AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**Desenvolvimento de um sistema automatizado para controle operacional do
acelerador industrial de elétrons Cockroft -Walton**

SAMIR LUIZ SOMESSARI

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

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

**São Paulo
2019**

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

**Desenvolvimento de um sistema automatizado para controle operacional do
acelerador industrial de elétrons Cockroft -Walton**

SAMIR LUIZ SOMESSARI

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

Orientador:
Prof. Dr. Wilson Aparecido Parejo Calvo

Versão Corrigida
Versão Original disponível no IPEN

São Paulo
2019

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

Como citar:

SOMESSARI, S. L. ***Desenvolvimento de um sistema automatizado para controle operacional do acelerador industrial de elétrons Cockroft-Walton.*** 2019. 130 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: <www.teses.usp.br> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

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

Somessari, Samir Luiz

Desenvolvimento de um sistema automatizado para controle operacional do acelerador industrial de elétrons Cockroft Walton / Samir Luiz Somessari; orientador Wilson Aparecido Parejo Calvo. -- São Paulo, 2019.
130 p.

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

1. Acelerador de elétrons. 2. Automação. 3. Controlador lógico programável- CLP. I. Parejo Calvo, Wilson Aparecido, orient. II. Título.

Dedico este trabalho a minha esposa, filha, família e amigos.

AGRADECIMENTOS

À Dra. Margarida Mizue Hamada, Gerente do Centro de Tecnologia das Radiações, pelo apoio e infraestrutura disponível proporcionada para a realização deste trabalho.

Ao Dr. Wilson Aparecido Parejo Calvo, Superintendente do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP), pela orientação e valioso apoio prestado e incentivo.

Aos Drs. João Augusto de Moura e Fábio Eduardo da Costa, pelas discussões sobre os sistemas de automação.

Ao Dr. Anselmo Feher, pela valiosa colaboração na montagem dos experimentos e sugestões.

Ao Eng. Francisco Edmundo Sprenger, pela valiosa colaboração na elaboração dos projetos mecânicos.

Ao Sr. Wagner Fernandes, pela valorosa ajuda com os componentes mecânicos.

Ao Dr. Guilherme Soares Zahn, pelos valiosos comentários sobre o trabalho.

Aos funcionários do Centro de Tecnologia das Radiações, pela cortesia e presteza.

À Comissão de Pós-Graduação do Instituto, pelo apoio e auxílio durante realização deste trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP), pela oportunidade de realização deste trabalho.

RESUMO

SOMESSARI, Samir Luiz. Desenvolvimento de sistema automatizado para controle operacional do acelerador industrial de elétrons Cockcroft-Walton. 2018, 97 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP). São Paulo.

Os aceleradores de feixes de elétrons são utilizados em muitas aplicações, tais como pesquisa em física básica, química, medicina, biologia molecular, microeletrônica, agricultura e indústria, dentre outras. Na maioria dos aceleradores, por meio de aquecimento do filamento de tungstênio e da alta tensão via gerador Cockcroft-Walton, os elétrons passam por um campo elétrico na câmara em vácuo e são acelerados de acordo com a alta tensão aplicada, transferindo energia aos elétrons. Para fins industriais, um dos equipamentos mais utilizados é o Acelerador Industrial de Elétrons Dynamitron®. No IPEN-CNEN/SP, instalou-se um acelerador de feixe de elétrons Dynamitron®, fabricado pela *RDI – Radiation Dynamics Inc.*, modelo DC1500/25/4, em 1978. A tecnologia analógica aplicada nesse acelerador industrial de elétrons data de 1960 e 1970. Assim, além da tecnologia de controle operacional obsoleta, não há mais peças e componentes sobressalentes originais, fornecidos pelo fabricante (RDI) ao equipamento. O objetivo deste trabalho foi desenvolvido um sistema automatizado para controle operacional do acelerador industrial de elétrons Cockcroft-Walton de 37,5 kW (1,5 MeV e 25 mA) no Instituto.

Palavras chaves: Acelerador de Elétrons; Sistema Automatizado; Controle Operacional; Cockcroft-Walton.

