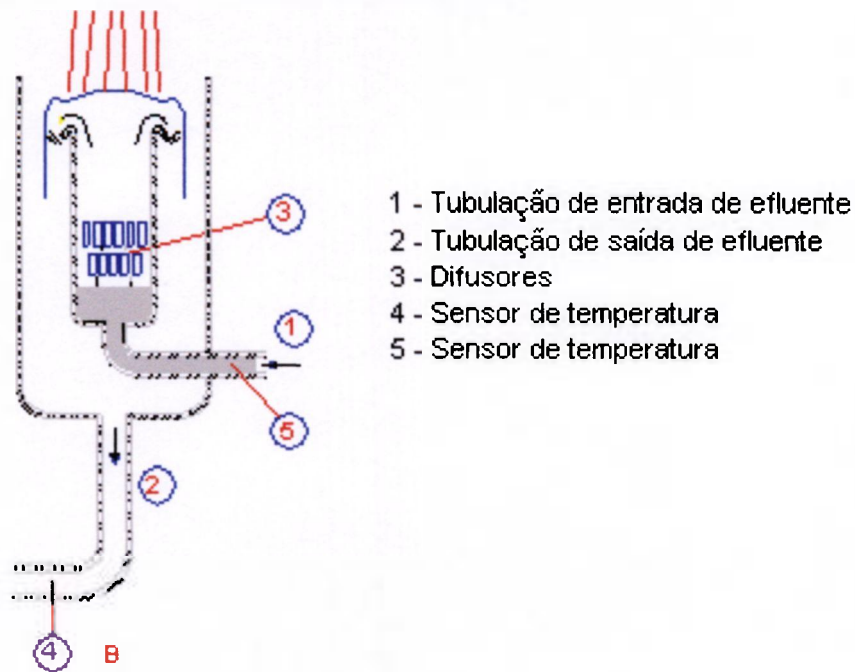


FIGURA 24: Desenho esquemático mostrando um corte transversal do segundo dispositivo de irradiação construído

Na Figura 25 é mostrado o dispositivo construído e o Anexo 1 o seu desenho de conjunto com detalhes construtivos da aba na sua versão otimizada.

A diferença existente entre o primeiro e o segundo dispositivo de irradiação consiste unicamente na adição no sentido longitudinal do dispositivo, de uma soleira, construída em aço inoxidável com 30mm de largura, 3mm de espessura, com a ponta dobrada para cima formando um angulo reto. A soleira foi soldada rente a borda superior da caixa interna do dispositivo com uma inclinação de  $75^{\circ}$  com relação a parede vertical da caixa interna de aço inoxidável.

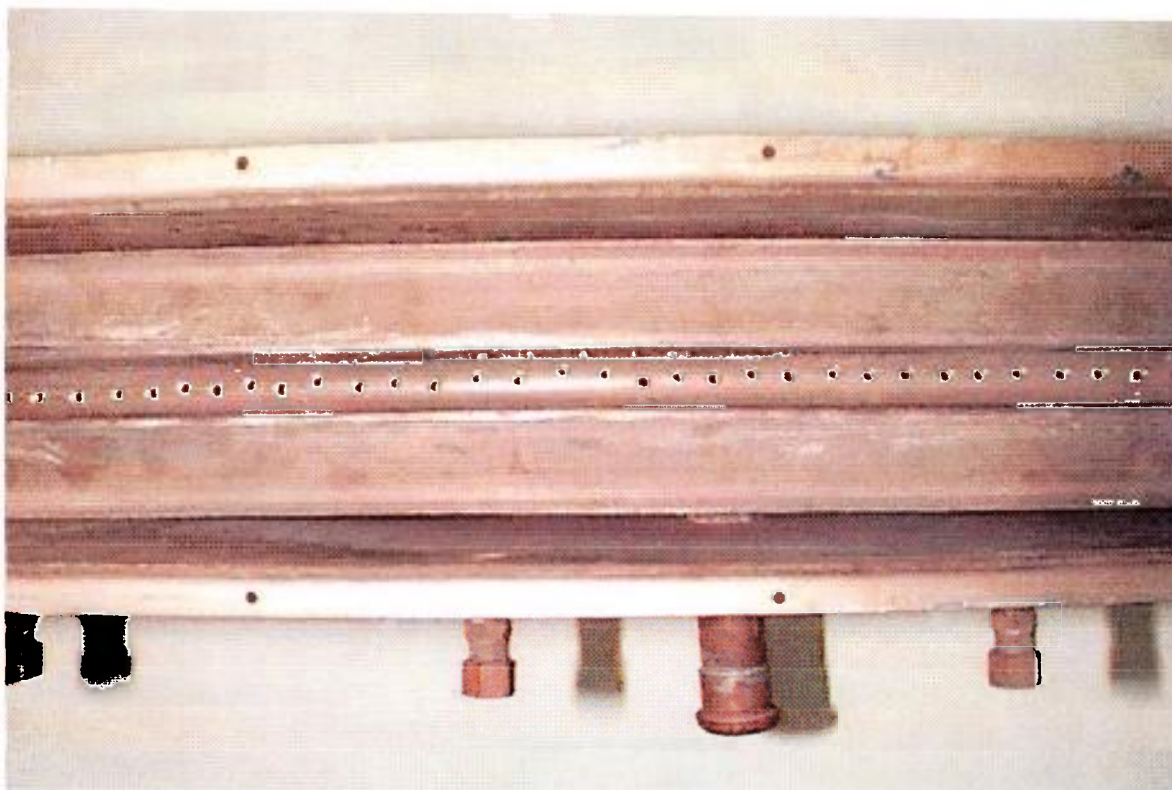


FIGURA 25: Segundo dispositivo de irradiação com indicação da soleira do vertedor

#### 2.4.5.3- Terceiro Dispositivo de Irradiação

Em consequência dos bons resultados de desempenho alcançados com o segundo dispositivo de irradiação, foram estudadas várias modificações para facilitar a utilização do dispositivo do ponto de vista operacional. No terceiro dispositivo de irradiação foi incorporado na sua parte superior uma janela de titânio com a espessura de  $50\mu\text{m}$ , indicada na Figura 26, que permite a irradiação de efluentes em “circuito fechado”, sem o contato com o meio ambiente.

A incorporação da janela faz com que haja um elemento adicional para atenuação da energia do feixe de elétrons, ocasionando uma queda no rendimento global da potência liberada pelo acelerador e o seu aproveitamento na

interação com o efluente a ser tratado. Por outro lado, esta janela isolando o ambiente onde ocorre as interações, permite que, produtos perigosos ou produtos que por radiólise possam gerar sub-produtos tóxicos, sejam beneficiados com segurança, sem riscos para os operadores e contaminação do meio ambiente.

A janela de titânio faz com que o dispositivo de irradiação opere como um vaso fechado, permitindo também um controle da atmosfera onde ocorrem as interações com o feixe de elétrons, possibilitando a realização de estudos que combinam técnicas alternativas que utilizam gases altamente reativos como ozônio<sup>38,39,40</sup> podendo aumentar a eficiência da degradação de compostos orgânicos.

O terceiro dispositivo também permite, com facilidade, a remoção da janela de titânio, passando a operar como os primeiros dispositivos desenvolvidos na situação de circuito aberto aumentando a eficiência do sistema.

Outra novidade incorporada no terceiro dispositivo, foi a remoção da aba lateral, e o seu efeito substituído com a introdução dos defletores (aletas direcionadoras de fluxo) logo após os difusores, constituídos de lâminas de aço inoxidável ao longo da extensão longitudinal do dispositivo, ilustrados na Figura 26. Estas lâminas permitiram que o vertedor trabalhasse como se fosse constituído de uma soleira dupla com o propósito de se obter uma maior redução da altura da borda do vertedor com relação a superfície da água, e um aumento da eficiência da interação dos feixes de elétrons de menor energia de aceleração.

Do ponto de vista construtivo, o terceiro dispositivo foi concebido para ser mais robusto e permitir o movimento vertical da caixa interna com relação a externa, possibilitando a regulação da distância do nível superior do efluente com relação a janela de titânio do dispositivo de irradiação e também com relação a janela do acelerador de elétrons. Na Figura 27 são mostradas as diferentes posições do terceiro dispositivo de irradiação e na Figura 28 é apresentado o dispositivo montado no interior da câmara de irradiação sob o acelerador de elétrons. O desenho de conjunto de fabricação do terceiro dispositivo é apresentado no Anexo 2.

Com o propósito de otimizar o desempenho do terceiro dispositivo, a configuração geométrica ou melhor os espaçamentos entre as aletas direcionadoras de fluxo, mostradas na Figura 22 com as indicações E1 e E2, foram alteradas de acordo com as indicações abaixo e para cada configuração foram realizados experimentos de irradiação determinando-se a eficiência do processo .

Espaçamento A – abertura das aletas centrais:  $E_1 = 2,5\text{mm}$

abertura das aletas laterais:  $E_2 = 2,0\text{mm}$

Espaçamento B – abertura das aletas centrais:  $E_1 = 2,5\text{mm}$

abertura das aletas laterais:  $E_2 = 3,0\text{mm}$

Espaçamento C – abertura das aletas centrais:  $E_1 = 3,5\text{mm}$

abertura das aletas laterais:  $E_2 = 1,5\text{mm}$

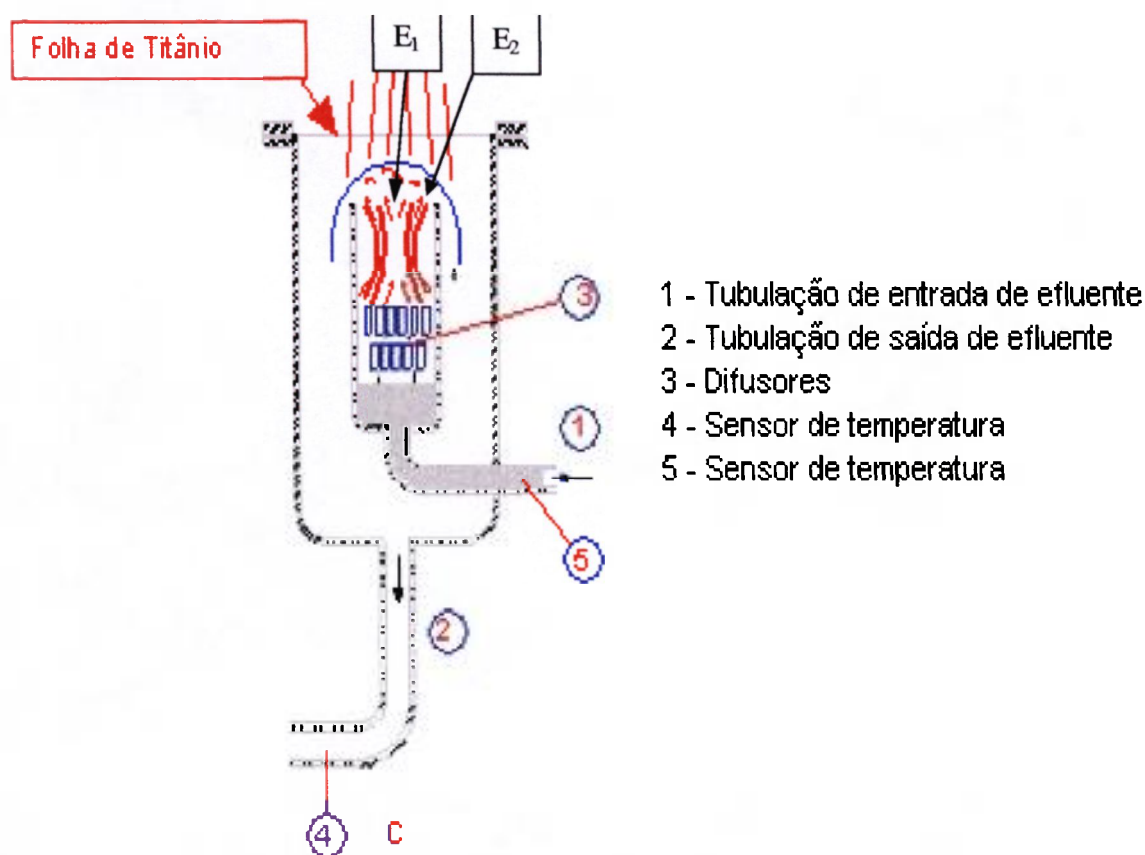


Figura 26: Desenho esquemático mostrando um corte transversal do terceiro dispositivo de irradiação construído

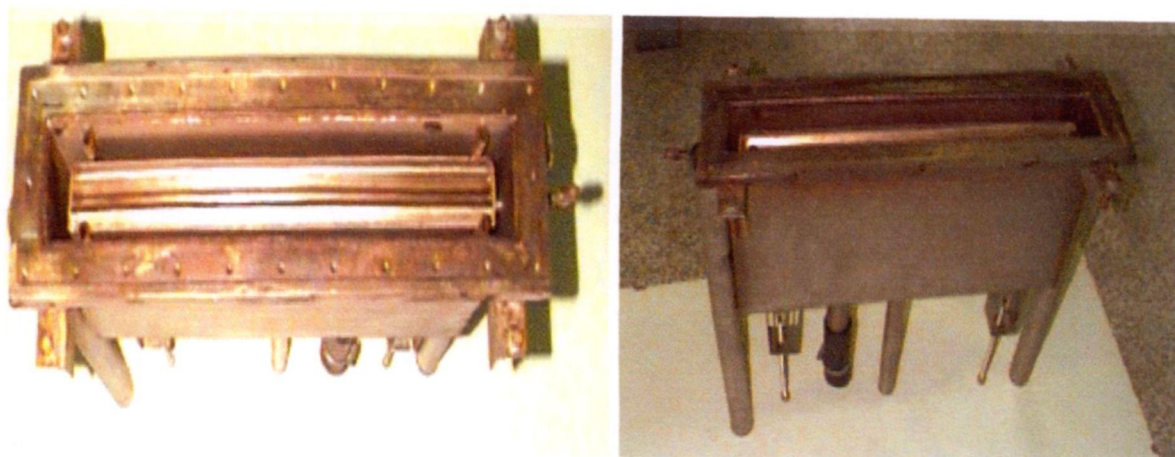


Figura 27: Diferentes posições do terceiro dispositivo de irradiação construído

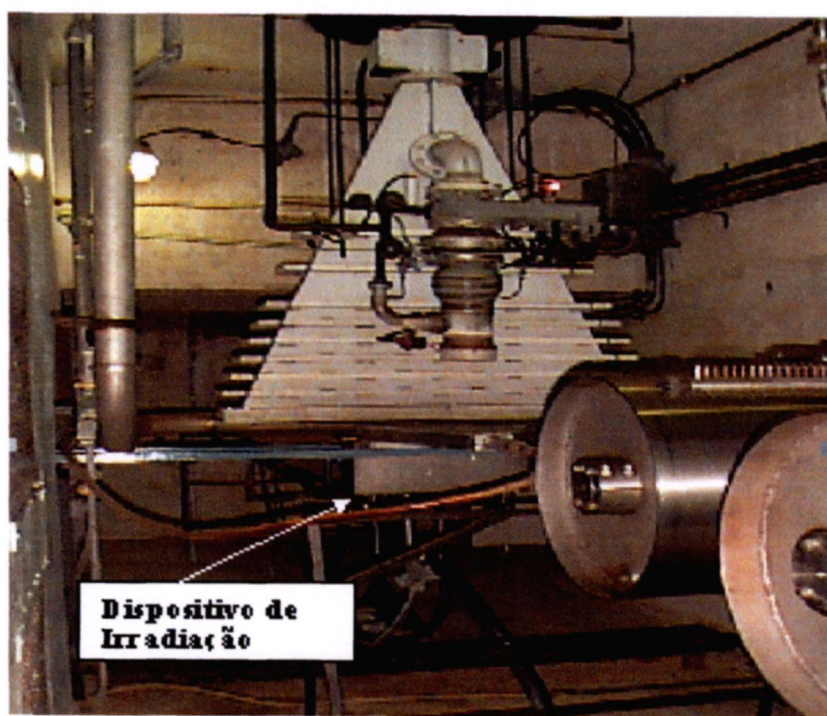


Figura 28: Dispositivo de irradiação montado sob o "scan horn" do acelerador de elétrons no interior da câmara de irradiação.

## 2.4.6- SISTEMA DE CONTROLE DOSIMÉTRICO

A busca de um maior controle dos parâmetros, que influenciam na dose absorvida pelo efluente, levou à necessidade de se obter respostas mais rápidas e confiáveis do conjunto dosimétrico.

Foram desenvolvidos sistemas dosimétricos tipo calorímetro, tendo como princípio, que a absorção de energia em um meio provoca a elevação de sua temperatura possibilitando associar uma relação da temperatura com a dose absorvida. Os calorímetros são amplamente utilizados apresentando bons resultados, e para determinadas aplicações, considerados como dosímetros de referência<sup>41</sup>.

Dois sistemas calorimétricos, similares ao descrito na literatura, foram desenvolvidos, com as alterações predominantes nos elementos sensores de temperatura. No primeiro sistema, utilizou-se como elemento sensor termistores, sendo cinco unidades de sensores posicionadas na entrada do dispositivo de irradiação e cinco unidades posicionadas na saída.

Como esse sistema apresentou uma série de problemas na aquisição de dados, no “software” de processamento das informações e também requerendo constantes calibrações, tomando-se instável para aplicação desejada que era de um controle confiável para o processo de irradiação, foi substituído por outro que utiliza circuitos integrados, dedicados a medir a temperatura e de um sistema de entrega de dados, que na sua forma mais simples, pode utilizar um multímetro digital de uso comum para se efetuar a medida da dose.

O princípio básico que norteia a determinação da dose absorvida pelo efluente que interage com o feixe de elétrons no interior do dispositivo de irradiação, vale-se de que a interação do feixe de elétrons transfere uma quantidade de energia ao efluente, elevando a sua temperatura.

A partir da equação fundamental da calorimetria para elevar a temperatura de 1 °C de um grama de água devemos depositar uma energia ( $E$ ) de uma caloria (cal) e que uma caloria corresponde a 4,18Joule (J) e para um sistema contínuo, isto equivale que um determinado elemento de massa  $\Delta m$  (g) do efluente ao receber uma quantidade de energia  $E$ , tenha a sua temperatura elevada de  $T_2$  (temperatura após a interação com o feixe de elétrons em °C) menos  $T_1$  (temperatura antes de sofrer a interação em °C) e  $c$  é o calor específico, que pode ser resumida na seguinte fórmula de calorimetria :

$$E(\text{cal}) = \Delta m(\text{g}) \cdot c \cdot [T_2 - T_1] (\text{°C}) \quad (8.2)$$

Sabendo-se que para a água  $c = 1 \text{ cal. } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ , substituindo-se a unidade caloria por Joule e a unidade grama por kilograma teremos:

$$E(\text{J}) \times 4,18 = \frac{\Delta m(\text{kg})}{1000} \times [T_2 - T_1] (\text{°C}) \quad (9.2)$$

A unidade de dose definida pelo Sistema internacional é o Gray (Gy) que corresponde a um Joule de energia absorvida por um kilograma de material irradiado:  $\text{Gy} = \text{J/kg}$ . Assumindo-se a unidade de massa  $\Delta m$  igual a 1kg de efluente e dividindo-se os dois lados da equação acima pela unidade de massa em kg teremos:

$$\frac{E(\text{J})}{1(\text{kg})} \times 4,18 \times 1000 = \Delta m(\text{kg}) \times [T_2 - T_1] (\text{°C}) \times \frac{1}{1(\text{kg})} \quad (10.2)$$

O dimensional do termo esquerdo da equação acima J/kg passa ser dose absorvida em Gy e o da direita em °C estabelecendo-se a relação:

$$D (\text{Gy}) \times 4,18 \times 1000 = [T_2 - T_1] (\text{°C}) \quad (11.2)$$

ou em kGy obtém-se:

$$4,18 \times D \text{ (kGy)} = \Delta T(^{\circ}\text{C}) \quad (12.2)$$

A relação acima representa que um incremento de 1°C no efluente corresponde que o mesmo absorveu uma dose de 4,18kGy ou inversamente, que cada kGy absorvido provoque um incremento de 0,239 °C no efluente irradiado.