ABSTRACT

SOMESSARI, Samir Luiz. Automated system development for operating control for a Cockcroft-Walton industrial electron beam accelerator. 2018, p. 97. Thesis (Doctorate in Nuclear Technology) – Nuclear and Energy Research Institute (IPEN-CNEN/SP). São Paulo.

Electron beam accelerators are used in many applications, such as basic research in physics, chemistry, medicine, molecular biology, microelectronics, agriculture and industry, among others. In most accelerators, by means of heating a tungsten filament and high-voltage from a Cockcroft–Walton generators, the electrons go through an electrical field in the vacuum chamber and are accelerated according to the high-voltage applied to transferring energy to the electrons. For industrial purposes, one of the most used of equipment is the Dynamitron® Industrial Electron Beam Accelerator. In IPEN-CNEN/SP, this Dynamitron® Accelerator, manufactured by RDI - Radiation Dynamics Inc, model DC1500/25/4, was installed, in 1978. The analogical technology applied in this industrial accelerator dates from 1960 and 1970. Therefore, besides the obsolete operational control technology, there are not spare parts or components supplied by the manufacturer (RDI). The goal of this work was to develop an automated system for the operational control of the Cockcroft-Walton industrial electrons accelerator of 37.5 kW (1.5 MeV and 25 mA), at IPEN-CNEN/SP.

Keywords: Electron Beam Accelerator; Automated System; Operating Control; Cockcroft-Walton.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Planta de Irradiação com Acelerador de Elétrons Rhodotron® modelo TT1000.....	21
Figura 2 – Acelerador de Elétrons Rhodotron® modelo TT1000	22
Figura 3 – Acelerador de Elétrons Rhodotron® com conversor de raios X.....	23
Figura 4 – Acelerador de Elétrons Dynamitron®.....	24
Figura 5 – Acelerador de Elétrons Dynamitron® (500 keV a 5 MeV).....	24
Figura 6 – Instalação de acelerador de elétrons - Categoria I	25
Figura 7 – Sala de irradiação blindada com acelerador de elétrons - Categoria II.....	26
Figura 8 – Circuito de Greinacheir e Villard	29
Figura 9 – Circuito de Villard Voltage Doubler	29
Figura 10 – Circuito Half Wave Cockcroft-Walton Voltage Multiplier.....	30
Figura 11 – Circuito do multiplicador de tensão a capacitor chaveado	31
Figura 12 – Formas de onda das tensões.....	32
Figura 13 – Circuito equivalente para dobrador de tensão chaveado	33
Figura 14 – Circuito equivalente com carga RL_1	34
Figura 15 – Circuito equivalente com carga RL_2	34
Figura 16 – Circuito equivalente para multiplicador de tensão.....	35
Figura 17 – Requerimento para licenciamento.....	37
Figura 18 – Detalhes do painel elétrico do Acelerador de Elétrons Dynamitron® modelo DC1500/25/4 do IPEN-CNEN/SP.....	45
Figura 19 – Detalhes dos <i>racks</i> de controle do Acelerador de Elétrons Dynamitron® modelo DC1500/25/4 do IPEN-CNEN/SP	46
Figura 20 – Detalhes internos do <i>rack</i> de controle do Acelerador de Elétrons Dynamitron® modelo DC1500/25/4 do IPEN-CNEN/SP	46
Figura 21– Módulos da CPU e módulos analógicos e digitais Siemens S7-1200.....	48
Figura 22 – <i>Rack</i> do sistema de controle automatizado desenvolvido.....	48
Figura 23 – Motor de passo utilizado da empresa <i>Applied Motion Products</i>	49
Figura 24 – Módulo eletrônico de controle do motor de passo modelo 1240i da empresa <i>Applied Motion Products</i>	49
Figura 25 – <i>Notebook</i> utilizado como estação de operação e programação do Acelerador de Elétrons Dynamitron® DC1500/25/4 do IPEN-CNEN/SP	51
Figura 26 – Tela gráfica do aplicativo TIA V11 da Siemens.....	52
Figura 27 – Tela gráfica do aplicativo Si Programmer V2.5.7 da empresa <i>Applied Motion Products</i>	53
Figura 28 – Tela gráfica do aplicativo Indusoft Web Studio V7.1	54
Figura 29 – Fluxograma I do Sistema de Potência do Acelerador de Elétrons	57
Figura 30 – Fluxograma II de Lógica Operacional do Acelerador de Elétrons	58
Figura 31 – Esquema do processo elétrico do acelerador	61
Figura 32 – Circuito eletrônico de controle de disparo de tiristores (SCRs).....	62
Figura 33 – Circuito de disparo dos Tiristores (SCRs).....	63
Figura 34 – Esquema básico do gerador de alta tensão (1.632 kV)	64

Figura 35 – sinais de realimentação a ser processados pelo CLP.....	67
Figura 36 – relação das tensões de controle (original/CLP)	68
Figura 37 – Placa conversora de sinais	71
Figura 38 – Identificação e precisão dos componentes da placa de sinais.....	73
Figura 39 – Circuito conversor de corrente 0 mA a 100 mA	74
Figura 40 – Circuito conversor de corrente 0 mA a 400 μ A	74
Figura 41 – Circuito conversor de corrente 0 μ A a 160 μ A	75
Figura 42 – Circuito conversor de corrente 0 μ A a 200 μ A	76
Figura 43 – Curva do filtro passa-baixa 80 kHz a 160 kHz	76
Figura 44 – Placa conversora de sinal: filtro passa-baixa	77
Figura 45 – Integração automatizada no sistema de vácuo	78
Figura 46 – Diagrama de controle da varredura do feixe de elétrons	78
Figura 47 – Diagrama do processo de realimentação do sistema de varredura ...	79
Figura 48 – Curva da dosimetria do feixe de elétrons (energia x varredura)	80
Figura 49 – Certificado de dosimetria	81
Figura 50 – Fluxograma do projeto do sistema de varredura do acelerador de elétrons	82
Figura 51 – Diagrama de instalação dentro do vaso de pressão	83
Figura 52 – Diagrama elétrico e controle	83
Figura 53 – Planta da sala de controle e sala de irradiação	86
Figura 54 – Diagrama elétrico com controle e monitoração via CLP	86
Figura 55 – Software TIA Siemens para programação no CLP	88
Figura 56 – Software da lógica de programação.....	88
Figura 57 – Tela de controle IHM do acelerador e monitoração	89
Figura 58 – Tela de monitoração de sinais digitais.	89
Figura 59 – Tela de monitoração de sinais analógicos.	90
Figura 60 – Simulador de sinais do acelerador de elétrons	90
Figura 61 – Desenvolvimento de software	91
Figura 62 – Desenvolvimento de placa de dados de controle de hardware.....	91
Figura 63 – Simulador de alta tensão e de sinais pertinentes ao projeto.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tensões e correntes elétricas do Acelerador de Elétrons JOB 188 do IPEN-CNEN/SP.....	65
Tabela 2 – Teste no controle da alta tensão do Acelerador de Elétrons JOB 188 do IPEN-CNEN/SP.....	70
Tabela 3 – Relação da tensão de controle e ganho do amplificador no Acelerador de Elétrons JOB 188 do IPEN-CNEN/SP.....	82

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Objetivos.....	15
1.1.1	Objetivo principal	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
1.2	Originalidade	16
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	17
2.1	Aceleradores de elétrons	17
2.2	Modelos e tipos de acelerador de elétrons.....	20
2.3	Instalações de irradiação com feixe de elétrons.....	25
2.4	Automação	26
2.5	Gerador de alta tensão Cockcroft-Walton	29
2.6	Circuito de Villard Doubler e Greinacher	29
2.6.1	Multiplicador de tensão meia onda Crockroft-Walton.....	30
2.6.2	Descrição básica multiplicador de tensão	31
2.7	Normas de instalações radiativas da CNEN	36
2.7.1	Organização para a instalação	36
2.7.2	Aprovação Prévia.....	38
2.7.3	Aprovações do Local.....	38
2.7.4	Autorizações para construção.....	39
2.7.5	Autorizações para comissionamento	39
2.7.6	Autorizações para modificação	40
2.7.7	Autorizações para operação	41
2.7.8	Autorizações para retirada de operação	41
2.7.9	Diretrizes básicas de proteção radiológica.....	41
3	VIABILIDADE ECONÔMICA, TÉCNICA E SOCIAL	43
3.1	Estimativa de custo	43
3.1.1	Recursos/capital investido durante o desenvolvimento	43
3.2	Custo do equipamento Importado.....	44
3.3	Viabilidade técnica.....	44
3.4	Viabilidade social	44
3.5	Exequibilidade geral	44
4	MATERIAL E MÉTODOS	45
4.1	Infraestrutura.....	45