#### 2.4.6.1- CIRCUITO ELETRÔNICO

Para medida da diferença de temperatura utilizou-se um sensor de temperatura na tubulação de entrada do dispositivo de irradiação e outro na tubulação de saída. A Figura 23 ilustra a montagem dos sensores nas tubulações.

A diferença fundamental entre os sistemas dosimétricos desenvolvidos, consiste nos circuitos integrados utilizados como sensores de temperatura em substituição aos termistores normalmente utilizados nos calorímetros. Esses componentes enviam suas informações a um circuito eletrônico subtrator, que evitando as conversões feitas por circuitos analógicos digitais, realiza uma única transformação deste tipo, minimizando desta forma o erro do conversor analógico digital disponível no sistema que utilizava termistores, com o inconveniente de possuir uma quantidade de "bits" insuficiente para a precisão desejada <sup>49</sup>.

No sistema dosimétrico atualmente utilizado, a medida da diferença de temperatura está centrada em um circuito integrado transdutor de temperatura em corrente elétrica, eletronicamente linearizado com precisão garantida pelo fabricante, assegurando que cada componente foi ajustado individualmente a laser. O circuito integrado é o AD590J da INTERSIL/GE <sup>50</sup>, que por meio de um circuito externo de linearização, limita a um máximo de 0,05 °C de não linearidade

na curva de tensão x temperatura para uma variação máxima da temperatura de 25 °C, permitindo uma precisão na linearização de 0,02°C.

Os circuitos integrados transdutores de temperatura foram montados em uma base de latão com rosca de meia polegada padrão NPT e fixados com resina epoxi garantindo a estanqueidade do conjunto. Na Figura 29 é mostrado um elemento sensor montado na sua respectiva base.

O esquema elétrico utilizado, com exceção da fonte simétrica de + 5 V e - 5 V está representado na Figura 30, onde pode-se observar a disposição dos sensores de temperatura de entrada e saída. A saída do circuito pode ser conectada a um multímetro digital onde, a título de exemplo, uma leitura de 41,8 mV representa o equivalente em dose absorvida de 4,18 kGy.

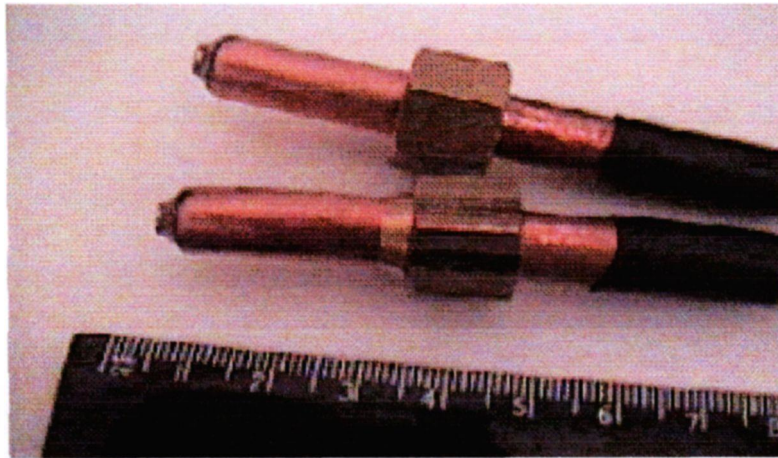


Figura 29: Elemento sensor térmico montado em acoplamento.

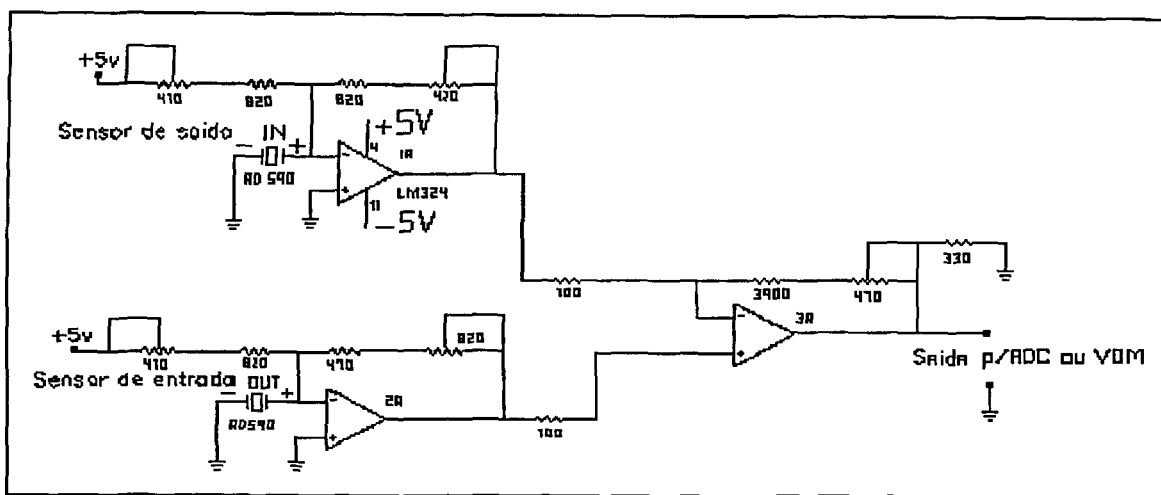


Figura 30: Esquema elétrico do circuito utilizado no calorímetro<sup>49</sup>.

Os resistores apresentados no esquema elétrico da Figura 30 são ajustáveis no circuito de entrada de cada sensor com o objetivo de melhorar a linearização no intervalo de temperaturas utilizado.

A escolha deste intervalo considerou a variação máxima de temperatura ambiente, bem como a variação ocasionada pelo processo de irradiação e também a menor amplitude possível para se obter uma maior precisão. No circuito eletrônico logo após os componentes de linearização, é efetuada a subtração, obtendo-se a diferença de temperatura e sua posterior multiplicação pelo fator 4,18, ajustado por um multímetro digital marca Keithley 617.

Convém salientar que a utilização de um amplificador operacional neste arranjo permitiu uma baixa impedância de saída ao circuito e conseqüentemente uma minimização de ruídos na transmissão das informações para a sala de controle onde foram instalados os circuitos para leitura.

Para o controle do processo de irradiação, bem como do fluxo de água e de suas flutuações, foi desenvolvido um "software" que permite a visualização na tela, em tempo real, do valor da dose absorvida e da vazão do efluente durante o processamento. É interessante salientar que uma flutuação observada em torno de 0,2kGy na medida lida no computador é predominantemente devida a

incerteza provocada pela placa de 12 “bits” e esta instabilidade é uma ordem de grandeza menor quando esta medida é feita no multímetro marca Keithley cuja precisão é assegurada pelo conversor interno deste multímetro, possibilitando um resultado mais preciso e demonstrando a estabilidade do circuito desenvolvido<sup>49</sup>.

A aferição dos sensores de temperatura foi realizada no Laboratório de Calibração de Instrumentos do Centro de Engenharia Nuclear do IPEN, utilizando-se uma estufa com sistema de homogeneização de temperatura e comparou-se os valores das leituras dos sensores com os obtidos em termômetro calibrado com precisão na escala de centésimos de grau Celsius.

Após a realização de 4 sequências de comparação das leituras, variando-se a temperatura de 5 em 5 graus Celsius dentro da faixa de 10°C à 50°C, observou-se que a não linearidade na conversão dos valores de temperatura em função da tensão foi inferior a 5%.

O circuito desenvolvido comportou-se como o desejado, apresentando respostas imediatas às variações no fluxo do efluente ou da corrente do acelerador de elétrons. Para facilidade operacional, o “software” incorporou um conjunto de medidas que permitem a compensação de eventuais diferenças de temperatura (estabelecimento do ponto zero) entre os valores medidos na entrada e na saída da caixa de irradiação, estas medidas permitem estabelecer o ponto de dose igual a zero, quando o dispositivo de irradiação não está sujeito ao bombardeio com o feixe de elétrons. Este recurso possibilita que esta operação seja feita na sala de controle, evitando a necessidade de interferir no circuito, que é mantido junto a caixa de irradiação no interior da câmara de irradiação do acelerador de elétrons.

## 2.4.7- RENDIMENTO DOS DISPOSITIVOS DE IRRADIAÇÃO

O rendimento do dispositivo de irradiação está associado com a eficiência da transferência de energia do feixe de elétrons para o efluente, ou seja, da dose absorvida pelo produto que está continuamente sendo processado. Portanto torna-se dependente da quantidade de elétrons por unidade de tempo que é caracterizada pela corrente do feixe de elétrons (miliAmperes) gerada pelo acelerador e também pela energia dos elétrons que corresponde ao potencial de aceleração do feixe de elétrons (Megaelétron-Volts). Portanto, faz-se necessário estabelecer uma relação teórica entre a vazão mássica do efluente processado com a correspondente dose absorvida após a irradiação.

Teoricamente a dose absorvida ( $Gy$ ) é definida como sendo a quantidade de energia absorvida ( $J$ ) por unidade de massa ( $kg$ ) do produto irradiado conforme expressão a seguir:

$$1Gy = \frac{J}{kg} \quad (13.2)$$

$$1Watt \text{ é igual a } 1Joule \text{ por segundo} \rightarrow W = \frac{J}{s} \text{ ou } J = W \times s$$

Substituindo-se a unidade de energia  $J$  na formula acima obtém-se:

$$Gy = \frac{W \times s}{kg} \text{ ou } \frac{kg}{s} = \frac{W}{Gy} \quad (14.2)$$

A unidade de potência em  $W$  representa o produto do potencial de aceleração dos elétrons  $V$  (V) pela corrente do feixe de elétrons  $i$  (A) gerado no filamento do acelerador. Substituindo-se este produto na fórmula acima obtém-se:

$$\frac{kg}{s} = \frac{V \times i}{Gy} \quad (15.2)$$

transformando-se a unidade segundo para horas, a equação resulta em:

$$\frac{kg}{h} = 3600 \times \frac{V \times i}{Gy} \quad (16.2)$$

A tensão de aceleração dos elétrons é apresentada em eV (elétron-volt) que corresponde a energia adquirida por um elétron quando submetido a um campo eletrostático  $V$  de um volt. Como a energia de aceleração é elevada, normalmente a tensão de aceleração é apresentada em milhões de elétron-volt (MeV), a corrente do feixe  $i$  na unidade mili-ampere (mA) e a faixa de dose utilizada no tratamento de efluentes situa-se em unidades ou frações de kGy; a equação equivalente que estabelece a relação entre a vazão mássica ( $Q$ ) e a dose teórica absorvida durante a irradiação transforma-se em:

$$Q(kg / h) = 3600 \times \frac{V(MeV) \times i(mA)}{D_T(kGy)} \quad (17.2)$$

A expressão (17.2) permite obter o valor teórico da dose absorvida ( $D_T$ ), através dos seguintes parâmetros que são característicos do processamento de tratamento de efluentes: vazão ( $Q$ ), energia do feixe de elétrons ( $V$ ) e corrente do feixe de elétrons ( $i$ ).

O valor da dose real absorvida ( $D_R$ ) pelo produto para os mesmos parâmetros acima fixados durante os experimentos, é obtido por meio de leitura direta no sistema dosimétrico descrito no item anterior, que registra em tempo real a vazão ( $Q$ ) e a correspondente dose absorvida pelo produto durante o processamento.

O rendimento global do processo de tratamento do efluente ( $\eta$ ), que leva considera a eficiência da interação dos elétrons com o líquido em beneficiamento, a perdas de interação do feixe com a janela de titânio do dispositivo de irradiação, se esta for utilizada, com a camada de ar existente entre a janela do acelerador de elétrons e a superfície do efluente é obtido por intermédio da simples relação da dose real ( $D_R$ ) com a dose teórica ( $D_T$ )

$$\eta = \frac{D_R}{D_T} \quad (18.2)$$

#### 2.4.8- AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE IRRADIAÇÃO

Os experimentos realizados foram concentrados na avaliação de eficiência dos dispositivos de irradiação desenvolvidos determinando-se o rendimento, seguindo metodologia anteriormente apresentada para diferentes condições de processamento. Nestes experimentos manteve-se constante a característica do líquido e utilizou-se a água de torneira de fornecimento SABESP como amostra padrão.

Com o propósito de avaliar a resposta do sistema dosimétrico com relação aos seguintes parâmetros de irradiação: corrente do feixe de elétrons, tensão de aceleração do feixe de elétrons e vazão do efluente no dispositivo de irradiação, parâmetros esses que influenciam diretamente a dose absorvida pelo efluente, bem como parâmetros externos como a temperatura ambiente, que pode indiretamente afetar as medidas de dose, os experimentos a seguir relacionados foram realizados procurando avaliar:

Estabilidade: nestes experimentos fixou-se os parâmetros de irradiação e ao longo do tempo por períodos superiores a 30 minutos e observou-se o comportamento da dose medida através do sistema dosimétrico. Estes experimentos foram repetidos na temperatura ambiente com o propósito de observar a influencia das condições do interior da câmara de irradiação no dispositivo de irradiação.

Tempo de resposta do sistema dosimétrico : realizaram-se experimentos com várias condições de operação, alterando-se os parâmetros de irradiação e para cada situação esperou-se no mínimo 20 minutos para garantir a estabilidade e o regime de processamento e abruptamente provocou-se um desligamento do

acelerador colocando no potencial zero a aceleração do feixe de elétrons e imediatamente observou-se a alteração da dose absorvida pelo efluente.

Verificação do sistema dosimétrico adotado: Com o propósito de verificar o comportamento do sistema foram realizados experimentos que permitiram estudar a degradação de produtos químicos corantes, atuando como dosímetros, em função de diferentes condições de rendimento do terceiro dispositivo de irradiação. Utilizou-se como dosímetro químico o composto nacional de nome comercial "Duacouro" HNG fornecido pela empresa A. Chemical S.A. e que é quimicamente similar ao "Acid Red 265", fabricado pela Nippon Kayaku Co. e utilizado no Japão para dosimetria em sistemas líquidos. Estabeleceu-se uma relação entre a redução da Absorbância em função da dose de radiação aplicada e as suas medidas foram realizadas utilizando-se um espectrofotômetro UV/VIS Shimadzu Co. - Japão modelo UV-1601 em modo varredura no comprimento de onda de 300nm a 700nm<sup>42</sup>.

Todos os experimentos foram realizados no acelerador do Centro de Tecnologia das Radiações (CTR) - IPEN precedidos de rotinas operacionais que permitiram a verificação e a reprodutibilidade dos parâmetros fixados para o processamento utilizando-se os dispositivos de irradiação desenvolvidos. Os principais parâmetros verificados foram:

Calibração do acelerador: é realizada com o propósito de determinar a energia de aceleração do feixe emergente da janela do acelerador com relação a energia induzida no tubo acelerador e também da corrente emergente com relação a corrente medida no painel do acelerador. Esta calibração é realizada pelo Grupo de Dosimetria do CTR e segue o procedimento estabelecido na norma *ASTM –Subcommittee E10.01 – Progress Report 34: Dosimetry for Radiation Processing*<sup>51</sup>. A frequência de calibração do acelerador é de 2 anos.

Calibração do medidor de vazão: é realizada com o propósito de relacionar a vazão medida no fluxometro montado na planta piloto com a vazão medida utilizando-se medidores de volumes e cronômetros calibrados. As aferições do

medidor de vazão normalmente precedem a montagem de cada arranjo experimental realizado.

Nivelamento dos dispositivos de irradiação: os dispositivos de irradiação são móveis e montados sob o “scan horn” do acelerador do CTR e a cada manutenção ou montagem de um novo arranjo experimental foi realizado o nivelamento do dispositivo de irradiação com o propósito de manter constante a espessura da lâmina ao longo de toda superfície do vertedor. Utilizou-se um nível com precisão de um milímetro em um metro.

Centralização do dispositivo de irradiação: com o propósito de garantir constante a varredura e a focalização do feixe de elétrons na região de interesse sobre o dispositivo de irradiação após a montagem de cada dispositivo, fixou-se sobre a superfície superior do dispositivo de irradiação um papel heliográfico e irradiou-se com energia de 1,5MeV e corrente de 2mA por um tempo de 2 minutos, a seguir o papel foi revelado com atmosfera de amônia indicando a zona de incidência do feixe, permitindo verificar a centralização e a focalização do feixe de elétrons.

## **2.5- VIABILIDADE ECONÔMICA**

A viabilidade da utilização da tecnologia de processamento de efluentes com feixe de elétrons depende na maior parte do custo do tratamento, que por sua vez depende da eficiência do processo e dos equipamentos e instalações necessárias para sua utilização. Para um estudo de viabilidade econômica com o propósito de determinar a melhor relação custo-benefício faz-se necessário definir a dose requerida para o tratamento e a vazão do efluente.

A partir destes dados define-se o tipo de acelerador a ser utilizado com a correspondente energia de aceleração e a capacidade de corrente do feixe de elétrons, define-se também, o dispositivo de irradiação a ser utilizado que otimize o aproveitamento do feixe de elétrons e determinam-se os custos operacionais de

modo a se obter o custo unitário para o tratamento de um metro cúbico do efluente.

No presente trabalho, o estudo de viabilidade econômica não apresenta uma definição das características do efluente a ser processado, mas sim um caso que considera a utilização de um determinado tipo de acelerador explorando as suas potencialidades quanto a máxima vazão disponível para diferentes valores de doses a serem absorvidas pelo efluente.

Adotou-se como modelo de estudo de viabilidade econômica a estimativa da análise de custo da publicação "*Manual for Preparation of Industrial Feasibility Studies*" da UNIDO<sup>52</sup>. Com o propósito de comparar os custos unitários de tratamento de efluentes com os dos demais pesquisadores que desenvolveram outros dispositivos de irradiação, adotou-se como moeda corrente o dólar americano (US\$).

Neste trabalho, os aceleradores adotados foram do tipo ICT (internal core transformer) com as seguintes energias de aceleração do feixe de elétrons e suas respectivas potências: 0,5MeV (32,5kW); 1,0MeV (65kW) e 1,5 MeV (97,5kW). O motivo da seleção deste tipo de equipamento foi o de ser uma das máquinas mais robustas e confiáveis existentes no mercado para aplicação industrial e de fornecimento regular de dois tradicionais fabricantes de aceleradores de elétrons: Radiation Dynamics Inc. (EUA) e Nissin Electric Co. Ltd. (Japão).

### 2.5.1- ESTIMATIVA DE CUSTO

*Custo total do Investimento* – O custo do capital investido considera todos os gastos envolvidos durante a fase de implantação da unidade de irradiação até os testes pré-operacionais. Na Tabela 6 apresentam-se os custos de investimento inicial de aceleradores de elétrons para várias energias.

TABELA 7 – Custos operacionais de aceleradores de elétrons com energias de 0,5MeV; 1,0MeV e 1,5MeV.

<b>Custos Operacionais (anual) (US\$)</b>	<b>0,5MeV (32,5kW)</b>	<b>1,0MeV (65kW)</b>	<b>1,5MeV (97,5kW)</b>
<b>Custos Fixos</b>			
Depreciação (20 anos – taxa de juros de 5% ao ano) <sup>9</sup>	161.979	177.354	214.600
Custo do Capital (taxa de juros de 5% ao ano) <sup>9</sup>	74.800	81.900	99.100
Administrativos: seguros, taxas (2% do custo do investimento) <sup>9</sup>	29.920	32.760	39.640
<b>Custos Variáveis</b>			
Manutenção (5% do custo do acelerador) <sup>9</sup>	55.000	63.500	76.000
Mão de obra direta	150.000	150.000	150.000
Utilidades–energia elétrica ao custo de US\$0,07/kWh <sup>54</sup>	18.200	36.400	54.600
Custo Operacional Anual	489.899	541.914	633.940
Custo Operacional Unitário (US\$/h)*	61,2	67,7	79,2

\* considerando um regime de operação de 8.000 horas/ano

*Custo Unitário de Processamento:* Para o tratamento de efluente o custo unitário de processamento é obtido dividindo-se o custo operacional da planta de irradiação pela quantidade processada. A informação do custo unitário é importante para comparação com o custo de técnicas alternativas e concorrentes similares que adotam a mesma tecnologia.

Para determinação da quantidade processada por hora no presente trabalho utilizou-se a fórmula apresentada no item 2.4.7 multiplicando-se o segundo termo da equação pelo rendimento do dispositivo de irradiação:

$$Q(\text{kg} / \text{h}) = 3600 \times \frac{V(\text{MeV}) \times i(\text{mA})}{D_T(\text{kGy})} \times \eta \quad (19.2)$$

Esta fórmula, considera o rendimento do dispositivo de irradiação para diferentes condições operacionais e permite, por meio dos resultados obtidos nos experimentos realizados, selecionar a melhor configuração de parâmetros operacionais do dispositivo de irradiação e utilizá-los na otimização dos custos unitários de processamento.

### 3- RESULTADOS

#### 3.1 EXPERIMENTOS REALIZADOS COM DISPOSITIVOS DE IRRADIAÇÃO

Para cada dispositivo de irradiação estudado foram realizados testes de irradiação em diferentes condições de operação, variando-se a energia (tensão de aceleração dos elétrons), intensidade de corrente e vazão do líquido processado, com o propósito de determinar a máxima eficiência dos parâmetros de operação da planta piloto. Nestes experimentos foram utilizadas mais de 200 horas do acelerador de elétrons do IPEN, cujos resultados mais significativos são a seguir apresentados.

##### 3.1.1- TESTES DE DESEMPENHO DO PRIMEIRO DISPOSITIVO

Para os testes do primeiro dispositivo de irradiação utilizou-se o primeiro arranjo experimental da planta piloto instalada no acelerador de elétrons do IPEN-CTR e termistores atuando como sensores do sistema dosimétrico e a vazão de efluente variou de 9L/min ( $0,54\text{m}^3/\text{hora}$ ) a 45L/min ( $2,7\text{m}^3/\text{hora}$ ).

O melhor resultado do primeiro dispositivo de irradiação é apresentado na Tabela 8, onde a coluna D.Calculada representa o valor da dose teórica fornecida pelo feixe de elétrons que emerge do acelerador e a coluna D.Medida representa a dose absorvida pelo efluente e medida pelo sistema dosimétrico. As células indicadas com a cor cinza são as que obtiveram a melhor eficiência para uma determinada vazão. Na Figura 31 é apresentado o gráfico da eficiência do

dispositivo em função da energia de aceleração do feixe de elétrons para diferentes vazões.

TABELA 8: Resultados do experimento de irradiação com o primeiro dispositivo de irradiação com otimização dos parâmetros de operação.

Energia (MeV)	Corrente (mA)	Vazão (L/min)	D. Calculada (kGy)	D. Medida (kGy)	Eficiência (%)
0,7	10,7	9,0	50,0	6,7	13
1,0	7,5	9,0	50,0	10,8	22
1,5	5,0	9,0	50,0	12,7	25
0,7	10,7	20	22,5	3,3	15
1,0	7,5	20	22,5	5,0	22
1,5	5,0	20	22,5	6,5	29
0,7	10,7	45	10,0	1,5	15
1,0	7,5	45	10,0	2,1	21
1,5	5,0	45	10,0	3,3	33

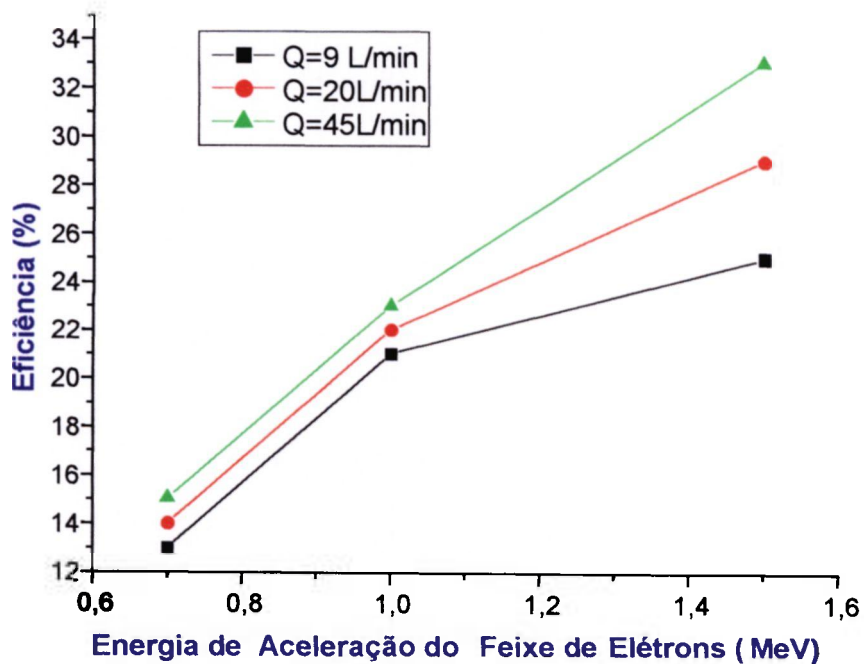


FIGURA 31: Eficiência do primeiro dispositivo de irradiação em função da energia de aceleração do feixe de elétrons para diferentes vazões do efluente.

### 3.1.2- TESTES DE DESEMPENHO DO SEGUNDO DISPOSITIVO

O segundo dispositivo foi ensaiado seguindo os mesmos procedimentos do primeiro, entretanto o sistema dosimétrico da planta piloto foi modificado com a utilização de circuitos integrados sensores de temperatura, que apresentaram maior facilidade de utilização e também maior estabilidade. Na Tabela 9 são apresentados os resultados das condições de operação otimizadas de modo a se obter a máxima eficiência do dispositivo e na Figura 32 é mostrado o gráfico correspondente a esta tabela da eficiência do dispositivo em função da energia de aceleração do feixe de elétrons para diferentes vazões.

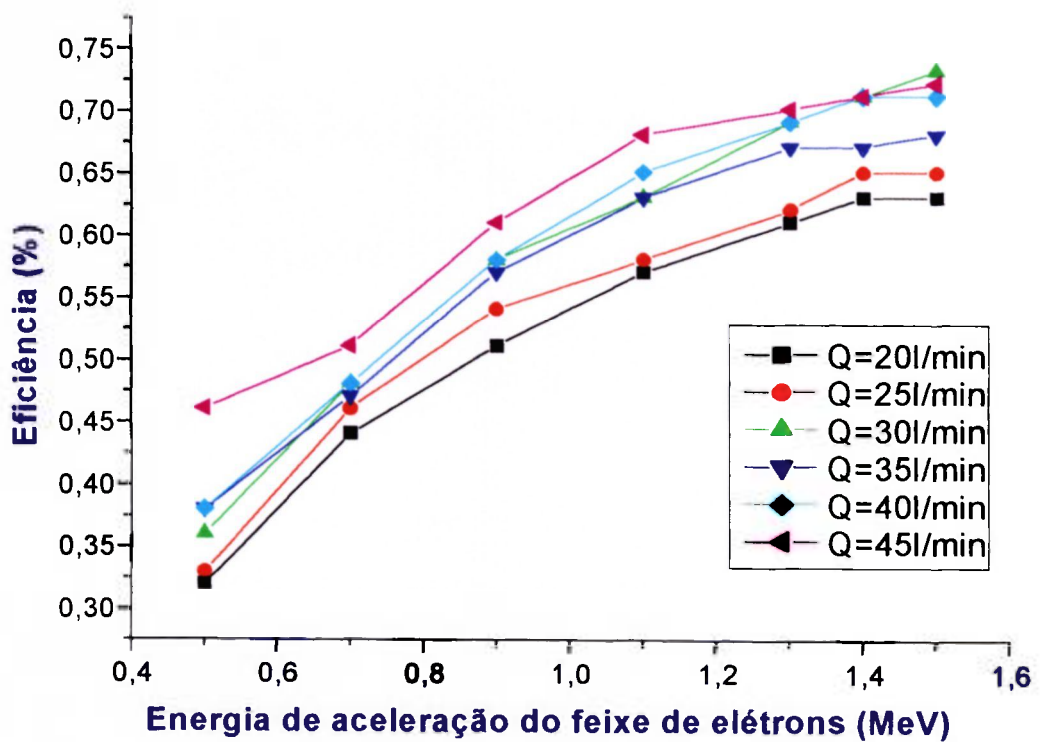


FIGURA 32: Eficiência do segundo dispositivo de irradiação em função da energia de aceleração do feixe de elétrons para diferentes vazões do efluente.

TABELA 09: Resultados do experimento de irradiação com o segundo dispositivo de irradiação com otimização dos parâmetros de operação.

Energia (MeV)	Corrente (mA)	Vazão (L/min)	D. Calculada (kGy)	D. Medida (kGy)	Eficiência (%)
0,5	3,3	20	5,0	1,6	32,3
0,7	2,4	20	5,0	2,2	43,7
0,9	1,9	20	5,1	2,6	50,7
1,1	1,5	20	5,0	2,8	56,6
1,3	1,3	20	5,1	3,1	61,1
1,4	1,2	20	5,0	3,2	63,5
1,5	1,1	20	5,0	3,1	62,6
0,5	4,1	25	4,9	1,6	32,5
0,7	3,0	25	5,0	2,3	46,1
0,9	2,3	25	5,0	2,7	54,1
1,1	1,9	25	5,0	2,9	58,1
1,3	1,6	25	5,0	3,1	62,1
1,4	1,5	25	5,0	3,3	65,0
1,5	1,4	25	5,0	3,3	65,5
0,5	5,0	30	5,0	1,8	36,0
0,7	3,6	30	5,0	2,4	47,6
0,9	2,8	30	5,0	2,9	57,5
1,1	2,3	30	5,1	3,2	63,2
1,3	1,9	30	4,9	3,4	68,8
1,4	1,8	30	5,0	3,6	71,4
1,5	1,7	30	5,1	3,7	72,5
0,6	5,3	35	5,0	1,9	38,0
0,7	4,1	35	4,9	2,3	46,7
0,9	3,2	35	4,9	2,8	56,7
1,1	2,6	35	4,9	3,1	63,2
1,3	2,2	35	4,9	3,3	67,3
1,4	2,1	35	5,0	3,4	67,5
1,5	2,0	35	5,1	3,5	68,1
0,6	6,1	40	5,0	1,9	37,8
0,7	4,8	40	5,0	2,4	47,6
0,9	3,7	40	5,0	2,9	58,1
1,1	3,0	40	5,0	3,2	64,6
1,3	2,6	40	5,1	3,5	69,0
1,4	2,4	40	5,0	3,6	71,4
1,5	2,2	40	5,0	3,5	70,7
0,5	7,5	45	5,0	2,3	46,0
0,7	5,3	45	4,9	2,5	50,5
0,9	4,1	45	4,9	3	61,0
1,1	3,4	45	5,0	3,4	68,2
1,3	2,8	45	4,9	3,4	70,1
1,4	2,7	45	5,0	3,6	71,4
1,5	2,5	45	5,0	3,6	72,0

Seguindo tendência observada nos dispositivos anteriores de se obter uma melhor eficiência para as vazões de maiores valores, a unidade hidráulica de bombeamento foi trocada permitindo ensaios com vazões de até 80L/min. Na TABELA 10 são apresentados os resultados da eficiência para vazões 30L/min e 60L/min do segundo dispositivo de irradiação e na Figura 33 é mostrado o gráfico da eficiência em função da energia de aceleração do feixe de elétrons para estas vazões.

TABELA 10: Resultados dos experimentos para vazões 30L/min e 60L/min do segundo dispositivo de irradiação.

Energia (MeV)	Corrente (mA)	Vazão (L/min)	D. Calculada (kGy)	D. Medida (kGy)	Eficiência (%)
1,5	1,7	30	5,00	2,5	50,0
1,4	1,8	30	5,00	2,4	48,0
1,3	1,9	30	5,00	2,5	50,0
1,2	2,1	30	5,00	2,3	46,0
1,1	2,3	30	5,00	2,3	46,0
1,0	2,5	30	5,00	2,0	40,0
0,9	2,8	30	5,00	2,0	40,0
0,8	3,1	30	5,00	1,7	34,0
0,7	3,6	30	5,00	1,5	30,0
0,6	4,2	30	5,00	1,3	26,0
0,5	5,0	30	5,00	1,0	20,0
1,5	3,3	60	5,00	3,3	66,0
1,4	3,6	60	5,00	3,1	62,0
1,3	3,8	60	5,00	3,2	64,0
1,2	4,2	60	5,00	3,0	60,0
1,1	4,5	60	5,00	3,0	60,0
1,0	5,0	60	5,00	2,6	52,0
0,9	5,6	60	5,00	2,3	46,0
0,8	6,3	60	5,00	2,0	40,0
0,7	7,1	60	5,00	1,8	36,0
0,6	8,3	60	5,00	1,5	30,0
0,5	5,0	60	2,50	0,7	28,0

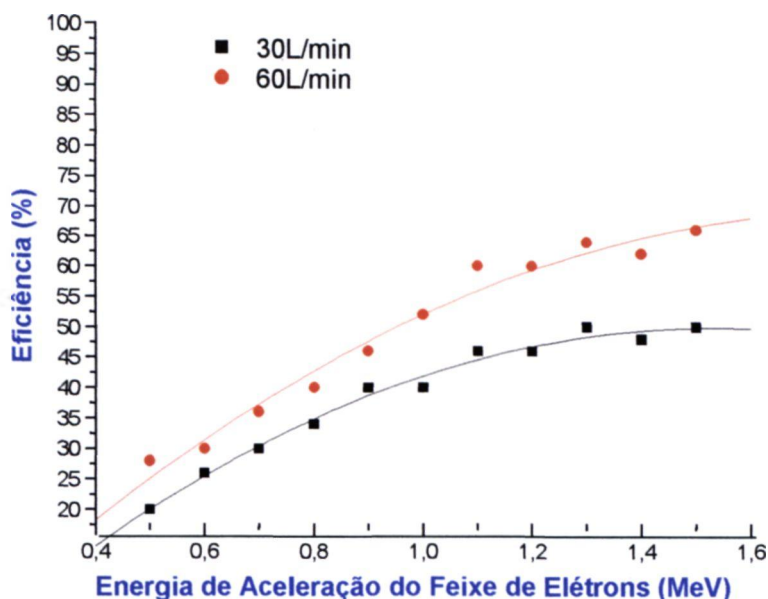


FIGURA 33: Eficiência do segundo dispositivo de irradiação em função da energia de aceleração do feixe de elétrons para vazões de 30L/min e 60L/min.

### 3.1.3- TESTES DE DESEMPENHO DO TERCEIRO DISPOSITIVO

No terceiro dispositivo de irradiação, que atingiu o maior estágio de desenvolvimento permitindo maior versatilidade na irradiação de diferentes efluentes especialmente os tóxicos, os testes de operação foram realizados em duas situações, a de circuito aberto, ou seja, configuração similar ao primeiro e ao segundo dispositivo, no qual o efluente é irradiado em contato com o meio ambiente e circuito fechado formando uma câmara que isola o efluente do meio exterior durante a irradiação.

#### circuito aberto:

Os primeiros experimentos com o terceiro dispositivo utilizando o espaçamento A das aletas de distribuição do fluxo apresentaram resultados aproximados aos do segundo dispositivo. Na Tabela 11 são apresentados os resultados dos primeiros testes do terceiro dispositivo de irradiação e na Figura 34

o gráfico da eficiência de irradiação em função da energia de aceleração do feixe de elétrons.

TABELA 11: Resultados dos ensaios do terceiro dispositivo de irradiação utilizando-se o espaçamento A das aletas de direcionamento do fluxo – *circuito aberto*

Energia (MeV)	Corrente (mA)	Vazão (L/min)	D. Calculada (kGy)	D. Medida (kGy)	Eficiência (%)
0,5	4,0	20	6	1,1	18
0,9	2,2	20	6	1,8	30
1,0	2,0	20	6	2,1	35
1,3	1,5	20	6	2,2	37
1,4	1,4	20	6	2,6	43
1,5	1,3	20	6	2,5	42
0,5	6,0	30	6	1,2	20
0,9	3,3	30	6	2,2	37
1,0	3,0	30	6	2,7	45
1,3	2,3	30	6	2,9	48
1,4	2,1	30	6	3,0	50
1,5	2,0	30	6	3,2	53
0,5	6,0	56	3	0,7	22
0,9	6,2	56	6	2,5	42
1,0	5,6	56	6	3,0	50
1,3	4,3	56	6	3,4	57
1,4	4,0	56	6	3,7	62
1,5	3,7	56	6	3,6	60

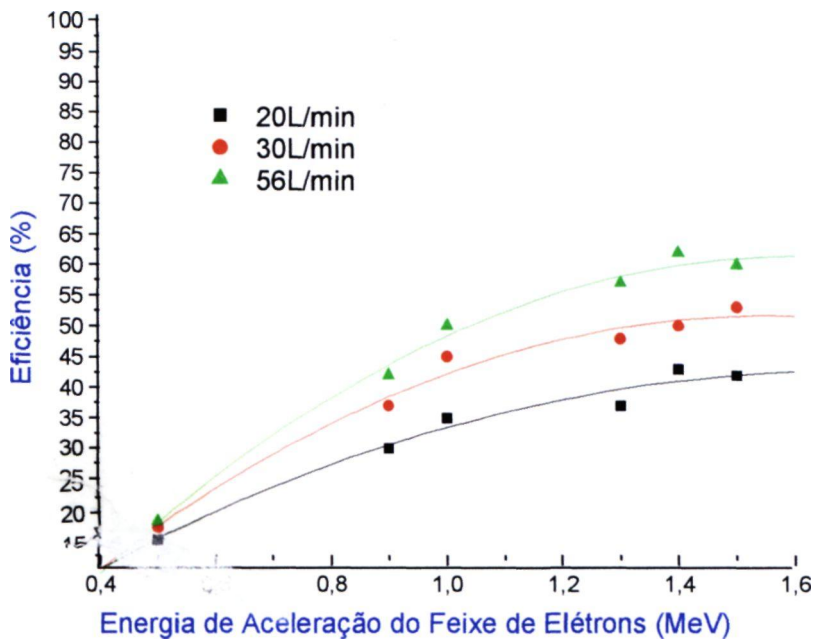


FIGURA 34: Testes com o terceiro dispositivo de irradiação com espaçamento A das aletas de direcionamento de fluxo com a na configuração *circuito aberto* (sem a janela de titânio)

Na Tabela 12 são apresentados os resultados dos experimentos realizados após alteração da geometria para o espaçamento B das aletas de direcionamento de fluxo e na Figura 35 mostra-se a alteração do comportamento das curvas de eficiência para a configuração *circuito aberto*.