4.2	Controlador Lógico Programável (CLP).....	47
4.3	<i>Racks</i> e Painel de Controle	48
4.4	Motor de passo e módulos eletrônicos para controle do motor.....	49
4.5	Materiais elétricos e mecânicos diversos.....	50
4.6	Notebook para programação e estação de operação	50
4.7	Programa e aplicativos utilizados no desenvolvimento do sistema automatizado	51
4.8	Aplicativo para programação do CLP	51
4.9	Aplicativo de programação dos módulos de controle dos motores .	52
4.10	Aplicativo de programação da interface gráfica da estação de operação	53
5	RESULTADOS, PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS E DESENVOLVIMENTO	55
5.1	Desenvolvimento operacional	56
5.2	Diagrama e sequência do processo	59
5.3	Desenvolvimentos do processo de automação do sistema de controle	66
5.4	Desenvolvimento da placa conversora de sinais	66
5.4.1	Esquemática do projeto	73
5.4.2	Esquema elétrico da placa conversora de sinais	73
5.4.3	Filtro passa-baixa (ordem 1)	76
5.5	Desenvolvimento do sistema de vácuo	77
5.6	Desenvolvimento do sistema de varredura de feixe.....	78
5.7	Desenvolvimento para controle de feixe de elétrons	82
5.8	Sistemas de segurança	84
5.9	Desenvolvimento do software para o sistema de controle	86
5.10	Desenvolvimento do simulador de sinais.....	90
5.11	Falhas de equipamento	92
6	CONCLUSÕES.....	93
6.1	Trabalhos futuros.....	95
	REFERÊNCIAS	96
	Apêndice I - Trabalhos Publicados.....	51

1 INTRODUÇÃO

O tema proposto nesta tese de doutorado teve como foco desenvolver e nacionalizar um sistema automatizado para controle operacional do acelerador de elétrons Cockcroft-Walton, tipo Dynamitron®, modelo DC1500/25/4, com energia de 1,5 MeV, corrente de 25 mA, potências totais e de feixe de 150 kW e 37,5 kW, respectivamente, instalado no IPEN-CNEN/SP em 1978. Desde então utilizado em (CALVO *et al.*, 2012; DUARTE *et al.*, 2012):

- ✓ Radioesterilização de produtos médicos, cirúrgicos e biológicos;
- ✓ Desinfestação e preservação de alimentos e produtos agrícolas;
- ✓ Tratamento de efluentes industriais e domésticos;
- ✓ Radioesterilização de tecidos biológicos;
- ✓ Modificação de materiais poliméricos;
- ✓ Reticulação de fios e cabos elétricos, mantas de polietileno e materiais termorretráteis;
- ✓ Cura de materiais compósitos por radiação ionizante;
- ✓ Irradiação de semicondutores para indústria de componentes eletrônicos;
- ✓ Irradiação de diversos materiais para desenvolvimento de novos produtos e processos;
- ✓ Desenvolvimento de técnicas, equipamentos e dispositivos de irradiação;
- ✓ Treinamento e ensino na formação de mestres, doutores e pós-doutores; e
- ✓ Prestação de serviço às indústrias, institutos de pesquisa, universidades e comunidades científicas nacionais e internacionais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver e nacionalizar um sistema automatizado para controle operacional do Acelerador de Elétrons Cockcroft-Walton, tipo Dynamitron®, modelo DC1500/25/4, instalado no IPEN-CNEN/SP em 1978, realizando-se a dosimetria industrial e o estudo de viabilidade técnica e econômica, aplicando-se as boas práticas de fabricação e as normas de segurança exigidas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA).