TABELA 12: Resultados dos ensaios do terceiro dispositivo de irradiação com espaçamento B das aletas de direcionamento de fluxo – *circuito aberto*

Energia (MeV)	Corrente (mA)	Vazão (L/min)	D. Calculada (kGy)	D.Medida (kGy)	Eficiência (%)
0,5	4,0	20	6	1,5	25
0,9	2,2	20	6	2,2	37
1,0	2,0	20	6	2,4	40
1,3	1,5	20	6	2,5	42
1,4	1,4	20	6	2,6	43
1,5	1,3	20	6	2,7	45
0,5	6,0	30	6	1,7	28
0,9	3,3	30	6	3,1	52
1,0	3,0	30	6	3,2	53
1,3	2,3	30	6	3,3	55
1,4	2,1	30	6	3,3	55
1,5	2,0	30	6	3,7	62
0,5	6,0	56	3	1,3	39
0,9	6,2	56	6	3,5	58
1,0	5,6	56	6	4,0	66
1,3	4,3	56	6	4,3	72
1,4	4,0	56	6	4,3	72
1,5	3,7	56	6	4,6	76

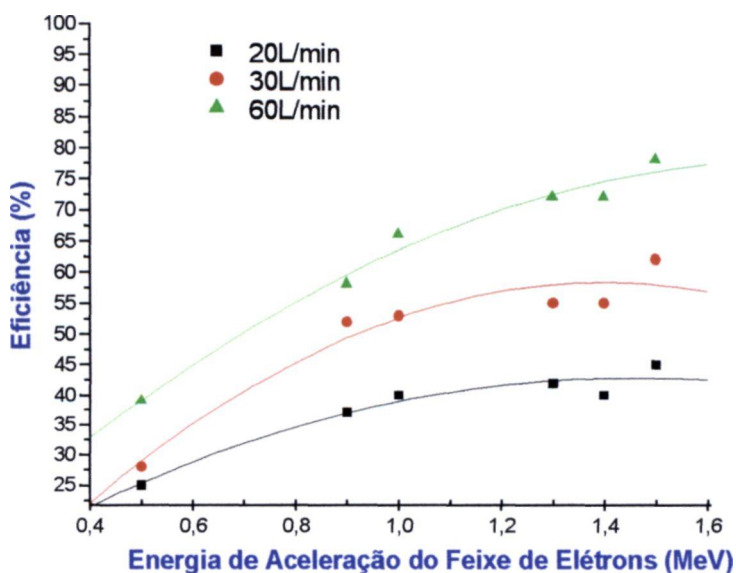


FIGURA 35: Testes com o terceiro dispositivo de irradiação com espaçamento B das aletas de direcionamento de fluxo com a configuração *circuito aberto* (sem a janela de titânio).

Na Tabela 13 são apresentados os melhores resultados obtidos com o terceiro dispositivo de irradiação após serem alterados os espaçamentos das aletas de direcionamento de fluxo e otimizadas as condições de operação e na Figura 36 mostram-se os gráficos da eficiência em função da energia de aceleração do feixe de elétrons.

TABELA 13: Resultados dos testes com condições operacionais otimizadas do terceiro dispositivo de irradiação- *circuito aberto*

Energia (MeV)	Corrente (mA)	Vazão (L/min)	D. Calculada (kGy)	D. Medida (kGy)	Eficiência (%)
0,5	3,3	20	5,0	1,9	38
0,9	1,9	20	5,1	2,6	51
1,0	1,7	20	5,1	2,9	57
1,3	1,3	20	5,1	3,2	63
1,4	1,2	20	5,0	3,3	65
1,5	1,1	20	5,0	3,4	67
0,5	5,0	30	5,0	2,0	40
0,9	2,8	30	5,0	2,8	55
1,0	2,5	30	5,0	3,3	66
1,3	1,9	30	4,9	3,3	68
1,4	1,8	30	5,0	3,6	72
1,5	1,7	30	5,1	3,6	70
0,6	9,0	56	5,3	2,3	44
0,9	5,5	56	5,3	3,3	63
1,0	4,7	56	5,0	3,6	72
1,3	3,9	56	5,4	4,2	77
1,4	3,6	56	5,4	4,2	78
1,5	2,5	56	4,0	3,2	80

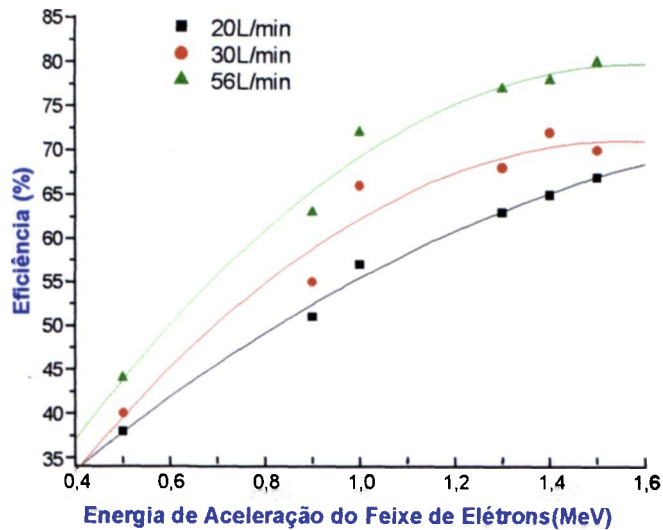


FIGURA 36: Testes com o terceiro dispositivo de irradiação otimizado com espaçamento C das aletas de direcionamento de fluxo com a configuração *circuito aberto* (sem a janela de titânio)

### **circuito fechado**

Os mesmos experimentos realizados para a configuração de *circuito aberto* foram realizados para a configuração de *circuito fechado*. Nas Tabelas 14, 15, 16 e nas Figuras 37, 38 e 39 são apresentados, respectivamente, os resultados da eficiência do terceiro dispositivo para os espaçamentos A, B e C das aletas de direcionamento de fluxo do efluente.

TABELA 14: Testes do terceiro dispositivo de irradiação utilizando-se o espaçamento A das aletas de direcionamento do fluxo - *circuito fechado*.

Energia (MeV)	Corrente (mA)	Vazão (L/min)	D. Calculada (kGy)	D. Medida (kGy)	Eficiência (%)
0,5	4,0	20	6	0,9	15
0,9	2,2	20	6	1,5	25
1,0	2,0	20	6	1,8	30
1,3	1,5	20	6	2,1	35
1,4	1,4	20	6	2,1	35
1,5	1,3	20	6	2,0	34
0,5	6,0	30	6	1,0	17
0,9	3,3	30	6	1,8	30
1,0	3,0	30	6	2,3	38
1,3	2,3	30	6	2,7	45
1,4	2,1	30	6	2,6	43
1,5	2,0	30	6	2,7	45
0,5	6,0	56	3	0,6	18
0,9	6,2	56	6	2,2	37
1,0	5,6	56	6	2,7	45
1,3	4,3	56	6	3,2	53
1,4	4,0	56	6	3,1	52
1,5	3,7	56	6	3,2	53

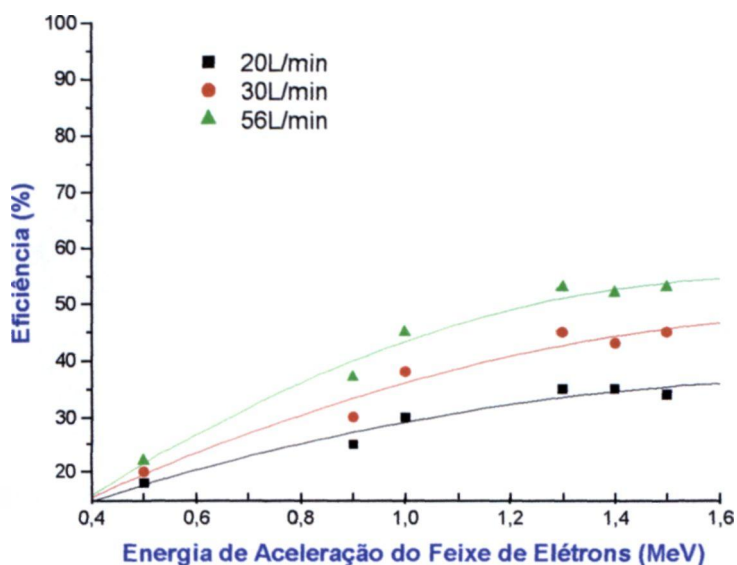


FIGURA 37: Testes com o terceiro dispositivo de irradiação com espaçamento A das aletas de direcionamento de fluxo com a configuração *circuito fechado* (com a janela de titânio)

TABELA 15: Resultados dos ensaios do terceiro dispositivo de irradiação com espaçamento B das aletas de direcionamento de fluxo – *circuito fechado*

Energia (MeV)	Corrente (mA)	Vazão (L/min)	D. Calculada (kGy)	D. Medida (kGy)	Eficiência (%)
0,5	4,0	20	6	1,0	17
0,9	2,2	20	6	2,1	35
1,0	2,0	20	6	2,3	38
1,3	1,5	20	6	2,4	40
1,4	1,4	20	6	2,5	42
1,5	1,3	20	6	2,4	41
0,5	6,0	30	6	1,1	18
0,9	3,3	30	6	2,5	42
1,0	3,0	30	6	2,8	47
1,3	2,3	30	6	3,1	52
1,4	2,1	30	6	3,1	52
1,5	2,0	30	6	3,3	55
0,5	6,0	56	3	0,6	18
0,9	6,2	56	6	2,8	47
1,0	5,6	56	6	3,3	55
1,3	4,3	56	6	3,6	60
1,4	4,0	56	6	3,7	62
1,5	3,7	56	6	4,0	67

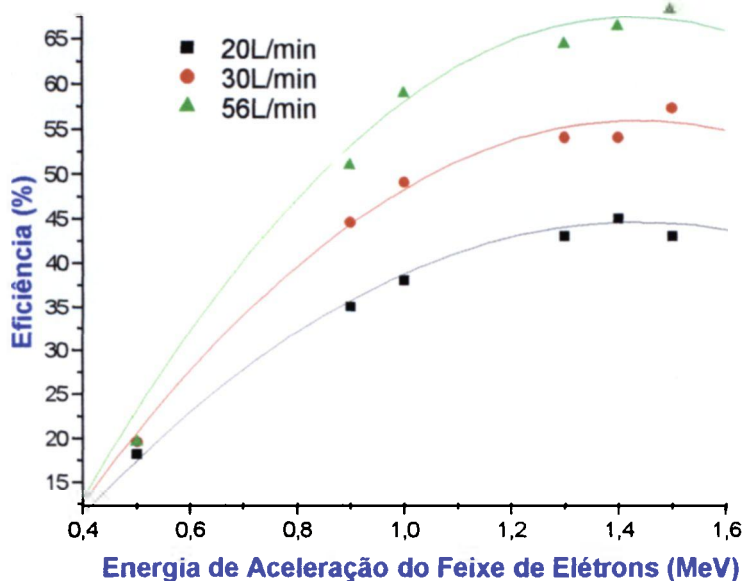


FIGURA 38: Testes com o terceiro dispositivo de irradiação com espaçamento B das aletas de direcionamento de fluxo com a configuração *circuito fechado* (com a janela de titânio)

TABELA 16: Resultados dos ensaios do terceiro dispositivo de irradiação com espaçamento C das aletas de direcionamento de fluxo - *circuito fechado*

Energia (MeV)	Corrente (mA)	Vazão (L/min)	D. Calculada (kGy)	D.Medida (kGy)	Eficiência (%)
0,5	3,3	20	5,0	1,6	32
0,9	1,9	20	5,1	2,4	48
1,0	1,7	20	5,0	2,8	56
1,3	1,3	19	5,3	3,2	60
1,4	1,2	19	5,3	3,2	60
1,5	1,1	20	5,0	3,2	63
0,5	5,0	30	5,0	1,8	36
0,9	2,8	30	5,0	2,6	52
1,0	2,5	30	5,0	2,9	58
1,3	1,9	29	5,1	3,4	68
1,4	1,8	29	5,2	3,6	69
1,5	1,7	28	5,5	3,7	67
0,5	9,0	56	4,8	2,2	38
0,9	5,5	55	5,4	3,2	60
1,0	5,0	55	5,4	3,6	67
1,3	3,9	55	5,5	4,0	72
1,4	3,6	55	5,5	4,0	74
1,5	2,5	54	4,2	3,2	76

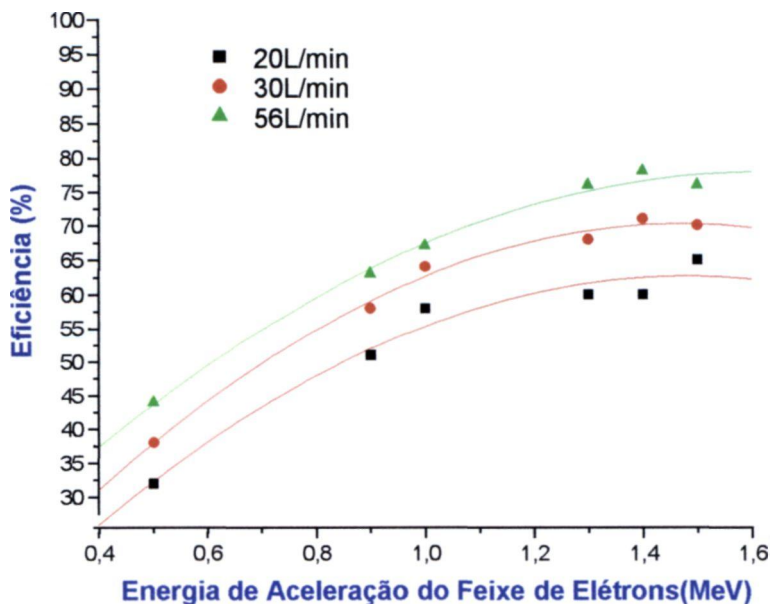


FIGURA 39: Testes com o terceiro dispositivo de irradiação otimizado com espaçamento C das aletas de direcionamento de fluxo com a configuração *circuito fechado* (com a janela de titânio)

## 3.2- VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DO DISPOSITIVO DE IRRADIAÇÃO E DO SISTEMA DOSIMÉTRICO

### 3.2.1- ESTABILIDADE

Nas Tabelas 17 e 18 são apresentados os resultados dos ensaios de estabilidade da eficiência do terceiro dispositivo de irradiação nas condições de otimizadas dos parâmetros operacionais e nas configurações circuito aberto e circuito fechado, respectivamente. Nos gráficos das Figuras 40 e 41 são mostrados o comportamento da eficiência do dispositivo de irradiação em função da dose absorvida pelo efluente irradiado para vazões situadas próximas aos valores de 30L/min e 60L/min.

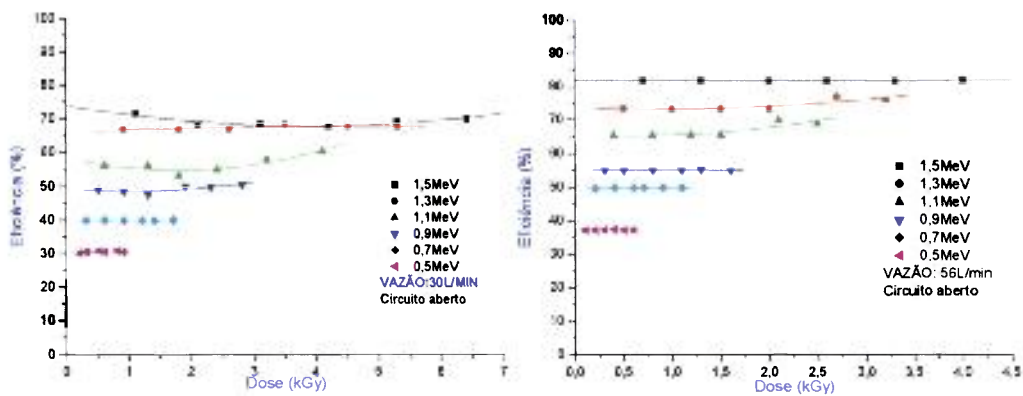


FIGURA 40: Ensaios de eficiência em função da variação da dose do terceiro dispositivo de irradiação com parâmetros de operação otimizados e configuração *circuito aberto*.

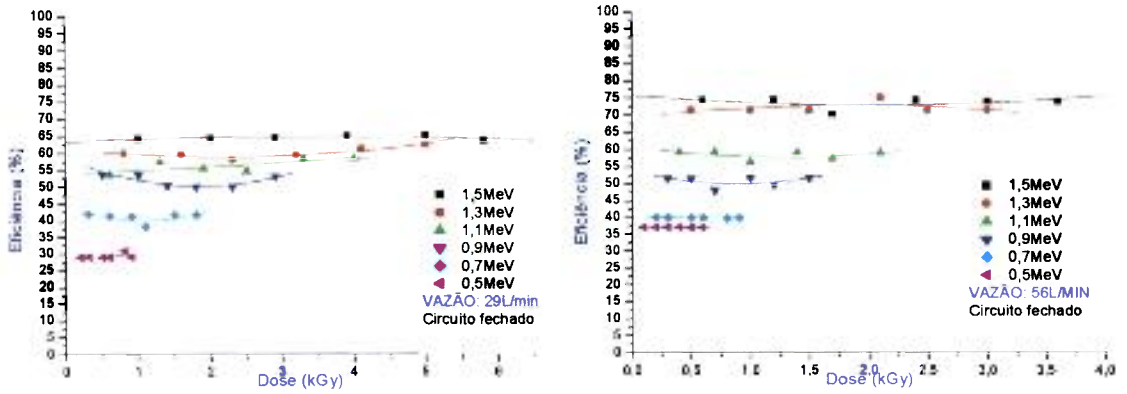


FIGURA 41: Ensaio de eficiência em função da variação da dose do terceiro dispositivo de irradiação com parâmetros de operação otimizados e configuração *circuito fechado*.

TABELA 17: Resultados dos ensaios de estabilidade da eficiência do terceiro dispositivo de irradiação nas condições de otimizadas dos parâmetros operacionais e na configuração *circuito aberto*.