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos incluíram as etapas que permitiram alcançar o objetivo principal e são listados:

- a) Desenvolver placas de circuitos eletrônicos específicos;
- b) Desenvolver dispositivos elétricos, eletrônicos, mecânicos e pneumáticos;
- c) Adquirir informações do sistema de potência do acelerador de elétrons (tensão, corrente eficazes do painel oscilador, gerador de alta tensão e tubo de aceleração, dentre outros parâmetros);
- d) Pesquisar e definir equipamentos, tais como controlador lógico programável (CLP), monitores de vácuo e fontes de alimentação, dentre outros dispositivos necessários para automação do sistema de controle;
- e) Desenvolver softwares de automação e supervisão do CLP;
- f) Projetar o intertravamento do sistema de segurança física e radiológica com o sistema de controle do acelerador de elétrons;
- g) Projetar o intertravamento do sistema de controle com os sistemas de refrigeração, transporte (esteira) e ar comprimido, dentre outros periféricos; e

- h) Analisar os parâmetros operacionais da máquina, comparando-se a dosimetria teórica e a dosimetria industrial aplicada.

1.2 Originalidade

Durante a revisão bibliográfica deste trabalho de doutorado, verificou-se que no Brasil não existe fabricante de aceleradores industriais de elétrons. Além disso, no trabalho de campo, observou-se a condição de obsolescência no sistema de controle do Acelerador de Elétrons Dynamitron®, modelo DC1500/25/4 instalado no IPEN-CNEN/SP, visto não haver mais peças de reposição pelo fabricante, a IBA Industrial, sendo elevado o custo para adquirir novo sistema de controle (cerca de US\$ 380,000.00). O acelerador do Instituto está funcionando de forma precária, pelo fato de seu controle operacional estar obsoleto. Sendo assim, não se podem assumir compromissos com empresas na prestação de serviços em nível de produção, sendo utilizado hoje somente para pesquisas.

Os sistemas atualmente produzidos pelo fabricante não disponibilizam o programa mestre e detalhes de software e de circuitos eletrônicos, assim, optou-se por desenvolver e modernizar, com tecnologia nacional, um novo sistema de controle operacional para o acelerador do IPEN-CNEN/SP.

A originalidade deste trabalho, superando a questão do segredo industrial, consiste na nacionalização com desenvolvimento de um novo método na automação no sistema de controle.

A principal proposição a ser solucionada durante a execução do trabalho e que constitui inovação tecnológica é o estudo e desenvolvimento do sistema de controle em equipamentos geradores de radiação ionizante.

Ainda a relação à originalidade, a proposta de desenvolvimento do sistema de controle, além de se apresentar como alternativa técnica e econômica, mostra que os recursos técnicos e teóricos (acadêmicos) estão disponíveis no IPEN-CNEN/SP.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Aceleradores de elétrons

Aceleradores de partículas são equipamentos sofisticados e onerosos, empregados para aceleração de partículas eletricamente carregadas, tais como, elétrons, prótons e íons além de partículas menos comuns como o pósitron, e são fruto de anos de pesquisa e dedicação de dezenas de milhares de físicos, engenheiros, matemáticos, químicos, técnicos, e administradores em diversos países. Suas aplicações são muitas, começando com a própria pesquisa em física básica, passando pela química, medicina, biologia molecular, microeletrônica e agricultura, culminando na indústria em geral, especialmente ligada ao desenvolvimento de materiais, petroquímicas, de alimentos e materiais cirúrgicos, dentre outras.

No final dos anos 1920, tornou-se claro que fontes radioativas naturais já não eram suficientes e que os aceleradores eram necessários no desenvolvimento de pesquisas em Física Nuclear. No início dos anos 1930, verificou-se o desenvolvimento dos diferentes tipos de aceleradores quase simultaneamente: linear de alta frequência, circulares e de corrente contínua (DC). Cockcroft e Walton (1932) construíram seu primeiro gerador de 600 keV tipo cascata em 1932. Praticamente ao mesmo tempo, Robert Van de Graaff construiu sua máquina de 1,5 MeV (A DOUBLE..., 2007).

Todos os aceleradores de elétrons incluem uma fonte de elétrons, uma câmara de vácuo de aceleração e um sistema para extração a partir do vácuo e distribuição sobre a superfície do produto. A maioria obtém elétrons a partir de uma fonte de filamento aquecido, chamado de canhão de elétrons. A energia dos elétrons é então aumentada em uma ou mais fases à medida que passam através de um vácuo com um campo elétrico aplicado. Há inúmeras maneiras de gerar esse campo elétrico. Aceleradores DC geram e mantêm a tensão total de aceleração entre apenas dois eletrodos. À medida que a tensão é elevada a milhões de Volts, o isolamento elétrico se torna um problema de engenharia. Mesmo com baixas potências, esses aceleradores podem ter dimensões superiores a 15 metros. Para sistemas com a energia necessária para irradiação industrial, os modelos mais comuns disponíveis comercialmente são o

Dynamitron® (COTTEREAU, 2004; RADIATION DYNAMICS, 1996). No IPEN-CNEN/SP há um acelerador de elétrons DC150025/4 fabricado pela *RDI – Radiation Dynamics Inc.*, empresa adquirida em 1999 pela IBA Industrial, que foi instalado em 1978, mas a tecnologia de controle é da década de 1960 e 1970, hoje obsoleta, e não há mais peças de reposição.

O acelerador de elétrons é utilizado para reticulação de fios e cabos elétricos, mantas de polietileno, tubos retráteis, irradiação para esterilização de produtos médicos, processamento de *waffer* de silício, irradiação de alimentos, modificação de compósitos e polímeros, em pneus, na pré-cura para tratamento químico, em resíduos biológicos e outros produtos (SOMESSARI, 2007; IAEA, 2004; 2007; 2010).

O acelerador de feixe de elétrons dá altas velocidades aos elétrons. Os elétrons emitidos formam um feixe, que colimado que atravessa o produto para irradiar o material. À medida que os elétrons penetram no material, realizam numerosas colisões com os átomos que encontram pela frente. Os átomos geralmente tornam-se ionizados por essas colisões, ganhando energia extra que pode iniciar mudanças químicas dentro do produto. Todos os elétrons no feixe têm energia suficiente para excitar milhares de átomos no interior do material, antes de atravessá-lo e serem espalhados para fora do material, quando aplicável.

Dentro do material do ensaio, o feixe de elétrons é disperso em todas as direções. A maioria das colisões produz espalhamento com ângulo relativamente pequeno, e o feixe de elétrons interage com os elétrons orbitais no átomo. Alguma colisão, no entanto, irá resultar em grande ângulo de retrodifusão, quando o feixe de elétrons encontra um núcleo atômico.

Em termos de utilização industrial do Acelerador de Elétrons Dynamitron®, modelo DC1500/25/4, os parâmetros de processamento são a tensão e a corrente de feixe. A tensão afeta a profundidade que os elétrons vão penetrar no produto; a corrente do feixe afeta principalmente a dose absorvida no produto. Tensão mais elevada significa que cada elétron carrega mais energia e pode penetrar mais profundamente no material, e realizar mais colisões antes de cessar o movimento (CLELAND, 1958; GALLOWAY; LISANTI; CLELAND, 2004).

A energia média absorvida por colisão é, contudo, quase independente da energia dos elétrons, de modo que a tensão do acelerador (energia) afeta

principalmente a distribuição da dose no interior do material e não a magnitude da dose.

A corrente de feixe, em contrapartida, não altera a energia do feixe de elétron na penetração no produto, resultando em efeito sobre a distribuição da dose. O aumento na corrente de feixe conduz apenas a um aumento proporcional no número de colisões e, portanto, a energia da dose em qualquer profundidade dentro do produto.

Outro parâmetro de processamento para determinar a dose absorvida nos materiais é a velocidade de processamento do produto à medida que passa pelo feixe de elétrons no sistema de varredura. Assim, mantendo-se a mesma corrente de feixe do acelerador, quanto maior a velocidade de processamento, menor a dose absorvida pelo produto.

Acelerador de elétrons é composto dos seguintes equipamentos e periféricos (CLELAND, 1958; GALLOWAY; LISANTI; CLELAND, 2004):

- a) Fonte de alta tensão;
- b) Tubo de aceleração, canhão de elétrons;
- c) Sistema óptico;
- d) Sistema de vácuo;
- e) Sistemas de controle e intertravamento;
- f) Utilitários;
- g) Esteira de transporte;
- h) Polias, bobinador e desbobinador (fios e cabos elétricos); e
- i) Outros equipamentos periféricos.