Energ. (MeV)	Corrente (mA)	Vazão (L/min)	D.Cal. (kGy) <sup>(*)</sup>	D.Med. <sup>(**)</sup> (kGy)	Efic. <sup>(***)</sup> (%)	Energ. (MeV)	Corrente (mA)	Vazão (L/min)	D.Cal. (kGy)	D.Med. (kGy)	Efic. (%)
1,5	0,5	29,3	1,5	1,1	71,6	1,5	0,5	55,8	0,8	0,6	80,0
1,5	1,0	29,1	3,1	2,1	67,9	1,5	1,0	55,8	1,6	1,3	81,2
1,5	1,5	29,7	4,5	3,1	68,4	1,5	1,5	55,8	2,4	1,9	79,2
1,5	2,0	29,0	6,2	4,2	68,0	1,5	2,0	55,8	3,2	2,6	81,8
1,5	2,5	29,2	7,7	5,3	69,1	1,5	2,5	55,8	4,0	3,2	80,0
1,5	3,0	29,3	9,2	6,4	69,9	1,5	3,0	55,9	4,8	4,0	79,2
MÉDIA=69,1 Desv.Padr.= 1,4						MÉDIA=80,2 Desv.Padr.= 1,1					
1,3	0,5	29,0	1,3	0,9	66,9	1,3	0,5	55,8	0,7	0,5	73,3
1,3	1,0	29,0	2,7	1,8	66,9	1,3	1,0	55,7	1,4	1,0	73,1
1,3	1,5	30,1	3,9	2,6	66,8	1,3	1,5	55,8	2,1	1,5	73,3
1,3	2,0	30,1	5,2	3,5	68,3	1,3	2,0	55,9	2,8	2,0	73,4
1,3	2,5	29,4	6,6	4,5	67,6	1,3	2,5	55,7	3,5	2,7	76,8
1,3	3,0	29,8	7,9	5,3	67,6	1,3	3,0	55,6	4,2	3,2	76,0
MÉDIA=67,4 Desv.Padr.= 0,6						MÉDIA=74,3 Desv.Padr.= 1,6					
1,1	0,5	29,2	1,1	0,6	56,2	1,1	0,5	55,8	0,6	0,4	65,4
1,1	1,0	29,1	2,3	1,3	56,0	1,1	1,0	55,7	1,2	0,8	65,3
1,1	1,5	29,7	3,3	1,8	54,0	1,1	1,5	55,8	1,8	1,2	65,4
1,1	2,0	30,0	4,4	2,4	54,8	1,1	2,0	55,9	2,4	1,5	65,6
1,1	2,5	30,1	5,5	3,1	56,6	1,1	2,5	55,8	3,0	2,1	69,8
1,1	3,0	29,4	6,7	3,8	56,4	1,1	3,0	55,7	3,6	2,5	68,9
MÉDIA=55,7 Desv.Padr.= 1,0						MÉDIA=66,8 Desv.Padr.= 2,1					
0,9	0,5	29,4	0,9	0,5	49,0	0,9	0,5	55,8	0,5	0,3	55,0
0,9	1,0	29,1	1,9	0,9	48,5	0,9	1,0	55,7	1,0	0,5	54,9
0,9	1,5	28,9	2,8	1,3	47,5	0,9	1,5	55,8	1,5	0,8	55,0
0,9	2,0	29,0	3,7	1,9	50,0	0,9	2,0	55,8	1,9	1,1	55,0
0,9	2,5	29,2	4,6	2,3	49,7	0,9	2,5	55,9	2,4	1,3	55,1
0,9	3,0	29,2	5,5	2,8	50,5	0,9	3,0	55,8	2,9	1,6	55,0
MÉDIA=49,2 Desv.Padr.= 1,1						MÉDIA=55,0 Desv.Padr.= 0,1					
0,7	0,5	29,1	0,7	0,3	39,9	0,7	0,5	55,7	0,4	0,2	49,6
0,7	1,0	29,2	1,4	0,6	40,0	0,7	1,0	55,8	0,8	0,4	49,7
0,7	1,5	29,0	2,2	0,9	39,8	0,7	1,5	55,8	1,1	0,6	49,7
0,7	2,0	29,1	2,9	1,2	39,9	0,7	2,0	55,9	1,5	0,7	49,8
0,7	2,5	29,0	3,6	1,4	39,8	0,7	2,5	55,8	1,9	0,9	49,7
0,7	3,0	29,2	4,3	1,7	40,0	0,7	3,0	55,8	2,3	1,1	49,7
MÉDIA=39,9 Desv.Padr.= 0,1						MÉDIA=49,7 Desv.Padr.= 0,1					
0,5	0,5	28,6	0,5	0,2	30,1	0,5	0,5	55,8	0,3	0,1	37,2
0,5	1,0	29,0	1,0	0,3	30,5	0,5	1,0	55,7	0,5	0,2	37,1
0,5	1,5	29,2	1,5	0,5	30,8	0,5	1,5	55,8	0,8	0,3	37,2
0,5	2,0	29,0	2,1	0,6	30,5	0,5	2,0	55,9	1,1	0,4	37,3
0,5	2,5	29,2	2,6	0,8	30,8	0,5	2,5	55,8	1,3	0,5	37,2
0,5	3,0	29,0	3,1	0,9	30,5	0,5	3,0	55,8	1,6	0,6	37,2
MÉDIA=30,5 Desv.Padr.= 0,2						MÉDIA=37,2 Desv.Padr.= 0,0					

(\*) Dose Calculada; (\*\*) Dose Medida; (\*\*\*) Eficiência

TABELA 18: Resultados dos ensaios de estabilidade da eficiência do terceiro dispositivo de irradiação nas condições de otimizadas dos parâmetros operacionais e na configuração *circuito fechado*.

Energ. (MeV)	Corrente (mA)	Vazão (L/min)	D.Cal. (kGy) <sup>(*)</sup>	D.Med. <sup>(**)</sup> (kGy)	Efic. <sup>(***)</sup> (%)	Energ. (MeV)	Corrente (mA)	Vazão (L/min)	D.Cal. (kGy)	D.Med. (kGy)	Efic. (%)
1,5	0,5	29,0	1,6	1,0	64,4	1,5	0,5	55,8	0,8	0,6	74,4
1,5	1,0	29,0	3,1	2,0	64,4	1,5	1,0	55,8	1,6	1,2	74,4
1,5	1,5	30,1	4,5	2,9	64,7	1,5	1,5	55,8	2,4	1,7	70,3
1,5	2,0	30,1	6,0	3,9	65,2	1,5	2,0	55,9	3,2	2,4	74,5
1,5	2,5	29,4	7,7	5,0	65,3	1,5	2,5	55,6	4,0	3,0	74,1
1,5	3,0	29,8	9,1	5,8	64,0	1,5	3,0	55,6	4,9	3,6	74,1
MÉDIA=64,7 Desv.Padr.= 0,5						MÉDIA=73,6 Desv.Padr.= 1,7					
1,3	0,5	29,2	1,3	0,8	59,9	1,3	0,5	55,8	0,7	0,5	71,5
1,3	1,0	29,1	2,7	1,6	59,7	1,3	1,0	55,7	1,4	1,0	71,4
1,3	1,5	29,5	4,0	2,3	58,0	1,3	1,5	55,8	2,1	1,5	71,5
1,3	2,0	29,0	5,4	3,2	59,5	1,3	2,0	55,8	2,8	2,1	75,1
1,3	2,5	29,2	6,7	4,1	61,4	1,3	2,5	55,8	3,5	2,5	71,5
1,3	3,0	29,3	8,0	5,0	62,6	1,3	3,0	55,7	4,2	3,0	71,4
MÉDIA=60,2 Desv.Padr.= 1,6						MÉDIA=72,1 Desv.Padr.= 1,5					
1,1	0,5	29,4	1,1	0,6	53,5	1,1	0,5	55,8	0,6	0,4	59,2
1,1	1,0	29,2	2,3	1,3	57,5	1,1	1,0	55,8	1,2	0,7	59,2
1,1	1,5	28,9	3,4	1,9	55,5	1,1	1,5	55,8	1,8	1,0	56,4
1,1	2,0	29,0	4,6	2,5	54,9	1,1	2,0	55,9	2,4	1,4	59,3
1,1	2,5	29,2	5,7	3,3	58,4	1,1	2,5	55,7	3,0	1,7	57,4
1,1	3,0	29,0	6,8	4,0	58,6	1,1	3,0	55,6	3,6	2,1	59,0
MÉDIA=56,4 Desv.Padr.= 2,1						MÉDIA=58,4 Desv.Padr.= 1,2					
0,9	0,5	29,1	0,9	0,5	53,9	0,9	0,5	55,7	0,5	0,3	51,6
0,9	1,0	29,0	1,9	1,0	53,7	0,9	1,0	55,7	1,0	0,5	51,6
0,9	1,5	29,2	2,8	1,4	50,5	0,9	1,5	55,8	1,5	0,7	48,2
0,9	2,0	30,1	3,6	1,8	50,2	0,9	2,0	55,9	1,9	1,0	51,8
0,9	2,5	29,4	4,6	2,3	50,1	0,9	2,5	55,9	2,4	1,2	49,7
0,9	3,0	29,8	5,4	2,9	53,3	0,9	3,0	55,8	2,9	1,5	51,7
MÉDIA=51,9 Desv.Padr.= 1,9						MÉDIA=50,7 Desv.Padr.= 1,5					
0,7	0,5	29,4	0,7	0,3	42,0	0,7	0,5	55,8	0,4	0,2	39,9
0,7	1,0	29,0	1,4	0,6	41,4	0,7	1,0	55,9	0,8	0,3	39,9
0,7	1,5	28,9	2,2	0,9	41,3	0,7	1,5	55,8	1,1	0,5	39,9
0,7	2,0	29,2	2,9	1,1	38,2	0,7	2,0	55,9	1,5	0,6	39,9
0,7	2,5	29,2	3,6	1,5	41,7	0,7	2,5	55,7	1,9	0,8	39,8
0,7	3,0	29,2	4,3	1,8	41,7	0,7	3,0	55,8	2,3	0,9	39,9
MÉDIA=41,1 Desv.Padr.= 1,4						MÉDIA=39,9 Desv.Padr.= 0,1					
0,5	0,5	29,0	0,5	0,2	29,0	0,5	0,5	55,7	0,3	0,1	33,4
0,5	1,0	29,2	1,0	0,3	29,2	0,5	1,0	55,8	0,5	0,2	35,3
0,5	1,5	29,0	1,6	0,5	29,0	0,5	1,5	55,8	0,8	0,3	34,7
0,5	2,0	29,0	2,1	0,6	29,0	0,5	2,0	55,8	1,1	0,4	37,2
0,5	2,5	29,0	2,6	0,8	30,9	0,5	2,5	55,8	1,3	0,5	33,5
0,5	3,0	29,2	3,1	0,9	29,2	0,5	3,0	55,7	1,6	0,6	37,8
MÉDIA=29,4 Desv.Padr.= 0,8						MÉDIA=35,3 Desv.Padr.= 1,8					

(\*) Dose Calculada; (\*\*) Dose Medida; (\*\*\*) Eficiência

Nas Tabelas 19 e 20 apresentam-se os resultados dos ensaios de estabilidade da dose absorvida pelo efluente em função do tempo para o terceiro dispositivo de irradiação nas condições otimizadas dos parâmetros operacionais e nas configurações *circuito aberto* e *circuito fechado*, respectivamente. Os correspondentes gráficos dos valores das doses em função do tempo, medidos em intervalos de 20 segundos, são apresentados nas Figuras 42 e 43.

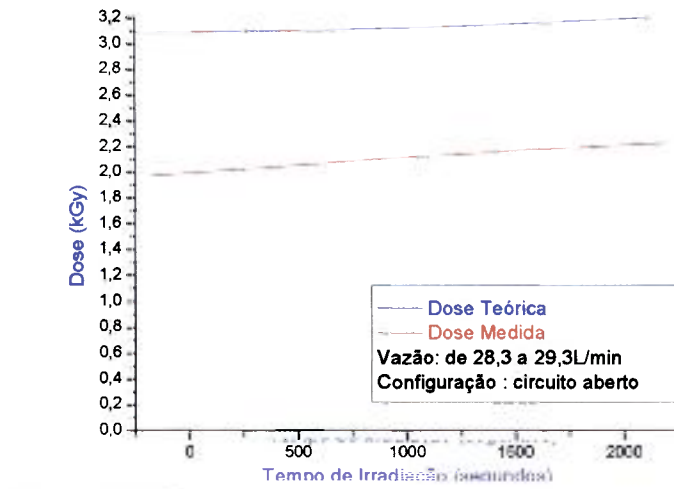


FIGURA 42: Valores das doses em função do tempo do terceiro dispositivo de irradiação nas condições otimizadas dos parâmetros operacionais e configuração *circuito aberto*.

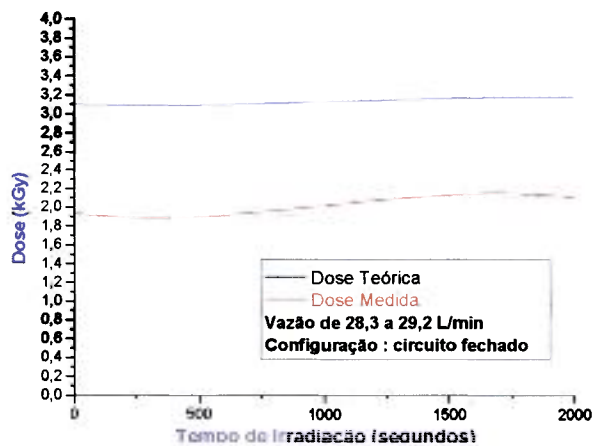


FIGURA 43: Valores das doses em função do tempo do terceiro dispositivo de irradiação nas condições otimizadas dos parâmetros operacionais e configuração *circuito fechado*.

TABELA 19: Resultados dos ensaios de estabilidade da dose absorvida pelo efluente em função do tempo, para o terceiro dispositivo de irradiação nas condições otimizadas dos parâmetros operacionais e configuração *circuito aberto*.

Tempo (segundo)	Vazão (L/min)	Dose Teor. (kGy)	Dose Med. (kGy)	Tempo (segundo)	Vazão (L/min)	Dose Teor. (kGy)	Dose Med. (kGy)
0	29,0	3,10	2,0	1000	28,9	3,11	2,1
20	29,0	3,10	2,1	1020	28,8	3,13	2,1
40	29,0	3,10	2,0	1040	28,8	3,13	2,1
60	29,0	3,10	2,0	1060	28,8	3,13	2,1
80	29,0	3,10	2,0	1080	28,7	3,14	2,1
100	28,9	3,11	2,0	1100	28,8	3,13	2,1
120	28,9	3,11	2,0	1120	28,7	3,14	2,2
140	28,9	3,11	2,0	1140	28,8	3,13	2,2
160	28,9	3,11	2,0	1160	28,8	3,13	2,2
180	28,9	3,11	2,0	1180	28,6	3,15	2,2
200	29,1	3,09	2,1	1200	28,8	3,13	2,2
220	29,2	3,08	2,0	1220	28,7	3,14	2,1
240	29,0	3,10	2,0	1240	28,7	3,14	2,1
260	29,0	3,10	2,0	1260	28,7	3,14	2,1
280	29,3	3,07	2,0	1280	28,7	3,14	2,1
300	29,0	3,10	2,0	1300	28,6	3,15	2,1
320	29,2	3,08	2,1	1320	28,6	3,15	2,2
340	29,0	3,10	2,1	1340	28,6	3,15	2,2
360	29,0	3,10	2,1	1360	28,5	3,16	2,2
380	29,0	3,10	2,1	1380	28,6	3,15	2,2
400	29,1	3,09	2,0	1400	28,5	3,16	2,2
420	29,1	3,09	2,0	1420	28,6	3,15	2,2
440	29,2	3,08	2,0	1440	28,6	3,15	2,1
460	29,2	3,08	2,0	1460	28,5	3,16	2,1
480	29,2	3,08	2,1	1480	28,5	3,16	2,1
500	29,1	3,09	2,1	1500	28,5	3,16	2,2
520	29,1	3,09	2,1	1520	28,4	3,17	2,2
540	29,1	3,09	2,1	1540	28,5	3,16	2,2
560	29,1	3,09	2,0	1560	28,4	3,17	2,2
580	29,2	3,08	2,0	1580	28,4	3,17	2,2
600	29,1	3,09	2,1	1600	28,4	3,17	2,2
620	29,1	3,09	2,1	1620	28,3	3,18	2,2
640	29,1	3,09	2,1	1640	28,4	3,17	2,2
660	29,0	3,10	2,1	1660	28,5	3,16	2,2
680	29,0	3,10	2,1	1680	28,4	3,17	2,2
700	29,0	3,10	2,1	1700	28,4	3,17	2,2
720	29,0	3,10	2,0	1720	28,3	3,18	2,1
740	29,0	3,10	2,0	1740	28,4	3,17	2,1
760	29,0	3,10	2,0	1760	28,4	3,17	2,2
780	29,0	3,10	2,0	1780	28,3	3,18	2,2
800	29,1	3,09	2,1	1800	28,3	3,18	2,2
820	29,1	3,09	2,1	1820	28,4	3,17	2,2
840	29,1	3,09	2,1	1840	28,4	3,17	2,2
860	29,0	3,10	2,1	1860	28,4	3,17	2,2
880	28,9	3,11	2,1	1880	28,5	3,16	2,2
900	28,9	3,11	2,1	1900	28,5	3,16	2,2
920	28,8	3,13	2,1	1920	28,4	3,17	2,2
940	28,9	3,11	2,1	1940	28,5	3,16	2,2
960	28,8	3,13	2,1	1960	28,4	3,17	2,2
980	28,9	3,11	2,1	1980	28,3	3,18	2,2

TABELA 20: Resultados dos ensaios de estabilidade da dose absorvida pelo efluente em função do tempo, para o terceiro dispositivo de irradiação nas condições otimizadas dos parâmetros operacionais e configuração *circuito fechado*.

Tempo (segundo)	Vazão (L/min)	Dose Teor. (kGy)	Dose Med. (kGy)	Tempo (segundo)	Vazão (L/min)	Dose Teor. (kGy)	Dose Med. (kGy)
0	29,2	3,08	1,9	1000	28,9	3,11	2,1
20	29,1	3,09	1,9	1020	28,8	3,13	2,1
40	29,0	3,10	1,9	1040	28,8	3,13	2,0
60	29,0	3,10	1,9	1060	28,8	3,13	2,0
80	29,0	3,10	1,8	1080	28,7	3,14	2,0
100	29,0	3,10	1,8	1100	28,7	3,14	2,0
120	29,0	3,10	1,8	1120	28,7	3,14	2,1
140	29,0	3,10	1,9	1140	28,8	3,13	2,1
160	29,0	3,10	1,9	1160	28,8	3,13	2,1
180	29,0	3,10	1,9	1180	28,6	3,15	2,0
200	29,2	3,08	1,8	1200	28,6	3,15	2,2
220	29,2	3,08	1,8	1220	28,6	3,15	2,2
240	29,2	3,08	1,8	1240	28,7	3,14	2,2
260	29,2	3,08	1,9	1260	28,7	3,14	2,1
280	29,2	3,08	1,9	1280	28,7	3,14	2,1
300	29,1	3,09	1,8	1300	28,6	3,15	2,1
320	29,1	3,09	1,8	1320	28,5	3,16	2,0
340	29,1	3,09	1,8	1340	28,6	3,15	2,1
360	29,1	3,09	1,8	1360	28,5	3,16	2,1
380	29,1	3,09	1,8	1380	28,6	3,15	2,1
400	29,1	3,09	1,9	1400	28,5	3,16	2,2
420	29,1	3,09	1,9	1420	28,6	3,15	2,2
440	29,1	3,09	1,9	1440	28,6	3,15	2,1
460	28,9	3,11	1,8	1460	28,5	3,16	2,1
480	28,9	3,11	1,9	1480	28,5	3,16	2,1
500	28,9	3,11	1,9	1500	28,5	3,16	2,1
520	29,1	3,09	1,9	1520	28,4	3,17	2,1
540	29,0	3,10	1,9	1540	28,5	3,16	2,1
560	29,0	3,10	1,9	1560	28,4	3,17	2,1
580	29,0	3,10	1,8	1580	28,4	3,17	2,1
600	29,0	3,10	1,9	1600	28,4	3,17	2,1
620	29,0	3,10	2,0	1620	28,3	3,18	2,1
640	29,0	3,10	1,9	1640	28,4	3,17	2,2
660	29,0	3,10	1,9	1660	28,5	3,16	2,2
680	29,0	3,10	1,9	1680	28,4	3,17	2,2
700	29,0	3,10	1,9	1700	28,4	3,17	2,1
720	29,0	3,10	1,9	1720	28,3	3,18	2,1
740	29,0	3,10	2,0	1740	28,4	3,17	2,1
760	29,0	3,10	2,0	1760	28,4	3,17	2,1
780	29,0	3,10	1,9	1780	28,3	3,18	2,1
800	28,9	3,11	1,9	1800	28,3	3,18	2,1
820	28,9	3,11	1,9	1820	28,3	3,18	2,1
840	28,9	3,11	1,9	1840	28,3	3,18	2,1
860	28,9	3,11	1,9	1860	28,4	3,17	2,1
880	28,9	3,11	1,9	1880	28,3	3,18	2,1
900	28,8	3,13	1,9	1900	28,5	3,16	2,2
920	28,8	3,13	2,0	1920	28,4	3,17	2,2
940	28,9	3,11	2,0	1940	28,5	3,16	2,1
960	28,8	3,13	2,0	1960	28,3	3,18	2,1
980	28,9	3,11	2,0	1980	28,3	3,18	2,1

### 3.2.2- TEMPO DE RESPOSTA DO SISTEMA DOSIMÉTRICO

Para a determinação do tempo de resposta do sistema dosimétrico, realizaram-se experimentos com várias condições de operação, alterando-se os parâmetros de irradiação e para cada situação esperou-se no mínimo cinco minutos para garantir a estabilidade e o regime de processamento. Abruptamente provocou-se um desligamento do acelerador de elétrons, colocando no potencial zero a aceleração do feixe de elétrons e imediatamente observou-se a alteração da dose absorvida pelo efluente.

Na Figura 44 apresentam-se os gráficos dos ensaios de verificação do sistema dosimétrico utilizando-se o terceiro dispositivo de irradiação com condições otimizadas de operação para energia de aceleração dos elétrons de 1,3MeV, corrente do feixe de elétrons de 4,0mA e vazão de 30L/min. Os ensaios foram realizados nas configurações circuito aberto e circuito fechado. As curvas foram construídas com a utilização de mais de 600 pontos obtidos por meio de registros coletados no computador do sistema dosimétrico e em intervalos de tempo de inferiores a seis décimos de segundo.

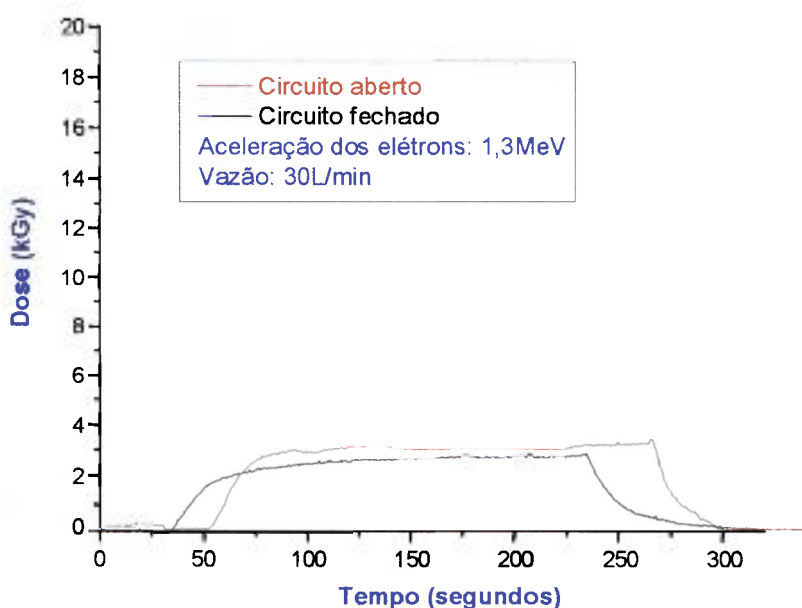


FIGURA 44: Ensaios do sistema dosimétrico para energia de 1,3MeV e corrente do feixe de elétrons de 4,0mA utilizando-se as configurações *circuito aberto* e *circuito fechado*.

### 3.2.3- VERIFICAÇÃO DO SISTEMA DOSIMÉTRICO

Durante a verificação do comportamento do sistema dosimétrico foram realizados experimentos com o composto químico corante “Duacouro” que permitiram estabelecer uma relação entre a redução da absorvância em função da dose absorvida em diferentes condições de irradiação no acelerador de elétrons, incluindo para efeito de comparação, a irradiação de amostras com fonte de Cobalto-60, irradiadas com diferentes taxas de dose, posicionando-se as amostras a 10cm e 20cm da fonte radioativa.

Os valores das reduções de absorvância do corante utilizado na concentração de 100ppm, são associados com a fração remanescente ou seu fator de degradação, que é definido no presente trabalho como sendo igual a uma unidade menos o valor da fração remanescente. Estes valores são apresentados na Tabela 21 e na Figura 45 ilustram-se, na forma de gráfico, as curvas do fator de degradação do corante em função da dose absorvida.

TABELA 21: Valores do fator de degradação do corante “Duacouro” para diferentes condições de irradiação.

DOSE (kGy)	Vazão 30 L/min Circuito Fechado	Vazão 60 L/min Circuito Fechado	Vazão 30 L/min Circuito Aberto	Vazão 60 L/min Circuito Aberto	Cobalto-60	
					10 cm	20 cm
<b>FATOR DE DEGRADAÇÃO</b>						
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
2,0	0,885	0,887	0,930	0,726	0,605	0,661
4,0	0,781	0,770	0,925	0,617	0,486	0,552
6,0	0,679	0,658	0,864	0,568	0,424	0,461
8,0	0,618	0,632	0,823	0,522	0,405	0,411
10,0	0,578	0,610	0,763	0,498	0,348	0,379
12,0	0,567	0,554	0,729	0,485	0,326	0,351
15,0	0,492	0,550	0,693	0,401	0,297	0,330
18,0	0,474	0,491	0,666	0,391	0,297	0,297

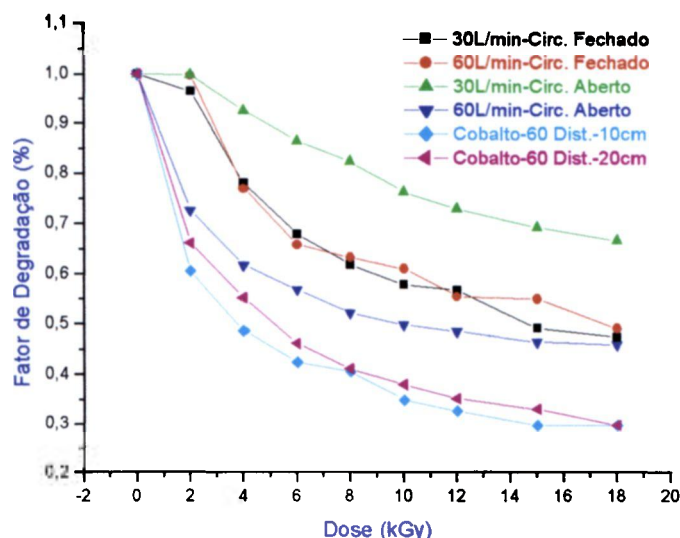


FIGURA 45: Fator de degradação do corante “Duacouro” em função da dose absorvida pelo efluente para diferentes condições de irradiação.

Nas Tabelas 22 e 23 são apresentados os resultados dos ensaios de degradação do corante “Duacouro” para diferentes energias de aceleração do feixe de elétrons utilizando-se o terceiro dispositivo de irradiação em condições otimizadas de operação nas configurações de *circuito aberto* e *fechado*, respectivamente. Com o propósito de comparar o comportamento das curvas de degradação em função da energia dos elétrons, foram incorporadas a estas tabelas os resultados apresentados anteriormente nas Tabelas 13 e 16 pertinentes aos ensaios de eficiência em função da energia de aceleração.

Nas Figuras 46 e 47 são apresentados os correspondentes gráficos do fator de degradação do corante em função da dose absorvida com a sobreposição da eficiência do dispositivo de irradiação também em função da dose absorvida.

TABELA 22: Ensaio de degradação do corante “Duacouro” e eficiência do terceiro dispositivo de irradiação em função da energia de aceleração do feixe de elétrons para diferentes vazões e na configuração *circuito aberto*.

ENERGIA (MeV)	Eficiência (%)	Fator de degradação (%)	Eficiência (%)	Fator de degradação (%)	Eficiência (%)	Fator de degradação (%)
	Vazão 20L/min		Vazão 30L/min		Vazão 56L/min	
0,5 <sup>(*)</sup>	38	38,1	40	38,9	44	40,9
0,9	51	41,1	55	43,6	63	46,2
1,0	57	43,1	66	45,3	72	48,0
1,3	63	45,4	68	47,3	77	49,1
1,4	65	46,1	70	48,9	78	50,7
1,5	67	46,7	72	49,4	80	51,2

(\*) Para vazão de 56L/min a energia de aceleração é de 0,6MeV

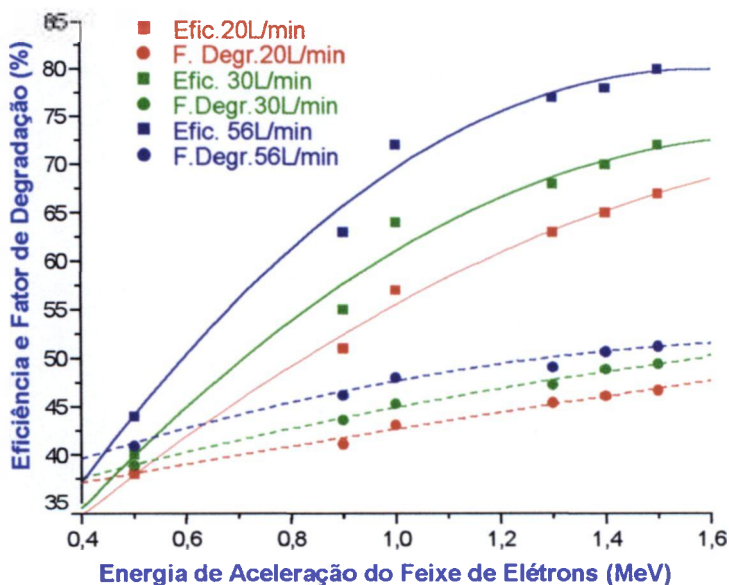


FIGURA 46: Fator de degradação do corante “Duacouro” e eficiência do dispositivo de irradiação em função da energia de aceleração do feixe de elétrons para a configuração de *circuito aberto*.

TABELA 23: Ensaios de degradação do corante “Duacouro” e eficiência do terceiro dispositivo de irradiação em função da energia de aceleração do feixe de elétrons para diferentes vazões e na configuração *circuito fechado*.

ENERGIA (MeV)	Eficiência (%)	Fator de degradação (%)	Eficiência (%)	Fator de degradação (%)	Eficiência (%)	Fator de degradação (%)
	Vazão 20L/min		Vazão 30L/min		Vazão 56L/min	
0,5 <sup>(*)</sup>	32	34,2	36	35,2	38	36,3
0,9	48	40,3	52	41,5	60	44,3
1,0	56	41,3	58	43,9	67	46,4
1,3	60	43,2	66	46,1	72	47,2
1,4	60	44,6	69	46,9	74	49,1
1,5	63	45,2	67	47,2	76	50,2

(\*) Para vazão de 56L/min a energia de aceleração é de 0,6MeV

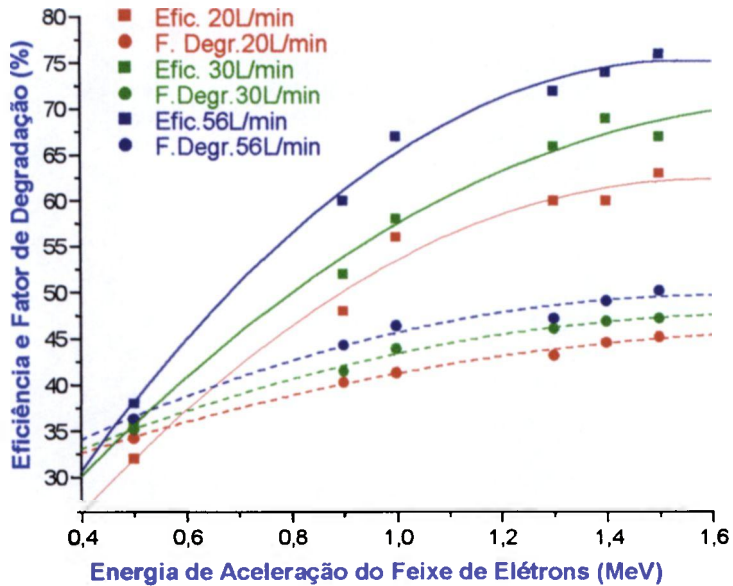


FIGURA 47: Fator de degradação do corante “Duacouro” e eficiência do dispositivo de irradiação em função da energia de aceleração do feixe de elétrons para a configuração de *circuito fechado*.

### 3.3- CUSTO UNITÁRIO DE PROCESSAMENTO

Tomando-se por base os valores máximos de eficiência dos ensaios realizados para o terceiro dispositivo de irradiação e utilizando os custos operacionais da Tabela 7 para aceleradores com energia de 0,5MeV; 1,0MeV e 1,5MeV calcularam-se os valores dos custos unitários de processamento que são apresentados nas Tabelas 24 e 25 para as configurações circuito aberto e circuito fechado, respectivamente.

Nestas tabelas, na coluna vazão o valor máximo é de 24.000L/hora estimado no item 2.4.3 do presente trabalho, os demais valores de vazão foram calculados utilizando-se a equação (19.2). Nas colunas Custo/hora, para valores de vazão inferiores ao da capacidade máxima do dispositivo de irradiação, foi descontado o custo da energia elétrica uma vez que os aceleradores de elétrons não trabalham com a capacidade máxima.

Nas Figuras 48 e 49 são apresentados, respectivamente na forma de gráfico, o comportamento do custo unitário de processamento em dólares americanos por metro cúbico processado em função da dose absorvida pelo efluente para as configurações *circuito aberto* e *circuito fechado*.

TABELA 24: Custo unitário de processamento do terceiro dispositivo de irradiação para diferentes energias de aceleração de elétrons e configuração *circuito aberto*

Dose (kGy)	Custo/hora (US\$)	Vazão (L/min)	Eficiência (%)	Energia (MeV)	Potência (kW)	Custo unitário (US\$/m <sup>3</sup> )
<b>Acelerador de elétrons com energia de 1,5MeV e potência de 97,5kW</b>						
1,0	67,0	24.000	80	1,5	7,3	2,8
2,0	68,4	24.000	80	1,5	14,6	2,9
5,0	71,3	24.000	80	1,5	36,5	3,0
10,0	76,0	24.000	80	1,5	72,9	3,2
11,7	79,2	24.000	80	1,5	97,5	3,3
15,0	79,2	18.720	80	1,5	97,5	4,2
20,0	79,2	14.040	80	1,5	97,5	5,6
<b>Acelerador de elétrons com energia de 1,0MeV e potência de 65kW</b>						
1,0	60,3	24.000	72	1,0	8,1	2,5
2,0	61,3	24.000	72	1,0	16,2	2,6
5,0	64,5	24.000	72	1,0	40,5	2,7
7,0	67,7	24.000	72	1,0	65,0	2,8
10,0	67,7	16.848	72	1,0	65,0	4,0
15,0	67,7	11.232	72	1,0	65,0	6,0
20,0	67,7	8.424	72	1,0	65,0	8,0
<b>Acelerador de elétrons com energia de 0,5MeV e potência de 32,5kW</b>						
1,0	58,7	24.000	44	0,5	13,3	2,4
2,0	60,4	24.000	44	0,5	26,5	2,5
2,1	61,2	24.000	44	0,5	32,5	2,6
5,0	61,2	10.296	44	0,5	32,5	5,9
10,0	61,2	5.148	44	0,5	32,5	11,9
15,0	61,2	3.432	44	0,5	32,5	17,8
20,0	61,2	2.574	44	0,5	32,5	23,8

TABELA 25: Custo unitário de processamento do terceiro dispositivo de irradiação para diferentes energias de aceleração de elétrons e configuração *circuito fechado*

Dose (kGy)	Custo/hora (US\$)	Vazão (L/min)	Eficiência (%)	Energia (MeV)	Potência (kW)	Custo unitário (US\$/m <sup>3</sup> )
<b>Acelerador de elétrons com energia de 1,5MeV e potência de 97,5kW</b>						
1,0	67,5	24.000	76	1,5	60,4	2,8
2,0	68,5	24.000	76	1,5	17,5	2,9
5,0	71,5	24.000	76	1,5	43,9	3,0
10,0	76,5	24.000	76	1,5	87,7	3,2
11,1	79,2	24.000	76	1,5	97,5	3,3
15,0	79,2	17.784	76	1,5	97,5	4,5
20,0	79,2	13.338	76	1,5	97,5	5,9
<b>Acelerador de elétrons com energia de 1,0MeV e potência de 65kW</b>						
1,0	60,4	24.000	67	1,0	10,0	2,5
2,0	61,5	24.000	67	1,0	19,9	2,6
5,0	64,9	24.000	67	1,0	49,8	2,7
6,5	67,7	24.000	67	1,0	65	2,8
10,0	67,7	15.678	67	1,0	65	4,3
15,0	67,7	10.452	67	1,0	65	6,5
20,0	67,7	7.839	67	1,0	65	8,6
<b>Acelerador de elétrons com energia de 0,5MeV e potência de 32,5kW</b>						
1,0	59,0	24.000	38	0,5	17,5	2,5
2,0	60,9	24.000	38	0,5	35,1	2,5
1,9	61,2	24.000	38	0,5	32,5	2,6
5,0	61,2	8.892	38	0,5	32,5	6,9
10,0	61,2	4.446	38	0,5	32,5	13,8
15,0	61,2	2.964	38	0,5	32,5	20,6
20,0	61,2	2.223	38	0,5	32,5	27,5

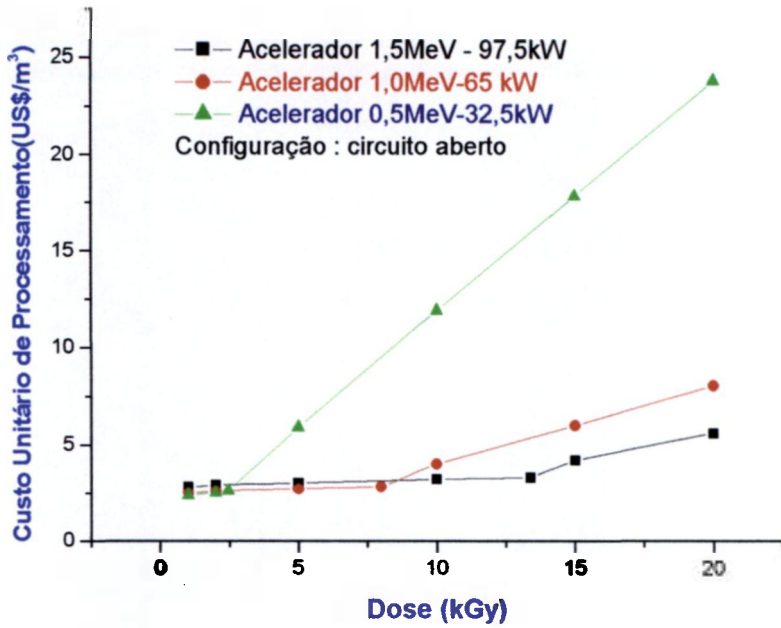


FIGURA 48: Custo unitário de processamento em dólares americanos por metro cúbico processado em função da dose absorvida pelo efluente para a configuração *circuito aberto*.

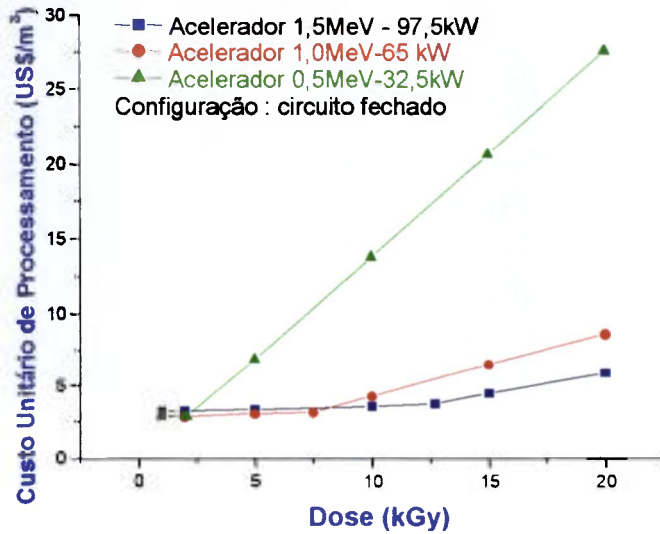


FIGURA 49: Custo unitário de processamento em dólares americanos por metro cúbico processado em função da dose absorvida pelo efluente para a configuração *circuito fechado*.

## 4- ANÁLISE DOS DADOS

### 4.1 - DESEMPENHO DOS DISPOSITIVOS DE IRRADIAÇÃO

#### 4.1.1- DESEMPENHO DO PRIMEIRO DISPOSITIVO DE IRRADIAÇÃO

Observando-se os valores da Tabela 8 e Figura 31, o primeiro dispositivo de irradiação apresentou rendimento máximo de 33% para uma vazão de 45L/min (2,7m<sup>3</sup>/hora) e energia de aceleração do feixe de elétrons de 1,5MeV. A razão deste baixo rendimento da interação do feixe de elétrons com o efluente processado, acentuado para baixas vazões, foi a de que a espessura da lâmina de água junto a parede da caixa do dispositivo, ou melhor junto ao vertedor, possui um valor muito próximo da penetração do feixe de elétrons.

Este comportamento encontra justificativa no gráfico que compara o poder de penetração do feixe de elétrons para diferentes energias de aceleração com a altura da lâmina de água para diferentes vazões do vertedor de parede delgada, apresentado na Figura 20.

Neste gráfico observa-se que para valores de vazão abaixo de 40L/min, o poder de penetração dos elétrons é inferior ao da espessura da lâmina de água permitindo que parte do volume do efluente que escoar pelo dispositivo esteja fora da região de interação do feixe de elétrons, causando a redução do rendimento do dispositivo.

#### 4.1.2 – DESEMPENHO DO SEGUNDO DISPOSITIVO DE IRRADIAÇÃO

Com base no baixo resultado obtido com o primeiro dispositivo e verificado que o perfil do escoamento junto ao vertedor ser um dos principais motivos deste desempenho, corrigiu-se o perfil, utilizando o recurso de soldar uma aba na parede do dispositivo passando o vertedor para a geometria de parede espessa, forçando uma redução da altura da lâmina de água do vertedor e conseqüentemente aumentando a região de interação com o feixe de elétrons no dispositivo de irradiação.

Para o segundo dispositivo de irradiação, após a substituição do sistema dosimétrico e a manutenção do sistema de bombeamento original, observou-se que o rendimento máximo obtido foi de 72% conforme resultados apresentados na Tabela 9.

Após a substituição do sistema de bombeamento por outro de maior capacidade, o melhor resultado do rendimento obtido, apresentado na Tabela 10, foi de 66%. Esse valor é considerado como o valor consolidado para o segundo dispositivo de irradiação, uma vez que o novo sistema de bombeamento mostrou ser mais estável do que o original, no aspecto de flutuação da vazão durante a realização dos experimentos.

A melhora do desempenho do segundo dispositivo ocorreu em consequência do melhor dimensionamento hidráulico do dispositivo de irradiação, obtido por meio dos resultados apresentados na Figura 21, mostrando a espessura da lâmina de água no vertedor de parede espessa em função da vazão do efluente e sobreposto aos valores do poder de penetração do elétron em função da energia de aceleração.

### 4.1.3 – DESEMPENHO DO TERCEIRO DISPOSITIVO DE IRRADIAÇÃO

Em consequência do sensível aumento de rendimento do segundo dispositivo de irradiação e considerando que esta melhoria deveu-se a utilização da geometria do vertedor de parede espessa, o terceiro dispositivo de irradiação foi concebido para poder operar como uma câmara procurando combinar duas seções de vertedor para cada lado do dispositivo no seu sentido longitudinal e estas seções foram obtidas com a introdução de aletas direcionadoras de fluxo.

No projeto construtivo foi incorporada uma tampa constituída de uma membrana fina de titânio, que isola do meio exterior, a região onde ocorre a interação do feixe de elétrons com o efluente. A utilização desta tampa é facultativa permitindo que o dispositivo trabalhe com eficiência em circuito aberto, permitindo que as reações ocorram em comunicação com o meio ambiente, ou na configuração de circuito fechado isolando-as do meio ambiente.

Várias aberturas das aletas do terceiro dispositivo foram testadas para a configuração de circuito aberto e configuração de circuito fechado e as que obtiveram o melhor rendimento, por ordem crescente, são apresentadas como espaçamentos A, B e C conforme resultados mostrados nas Tabelas 11, 12, 13, 14, 15 e 16.

Os melhores resultados de desempenho apresentados nas Tabelas 13 e 14, respectivamente, para as configurações *circuito aberto* e *circuito fechado* são:

#### CONFIGURAÇÃO CIRCUITO ABERTO:

- Energia de Aceleração : 1,5MeV
- Vazão do Efluente: 56L/min
- **Eficiência: 80%**

### CONFIGURAÇÃO CIRCUITO FECHADO (com janela de titânio)

- Energia de Aceleração : 1,5MeV
- Vazão do Efluente: 56L/min
- **Eficiência: 76%**

Para as tabelas anteriormente mencionadas foram elaborados, a partir de interpolação de equação de segunda ordem, os respectivos gráficos apresentados nas Figuras 34 a 39. Observa-se que em todos existe uma tendência de inflexão das curvas para energias na faixa de 1,4MeV a 1,5MeV, indicando que um aumento da energia de aceleração dos elétrons, nas vazões estudadas, não traria o benefício do aumento do rendimento para este tipo de dispositivo de irradiação.

As diferenças entre os rendimentos do terceiro dispositivo para as configurações circuito aberto e circuito fechado, deve-se a atenuação de energia provocada pela janela de titânio.

## 4.2 VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DO DISPOSITIVO DE IRRADIAÇÃO

As Figuras 40 e 41 foram elaboradas a partir das Tabelas 17 e 18, que correspondem aos ensaios de estabilidade da eficiência do terceiro dispositivo de irradiação operando continuamente por intervalos de tempo superior a 10 minutos, mantendo-se constante ao longo do tempo, os parâmetros de irradiação: vazão, energia de aceleração e corrente do feixe de elétrons e temperatura ambiente. O parâmetro que variou neste experimento foi a corrente do feixe de elétrons que significa uma variação da taxa de dose entregue pelo acelerador ao dispositivo de irradiação.

Observando-se nestas tabelas os valores de energia dos elétrons, os valores da eficiência, a dose absorvida pelo produto e os desvios padrões calculados, verifica-se que a eficiência do dispositivo de irradiação é estável para

diferentes taxas de doses, para a configuração circuito aberto e para a configuração de circuito fechado.

Nos ensaios de estabilidade da dose em função do tempo de operação do terceiro dispositivo de irradiação, verifica-se, por meio dos resultados apresentados nas Tabelas 19 e 20 que no gráfico da Figura 42 correspondente a configuração de circuito aberto a linha da dose medida segue paralela a linha da dose teórica. A pequena inclinação para cima destas linhas deve-se a diminuição da vazão ocasionada pela redução do volume do tanque que armazena o efluente ensaiado, que por consequência diminui a altura manométrica na entrada da bomba de recalque para o dispositivo de irradiação, diminuindo a sua vazão.

No ensaio de estabilidade da dose em função do tempo, para a configuração circuito fechado, observa-se pela Figura 43, além do efeito do paralelismo apresentado para a configuração aberta, uma maior inclinação para cima, com uma tendência de inflexão da linha correspondente a dose medida.

Este comportamento pode ser justificado em razão da interação do feixe de elétrons ocorrer em ambiente fechado, aquecendo o ar do interior do dispositivo e dificultando a troca de calor com o meio externo, que por sua vez, depende da inércia térmica de todo o ambiente onde se processa a irradiação. O tempo utilizado para realização deste experimento não foi suficiente para a confirmação da estabilização do sistema porém mostra uma tendência de se atingir um patamar constante levando a uma estabilização do valor da dose.

### **4.3 TEMPO DE RESPOSTA DO SISTEMA DOSIMÉTRICO**

Na avaliação do tempo de resposta do sistema dosimétrico em função da alteração de parâmetros operacionais, optou-se pela interrupção da fonte de energia do acelerador de elétrons por provocar instantaneamente a interrupção dose de radiação fornecida ao efluente.

Analisando-se as curvas apresentadas na Figura 44, elaboradas com os dados registrados pelo computador em intervalos de tempo inferiores a seis décimos de segundo, observa-se na curva correspondente ao ensaio realizado para o terceiro dispositivo de irradiação operando na configuração circuito aberto, que quando a alta tensão é interrompida, o tempo de decaimento da dose para a linha base (valor próximo a zero kGy) é da ordem de 20 segundos.

Este valor considera o intervalo de tempo desde a entrada do efluente no dispositivo de irradiação quando sensibiliza o transdutor de temperatura, a passagem pelas chicanas homogeneizadoras de vazão, a interação com o feixe de elétrons, a passagem pelo vertedor, a mistura com fluido a montante e finalmente a sensibilização do transdutor de temperatura na saída do dispositivo de irradiação.

A determinação da magnitude deste tempo de resposta é importante para a definição do intervalo de tempo necessário para o sistema atingir a estabilidade quando ocorre a alteração de um de seus parâmetros operacionais.

Na Figura 44 observa-se que para a curva elaborada para a configuração circuito fechado, que o tempo de resposta é da ordem de 30 segundos. Esta diferença com relação ao tempo para o circuito aberto, também é ocasionada pela troca de calor com os gases aprisionados no interior do dispositivo de irradiação, aumentando o tempo requerido para a estabilização da temperatura do dispositivo de irradiação.

#### **4.4- VERIFICAÇÃO DO SISTEMA DOSIMÉTRICO**

Na literatura não se encontraram trabalhos sobre sistemas dosimétricos utilizando princípio diferente do utilizado no presente trabalho (calorimetria). Com o propósito de verificar o comportamento do sistema dosimétrico desenvolvido, estudou-se a degradação do composto químico corante “Duacouro” em função de doses estabelecidas para diferentes condições de irradiação.

Os resultados apresentados na Tabela 21 mostram que a fração remanescente do corante irradiado é menor para processo de irradiação com Cobalto-60 do que quando irradiado no dispositivo de irradiação no acelerador de elétrons. Esta diferença é esperada uma vez que a irradiação com raios gama foi estática e a com acelerador de elétrons foi dinâmica.

Os valores da fração remanescente do corante para diferentes condições de irradiação com acelerador de elétrons, apresentaram variações coerentes com as eficiências associadas para cada uma das condições de irradiação. Por exemplo, para a configuração circuito aberto com vazão de 56L/min a eficiência do processo foi sempre superior a da vazão de 30L/min para as mesmas condições de irradiação.

Nas Tabelas 22 e 23 e nas Figuras 46 e 47 são mostrados o comportamento da eficiência dos dispositivos de irradiação e do fator de degradação em função energia de aceleração do feixe de elétrons para as configurações circuito aberto e circuito fechado, respectivamente. Este comportamento permite verificar que as curvas de eficiência seguem a mesma tendência das curvas de degradação do corante químico conferindo coerência aos resultados apresentados no sistema dosimétrico.

Do ponto de vista operacional, a substituição dos sensores tipo termistores, utilizados no primeiro sistema dosimétrico desenvolvido, por transdutores tipo circuito integrado (AD590J), bem como todo o circuito eletrônico desenvolvido no segundo sistema dosimétrico, respondeu de maneira muito rápida a qualquer variação nos parâmetros de irradiação, como o fluxo do efluente e a corrente do acelerador de elétrons. O segundo sistema atuando como um circuito linearizado na conversão temperatura em corrente, evitou o processamento matemático de ajustes, bem como o tempo de processamento.

O custo do circuito integrado, cerca de 10 vezes maior do que o de um termistor, compensou plenamente pela simplicidade do circuito eletrônico do conjunto, a sua linearidade dentro dos limites de irradiação utilizado no desenvolvimento do trabalho, mostrando superioridade em relação aos

termistores que necessitavam, após a realização de cada experimento, uma nova curva de calibração para poderem ser reutilizados.

Cabe mencionar que o baixo rendimento verificado no primeiro dispositivo de irradiação foi motivado pela utilização do vertedor de parede delgada e a contribuição da instabilidade do primeiro sistema dosimétrico com componente tipo termistores atuando como sensores de temperatura.

#### **4.5- CUSTO UNITÁRIO DE PROCESSAMENTO**

A viabilidade da utilização da tecnologia de processamento de efluentes com feixe de elétrons depende, na maior parte, do custo unitário do tratamento, que por sua vez depende da eficiência do processo e dos equipamentos e instalações necessárias para a sua utilização.

Os dados obtidos das otimizações dos dispositivos de irradiação desenvolvidos são utilizados com o objetivo de determinar a melhor relação custo-benefício, permitindo a seleção do acelerador de elétrons mais apropriado e a avaliação do impacto do custo capital com maior incidência no custo final unitário do efluente a ser tratado.

Para a faixa de energia de 0,5MeV a 1,5MeV, estudada no presente trabalho, o acelerador de elétrons mais adequado é do tipo ICT (Internal Core Transformer). Dos tradicionais fabricantes existentes no mercado mundial, optou-se, de modo bastante conservador, pela estimativa de custo dos aceleradores de fabricação da Nissin High Voltage – Japão, por ser um dos mais tradicionais fabricantes de aceleradores, produzindo equipamentos robustos e confiáveis além de serem as máquinas de maior preço no mercado.

Para os estudos de custo unitário foram assumidas as condições otimizadas para o terceiro dispositivo de irradiação, que alcançou o melhor rendimento na configuração de circuito aberto e considerou-se também a

configuração de circuito fechado por permitir, em situações especiais, o tratamento de produtos tóxicos.

Na Tabela 24 e na Figura 48 são mostrados os custos unitários para aceleradores de elétrons com energias e potências de 1,5MeV (97,5kW); 1,0MeV (65kW) e 0,5MeV (32,5kW). A limitação da vazão do dispositivo em 24.000L/min faz com que a aplicação dos aceleradores de elétrons de maior energia trabalhem abaixo da sua potência nominal elevando os custos unitários para doses baixas.

O acelerador de elétrons de 1,5MeV tem o seu ponto de equilíbrio, ou seja, o seu custo otimizado, quando pode operar a partir da sua potência máxima de 97,5kW e com a vazão limite de 24.000L/min, permitindo uma dose de 11,7kGy ao efluente processado. Acima deste valor de dose os custos são otimizados ou seja a capacidade total da máquina está sendo utilizada. O mesmo acontece para as demais energias sendo que para o acelerador de 1,0MeV a dose de equilíbrio é de 7kGy e para o de 0,5MeV é de 2,1kGy. Na Tabela 25 e na Figura 49 são apresentados os custos e os respectivos pontos de equilíbrio para a configuração circuito fechado.

As Tabelas 24 e 25 permitem orientar a seleção do acelerador de elétrons mais vantajoso economicamente de acordo com a sua aplicação, ou melhor, de acordo com a dose requerida para o tratamento dos efluentes. Para efluentes que requerem doses baixas, da ordem de 2kGy, como em processos de desinfecção de agentes patogênicos ou degradação de compostos orgânicos presentes em água potável, os aceleradores de 0,5MeV e 1,0MeV apresentam-se como a melhor alternativa.

Para o tratamento de efluentes com presença de contaminantes orgânicos recalcitrantes e de concentração elevada requerendo doses superiores a 5kGy, o acelerador de elétrons com energia de 1,5MeV é o que apresenta o melhor desempenho.

Para uma unidade móvel que permita levar a unidade de irradiação até o local onde foi gerado o efluente contaminado, evitando desta forma todos os

inconvenientes envolvidos nas operações de transporte (custos, riscos, licenciamento e embalagem adequada), a característica do conjunto composto pelo acelerador de elétrons e dispositivo de irradiação, deve ser o mais universal possível para permitir o uso de uma extensa gama de doses de radiação e de vazão do efluente mas, por outro lado, este conjunto deve apresentar as características de ser compacto e leve.

O peso de uma unidade de irradiação que utiliza acelerador de elétrons, está diretamente associado com as dimensões de sua blindagem que por vez é dependente da energia de aceleração dos elétrons e da sua potência. Quanto maior a energia e a potência do acelerador, maior será a espessura da blindagem e por conseqüência o seu peso, para tornar a operação segura no aspecto de radioproteção.

Para este tipo especial de aplicação, os resultados de desempenho do terceiro dispositivo de irradiação na faixa de energia de 0,7MeV apresentados nas Tabelas 13 e 16 e os custos unitários do processo apresentados nas Tabelas 24 e 25, permitem inferir que, um acelerador com energia no intervalo entre 0,5MeV a 1,0MeV, é uma alternativa que apresenta viabilidade técnica e vantagem econômica.

Na comparação dos custos unitários obtidos com o dispositivo desenvolvido neste trabalho com técnicas alternativas, ou mesmo utilizando-se a mesma técnica, porém com dispositivos desenvolvidos por outros pesquisadores, cabe considerar que estas tecnologias podem ser projetadas para serem utilizadas para diferentes vazões ou serem incorporadas em diferentes fases do tratamento convencional do efluente, para diferentes níveis de limpeza ou degradação dos contaminantes presentes no efluente, que depende do seu uso final ou das condições requeridas na disposição no meio receptor.

O fato é que diferentes tecnologias tem uma aplicação onde o seu desempenho econômico é único, tornando difícil uma comparação entre elas. Na Tabela 26 são mostrados os resultados obtidos neste trabalho e também as técnicas alternativas com suas respectivas características de aplicação.

TABELA 26: Técnicas alternativas e características operacionais<sup>(40)</sup> em comparação com a desenvolvida no IPEN

<b>TÉCNICA</b>	<b>Custo Unitário (U\$/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Características de Aplicação</b>
SCWO-Supercritical Water Oxidation	17,4	Faixa de concentração admissível para contaminantes: de 0,1ppm a 100.000ppm; capacidade de processamento: 100ton/dia; custo da instalação: US\$20,2milhões.
Genesyst-GPV SWCO	7,6	Faixa de concentração admissível para contaminantes: de 10.000ppm a 400.000ppm; capacidade de processamento: 5.000ton/dia; custo da instalação: US\$ 46,6 milhões.
ULTROX-UV/O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -Oxidação	0,06	Faixa de concentração admissível para contaminantes: de 0,01ppm a 150ppm; capacidade de processamento: 5.000ton/dia; custo da instalação: US\$500mil.
UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -Oxidação	0,14	Faixa de concentração admissível para contaminantes: máxima de 1ppb a 10 ppm; capacidade de processamento: 816ton/dia; custo da instalação: US\$500mil.
UV/O <sub>3</sub> -Oxidação	0,17	Faixa de concentração admissível para contaminantes: máxima de 900ppm; capacidade de processamento: 240ton/dia; custo da instalação: US\$52,5mil.
Acelerador de Elétrons-IPEN	2,7	Faixa de concentração admissível para contaminantes: máxima de 5.000ppm <sup>(40)</sup> ; capacidade de processamento: 576ton/dia; custo da instalação US\$1,6 milhões

Com o mesmo propósito da tabela anterior, na Tabela 27 são apresentados os resultados obtidos por outros pesquisadores que também desenvolveram sistemas de irradiação para tratamento de efluentes com feixe de elétrons.

TABELA 27- Resultados de desempenho e custo unitário dos sistemas de irradiação desenvolvidos

DISPOSITIVO DE IRRADIAÇÃO	EFICIÊNCIA (%)	CUSTO UNITÁRIO US\$/m <sup>3</sup>	CARACTERÍSTICAS DE APLICAÇÃO
J.G.Trump – Boston's Deer Island Water Treatment Plant-USA <sup>(43)</sup>	35 a 45 <sup>(**)</sup>	0,8 <sup>(*)</sup>	Desinfecção de lodo; dose: 4kGy; vazão: 600ton/dia
T. Waite – Miami-Dade Water and Sewer Authority's Virginia Key West Treatment Plant- USA <sup>(42)</sup>	65,3	0,66	Desinfecção de lodo; dose: 4,8kGy; vazão: 871m <sup>3</sup> /dia
P. Geringher – Austrian Research Centre Seibersdorf <sup>(51)</sup>	60 <sup>(**)</sup>	0,075	Degrad. Compostos Orgânicos Concentração: 120ppb ; dose: 45Gy; Vazão: 28.000m <sup>3</sup> /dia
HVEA- High Voltage Environmental ApplicationUSA <sup>(47)</sup> - unidade móvel	Não divulgado	2,07	Degrad. Compostos Orgânicos Concentração: 840ppm; dose: não divulgada vazão: 109m <sup>3</sup> /dia
A. K. Pikaev - Institute Of Physical Chemistry of Russian Academy of Sciency <sup>(49)</sup>	90 <sup>(**)</sup>	2,24	Degrad. Compostos Orgânicos Concentração : 50ppm; dose : 1,3kGy; vazão: 500m <sup>3</sup> /dia
IPEN	80	2,7	Degrad. Compostos Orgânicos Concentração: 5.000ppm dose : 5kGy; vazão: 576m <sup>3</sup> /dia

(\*) US\$/ton ; (\*\*) valores estimados

Na Tabela 27 o custo unitário de processamento tem como o seu maior valor o determinado no presente trabalho, cabendo as seguintes considerações:

- As instalações de Trump e T. Waite estão fora de operação há mais de 10 anos;
- O valor apresentado por Geringher é teórico e para uma dose de 45Gy e se a dose for aumentada para 5kGy o valor do custo unitário será superior a US\$7,5/m<sup>3</sup>;
- O custos totais da instalação utilizados por Pikaev e pela empresa HVEA foram inferiores a US\$800,000.00. Se este valor fosse adotado para os cálculos o custo unitário de processamento para 5kGy seria de US\$ 1,6/m<sup>3</sup>, tornando competitivo o dispositivo desenvolvido.

## 5.0- CONCLUSÕES

O dispositivo de irradiação desenvolvido na configuração “up flow stream” apresenta desempenho superior aos dispositivos desenvolvidos e avaliados experimentalmente por outros profissionais que militam nesta área.

Os resultados de rendimento diferenciado para as faixas de energia estudadas demonstram que o dispositivo de irradiação tem uma dependência da energia do acelerador de elétrons, cabendo uma otimização dos parâmetros operacionais para sua utilização.

O dispositivo permite, com a configuração circuito fechado, utilizando a janela de titânio, o tratamento de soluções perigosas sem a emissão de poluentes para o meio ambiente, possibilitando deste modo o tratamento de produtos tóxicos e recalcitrantes.

O dispositivo trabalhando na configuração circuito fechado também permite a associação com outras substâncias ( $O_3$ ) que podem ocasionar uma melhoria da eficiência do processo de degradação de compostos orgânicos.

O dispositivo permite o controle do processo em tempo real, possibilitando o acompanhamento da eficiência do processo, garantindo deste modo que o efluente seja tratado de acordo com os parâmetros requeridos, aumentando a confiabilidade do processamento.

Os custos operacionais, obtidos de forma bastante conservadora, utilizando-se o dispositivo de irradiação desenvolvido neste trabalho, confirmam o resultado de outros profissionais de que o tratamento de efluentes por acelerador de elétrons é uma alternativa viável para ser utilizada pela Engenharia Sanitária.

## 5.1- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudar a degradação de diferentes corantes ou compostos que possam ser utilizados como sistema de aferição do sistema dosimétrico (princípio calorimétrico) utilizado para controle “on line” do processo.

Estudo de novas configurações de aletas para melhorar o desempenho do dispositivo de irradiação, principalmente para vazões maiores do que as estudadas no presente trabalho.

Estudar a combinação da utilização de feixe de elétrons com gases oxidantes, desenvolvendo um sistema de injeção de gases para permitir a homogeneização da mistura antes de se apresentar para o feixe de elétrons.

Com base nos resultados de rendimento obtidos para diferentes condições de operação e energia de aceleração dos elétrons, elaborar um estudo de viabilidade econômica para construção de uma unidade móvel que permita tratar o efluente no local onde foi gerado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 SAMPA, M.H.O.; BORRELY, S.I.; SILVA, B.L.; VIEIRA, J.M.; RELA, P.R.; CALVO W.A.; NIETO, R.C.; DUARTE, C.L.; PEREZ, H.E.B.; SOMESSARI, E.S.; LUGÃO, A.B. The use of electron beam accelerator for the treatment of drinking water and wastewater in Brazil. *Radiat.Phys.Chem.*, v.46, no. 4-6, p.1143-1146, 1995.
- 2 SILVA, B.L.R.; SAMPA, M.H.O.; AVOLIO, R.M.; SOMESSARI, E.S.R.; VIEIRA, J. M.; RELA, P.R. Estudo da degradação de tricloroetileno e tetracloroetileno utilizando feixe de elétrons de alta energia gerado em acelerador industrial. In: III ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES-ENAN, Aguas de Lindóia, São Paulo. *Anais.....* Águas de Lindóia, 1995. p.257-261.
- 3 SAMPA, M.H.O.; VIEIRA, J.M.; CALVO, W.A.P.; RELA, P.R.; BORRELY, S.I. Design and construction of a pilot plant to treat wastewater and industrial effluents by electron beam accelerator. In: IAEA REGIONAL SEMINAR ON ENVIRONMENTAL APPLICATIONS OF ISOTOPES AND RADIATION TO LATIN AMERICA AND CARIBE. August 1993, Santiago, Chile. *Proceedings...* Vienna:IAEA, 1993.
- 4 SAMPA, M.H.O.; RELA, P.R.L; DUARTE, C.L.; BORRELY, S.I.; OIKAWA, H. Tratamento de Efluentes de Origem Industrial, Doméstica e Lodos Utilizando a Radiação Ionizante. In: I WORKSHOP SOBRE ÁREAS CONTAMINADAS, São October, 1997, Paulo, Brasil, *Resumos...* São Paulo.
- 5 COOPER, W.J.; TOBIEN T. The Application of Electron Beam Process in water and wastewater treatment: Fundamental and applied studies. In: USE OF IRRADIATION FOR CHEMICAL AND MICROBIAL DECONTAMINATION OF WATER, WASTEWATER AND SLUDGE, June, 1995, Vienna. *Proceedings...* Vienna: IAEA, 1995. (IAEA-TECDOC-1225).
- 6 GETOFF, N. Radiation-Induced Degradation of Water Pollutants-State of the Art. *Radiat.Phys.Chem.* v.4, p.581-593, 1996.
- 7 WOODS, R.J.; PIKAEV A.K. *Applied Radiation Chemistry: Radiation Processing.* John Wiley & Sons, Inc. Eds. 1994.
- 8 NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. *Radiation Protection Design Guidelines for 0.1-100MeV Particle Accelerator Facilities.* March 1977. (NCRP No. 51).
- 9 MORRISON, R.M. *An Economic Analysis of Electron Accelerators and Cobalt-60 for Irradiating Food.* United States Department of Agriculture, June 1989. (Technical Bulletin 1762).

- 10 INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. **Stopping Power for Electrons and Positrons**. ICRU, Bethesda, USA, October 1984. (ICRU Report 37).
- 11 BARNARD J. E-Beam Processing in the Medical Device Industry. **Med. Dev. Tech.**, v.2(5), p 34-41, 1991.
- 12 BRAILE, P.M.; CAVALCANTI, J.E.W.A. **Manual de Tratamento de Águas Residuárias Industriais**. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental São Paulo – Brasil 1979.
- 13 KIDMAN, R.B.; TSUJI, K.S. **Primary Costs Comparison Of Advanced Oxidation Process**. LA (USA): Los Alamos National Laboratory, 1991. (LA-12221-MS).
- 14 LESSEL T. AND SEUSS A. Ten year experience in operation of a sewage sludge treatment plant using gamma radiation. **Radiation Physics and Chemistry**, v.24, p.3-16, 1984.
- 15 LESSEL, T. Desinfection of Sewage Sludges by Gamma Irradiation and Alternative Methods. In: IAEA TECHNICAL AND ECONOMIC COMPARISON OF IRRADIATION AND CONVENTIONAL METHODS, 1988 Vienna –Austria. **Proceedings...** Vienna: IAEA, 1988. (IAEA –TECDOC-454).
- 16 COOPER, W.J.; MEACHAM, D.E.; NICKELSEN, M.G.; LIN, K.; FORD, D.B.; KURUCZ, C.N.; WAITE, T.D. The removal of tri-(TCE) and tetrachloroethylene (PCE) from aqueous solution using high energy electrons. **J. Air Waste Manage. Assoc.**, v 43, p.1358-1366, 1993.
- 17 COOPER, W.J.; NICKELSEN, M.G.; LIN, K.; SUTNICK, M.; MAK, F.T.; KURUCZ, C.N.; WAITE, T.D. E-Beam treatment of aqueous based toxic organic wastes. In: RADIATION CURING CONFERENCE EXPOSITION, 1992, Boston, USA, **Proceedings...** Boston, USA, 1992. p. 5-9.
- 18 GEHRINGER, P.; ESCHWEILER, H.; SZINOVATZ, W.; FIEDLER, R.; STEINER, R.; SONNECK, G. Radiation-induced OH radical generation and use for groundwater remediation. **Radiat. Phys. Chem.**, v.42, p.711-714, 1993.
- 19 GETOFF, N. Purification of drinking water by irradiation. A review. **Proc. Indian Academic Science**, v. 105(6), p.373-391, 1993.
- 20 MATTHEWS, S.M., BOEGEL, A.J., LOFTIS, J.A. Radiolytic decomposition of environment contaminants and site remediation using electron beam accelerator. **Remediation**, v.3(4), p. 459-481, 1993.
- 21 PODZOROVA, E., A. New developments in radiation-chemical technology of sewage treatment. **Radiat. Phys. Chem.**, v.46, p.1129-1132, 1995.

- 22 SWINWOOD, J. F., WAITE, T. D., KRUGER, P., RAO, S. M. **Radiation technologies for waste treatment: A global perspective.** *IAEA Bulletin*, v.1, 1994.
- 23 SAMPA, M.H.O.; DUARTE, C.L.; RELA, P.R., SOMESSARI, E.S.R.; SILVEIRA, C.G.; AZEVEDO, A.L. Remotion of organic compounds of actual industrial effluents by electron beam irradiation. In: 10<sup>TH</sup> INTERNATIONAL MEETING ON RADIATION PROCESSING-IMRP, 1997, Anaheim, CA, USA. **Resumos...** Anaheim, USA.
- 24 DUARTE, C.L.; SAMPA, M.H.O.; RELA, P.R.; SOMESSARI, E.S.R.; SILVEIRA, C.G.; AZEVEDO, A.L. Treatment of real industrial effluent using electron accelerator. In: 10<sup>TH</sup> INTERNATIONAL MEETING ON RADIATION PROCESSING-IMRP, 1997, Anaheim, CA, USA. **Resumos...** Anaheim, USA.
- 25 DUARTE, C.L.; SAMPA, M.H.O.; RELA, P.R.; SILVEIRA, C.G. Improvement on Conventional Parameters of actual Industrial Effluent by Electron Beam Irradiation. In: IAEA INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RADIATION TECHNOLOGY FOR CONSERVATION OF THE ENVIRONMENT, September, 8-12, 1997, Zakopane, Poland, **Proceedings...** Vienna: IAEA, 1998. (IAEA TEC DOC 1023)
- 26 DUARTE, C.L.; SAMPA, M.H.O.; RELA, P.R.; SOMESSARI, E.S.R.; SILVEIRA, C.G. Degradação de Compostos Orgânicos Presentes em efluentes Industriais pela Irradiação com Feixe de Elétrons. In: MEETING ON NUCLEAR APPLICATIONS, 4<sup>TH</sup>, ENAN, 18-22 August 1997, Poços de Caldas, MG, Brasil, **Proceedings...** Poços de Caldas: ENAN, 1997. 1 CD-ROM.
- 27 PIKAEV A.K., PODZOROVA E.A., BAKHTIN O.M. Combined Electron-beam and Ozone Treatment of Wastewater in the Aerosol Flow; **Radiat. Phys. Chem.**, v.49, p.155-157, 1997.
- 28 AL-SHEIKHLY M., SILVERMAN J., NETA P., KARAN L. Mechanisms of Ionizing Radiation-Induced Destruction of 2,6-Diclorobiphenyl in Aqueous Solutions, **Environmental Science Technology**, v.31, p. 2473-2477; 1997.
- 29 WAITE T.D. Overview of Electron Beam Irradiation. In: SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIROMENTAL APPLICATIONS OF ADVANCED OXIDATION TECHNOLOGIES, February, 1996, USA. **Proceedings...** USA, 1996.
- 30 BRYAN, E.H. Research on Application of Electron Beam Radiation in Environment Engineering Practice. In: WORKSHOP ON POTENTIAL FOR ENGINEERING –SCALE PROCESSING OF WASTE TREATMENT OF STREAMS BY ELECTRON BEAM IRRADIATION, 1997, University of Miami, Coral Gables, FL, USA, **Proceedings...** FL, USA, 1997. p. 10-15.

- 31 TRUMP, J.G.; WRIGHT, K.A.; SINNSKEY, A.J.; SHAH, D.N.; R.A. FERNALD, R.A. Disinfection of Municipal Sludge and Waste Water by Energized Electrons. In: INTERNATIONAL CETESB SEMINAR ON DESINFECTION OF MUNICIPAL SLUDGE MANAGEMENT, 1979, São Paulo, Brasil, **Proceedings...** São Paulo, 1979. p. 1-38. (INIS-mf-6718).
- 32 AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Radiation Energy Treatment of Water Wastewater and Sludge – A State-of-the-Art**. Committee on Radiation Energy treatment Air and Radiation Management Committee – Environmental Division, 1992.
- 33 KURUCKZ, C.N.; COOPER, W.J.; WAITE, T.D. The Miami Electron Beam Facility: A Large Scale Wastewater Treatment Application. **Radiation Physics and Chemistry**, v.45-2, p. 299-308, 1995.
- 34 WAITE, T.D.; KURUCKZ, C.N.; COOPER, W.J. Full scale electron beam systems for treatment of water, wastewater and medical waste. In: IAEA INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RADIATION TECHNOLOGY FOR CONSERVATION OF THE ENVIRONMENT, September, 8-12, 1997, Zakopane, Poland, **Proceedings...** Vienna: IAEA, 1998. p. 187-201. (IAEA TEC DOC 1023)
- 35 NICKELSEN, M.G.; KAJDI, D.C.; COOPER, W.J.; WAITE, T.D.; KURUCKZ, C.N.; GENSEL, F.; LORENZL, H.; SPARKA, U. Field Application of a Mobile 20kW Electron Beam Treatment System on Contaminated Groundwater and Industrial Wastes. In: COOPER, W. **Environmental Applications of Ionizing Radiation**. New York, USA, John Wiley & Sons, Inc., 1998. p. 451-466
- 36 ALVAREZ, F. **High Voltage Environmental Applications, Inc. Electron Beam Technology - Innovative Technology Evaluation**. EPA Environmental Protection Agency-USA, 1997. (EPA/540/R-96/504).
- 37 SCHUETZ, M. N.; VROOM, D. A. **The Use of High-Power Low-Energy Electron Beams for Environmental Remediation-Environmental Applications of Ionizing Radiation**. New York, USA.: John Wiley & Sons, Inc. 1998. P. 63-82.
- 38 PIKAEV, A. K. PODZOROVA, E. A. ; BAKHTIN, O.M.; LYSENKO, S. L.; BELYSHE, V. A. Electron Beam Technology for Purification of Municipal Wastewater in the Aerosol Flow. In: USE OF IRRADIATION FOR CHEMICAL AND MICROBIAL DECONTAMINATION OF WATER, WASTEWATER AND SLUDGE. 2001, Vienna, **Proceedings...** Vienna: IAEA, 200. (IAEA-TECDOC-1225).
- 39 GEHRINGER, P.; ESCHWEILER, H.; FIEDLER, H. **Ozone-electron Beam Treatment for Groundwater Remediation**. Seisbersdorf, Austria: Forschungszentrum, 1994. (OEFZS-4723).

- 40 GEHRINGER, P.; ESCHWEILER, H.; FIEDLER, H. **Advanced Oxidation Process Based on Ozone/Electron Beam Irradiation for Treating Groundwater**. Seisbersdorf, Austria: Forschungszentrum, 1994. (OEFZS-4719)
- 41 MCLAUGHLIN, W.L.; BOYD, A.W.; CHADWICK, K.H.; MCDONALD, J.C.; MILLER, A. **Dosimetry for Radiation Processing**. London, Taylor & Francis; 1989.
- 42 DUARTE, C.L. **Aplicação do Processo Avançado de Oxidação por feixe de Elétrons na Degradação de Compostos Orgânicos Presentes em Efluentes Industriais**. 1999. Tese (Doutorado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- 43 KNOLL, G.F. **Radiation Detection and Measurement**. New York, USA.: John Wiley and Sons, 1989.
- 44 INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. **Stopping Power for Electrons and Positrons**. USA: Betheseda, October 1984. (ICRU Report 3).
- 45 NETTO, J.M.A. ALVAREZ, G.A. **Manual de Hidráulica**. São Paulo, Brasil.: Edgard Blucher Ltda, 1973.
- 46 LENCASTRE, A. **Handbook of Hydraulic Engineering**. New York, USA.: John Wiley & Sons, 1987.
- 47 PHILLIPS, G.O.; DEEBLE, D.J. **Applied Radiation Chemistry Research**. In: ADVANCED RADIATION CHEMISTRY RESEARCH: CURRENT STATUS. Vienna, Austria. p. 43-76, October 1995. (IAEA – TECDOC-834).
- 48 AMERICAN SOCIETY FOR METALS. METALS HANDBOOK. **Stainless Steels, Tool Material and Special Purpose Metals**, Metals Park, Ohio, v.3, 9<sup>th</sup> Edition. 1980.
- 49 COSTA, F.E.; RELA, P.R. Sistema para Dosimetria de Feixe de elétrons na Irradiação de Efluentes em Modo Contínuo. In: MEETING ON NUCLEAR APPLICATIONS, 4<sup>th</sup>, ENAN, 18-22 August 1997, Poços de Caldas, MG, Brasil, **Proceedings...** Poços de Caldas: ENAN, 1997. 1 CD-ROM.
- 50 INTERSIL-GE-USA, Component Data Catalog, 1987.
- 51 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Dosimetry for Radiation Processing**. Subcommittee E10.01, Sept. 1993 (ASTM Progress Report 34).
- 52 BEHRENS, W.; HAWRANEK, P.M. **Manual For the Preparation of Industrial Feasibility Studies**. Vienna, Austria: United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), 1991.

- 53 NISSIN ELECTRIC COMPANY LTD. Proposta comercial da empresa. elaborada em 25/12/98 por M.TAKIMOTO, Gerente da Área de Vendas, Japão (Referencia ETM98-1225-1), 1998.
- 54 CLELAND, M.R. Technical and economic aspects of electron beam disinfection of dewatered sewage sludge. In: WORKSHOP ON POTENTIAL FOR ENGINEERING –SCALE PROCESSING OF WASTE TREATMENT OF STREAMS BY ELECTRON BEAM IRRADIATION, 1997, University of Miami, Coral Gables, FL.USA, *Proceedings...* FL.USA, 1997. p. 140-149.

## **ANEXOS**

**ANEXO 1 : Desenho CTR -0028/0000-I-3.00**