Quando um elétron (carga de $1,6 \times 10^{-19}$ Coulombs) é acelerado em um campo elétrico de 1 Volt, sua energia se torna $1,6 \times 10^{-19}$ Joules. Isso é mais vulgarmente referido como 1 elétron-Volt ou 1 eV. No processamento por radiação com feixe de elétrons, é comum citar as energias em elétrons-Volt ou milhões de elétrons-Volt (MeV), onde o Volt fator é igual ao potencial de aceleração da fonte. Nem todos os elétrons em um feixe de energia são idênticos, e é comum que haja um espectro ou um intervalo de energias (CLELAND; STICHELBAUT, 2009).

A forma do espectro depende do tipo de acelerador e de como é ajustada a fonte de raios X. A fonte de raios X é produzida bombardeando-se

metais pesados com os elétrons têm energias que cobrem uma vasta gama, mas nunca exceder o máximo de energia dos elétrons-pai. É comum se referir a um espectro de raios X pela energia nominal do feixe de elétrons que gera. Por exemplo, um feixe de elétrons 5 MeV significa que gera 5 MeV raios X, embora o feixe de elétrons-mãe e filha raios X inclui uma gama de energias. Para os raios X, essa “energia” é um rótulo útil para comparar a penetração de raios X e fontes de Co-60 para garantir que a fonte irá atender às diretrizes internacionais para o máximo de energia (CLELAND; STICHELBAUT, 2009).

A unidade do Sistema Internacional (SI) que mede a atividade de um radionuclídeo é o Becquerel (Bq), o qual equivale a 1 (uma) desintegração/s. No entanto, o Curie (Ci) é utilizado para informar a atividade das fontes radioativas industriais, tais como as fontes seladas de cobalto-60 (energias dos raios gama de 1,27 MeV e 1,33 MeV), em irradiadores de grande porte.

Por equivalência, 1 kW de potência do feixe de elétrons é igual a 67.567 Ci em cobalto-60. Na prática, a eficiência com que a radiação é absorvida pelo produto é diferente para cada fonte de radiação (feixe de elétrons, raios gama ou X). Assim, a quantidade de material processado por unidade de tempo (*throughput*) em um irradiador de cobalto-60 com atividade de 1 MCi não é a mesma que em um acelerador de elétrons com potência de feixe de 14,8 kW ou de raios X (CLELAND; STICHELBAUT, 2009).

Como os aceleradores de partículas são equipamentos sofisticados e caros, empregados para aceleração de partículas eletricamente carregadas, como elétrons, prótons e íons além de partículas menos comuns como o pósitron, e produzem radiação ionizante, é necessário prover um sistema de segurança radiológica e física, para proteger tanto funcionários, público em geral e o meio ambiente, assim obedecendo às normas de segurança da AIEA e da CNEN (IAEA, 2010; CNEN, 2011).

2.2 Modelos e tipos de acelerador de elétrons

O Acelerador de Elétrons é um aparelho que produz feixes de elétrons de alta velocidade e energia. Os feixes de elétrons são emitidos de forma colimada, com sistema de varredura, para que os elétrons atravessem todo o material a ser irradiado.

Os processos para aceleração podem estar relacionados aos campos elétricos e magnéticos e ondas eletromagnéticas.

Aceleradores são equipamentos que aceleram elétrons dentro de um sistema de vácuo, dessa forma o feixe é utilizado para irradiar os produtos diretamente ou para emissão de raios X (produzidos pela interação do feixe em um alvo de alto número atômico). A energia dos feixes deve ser limitada a 10 MeV no caso de feixe de elétrons e 6 MeV para raios X, para evitar a ativação dos materiais pela produção de nêutrons (IAEA, 2010; 2011).

A planta de irradiação contendo o Acelerador de Elétrons Rhodotron® modelo TT1000 é mostrada na Figura 1. O equipamento foi desenvolvido pela empresa IBA Industrial e utiliza um acelerador de recirculação onde os elétrons ganham energia por cruzar várias vezes uma única cavidade.

Figura 1– Planta de Irradiação com Acelerador de Elétrons Rhodotron® modelo TT1000.

Fonte: IBA Industrial (2007) - <https://www.iba-industrial.com/>

Os elétrons são gerados em ambiente de vácuo (canhão de elétrons), a primeira aceleração é gerada na parede interna, em seguida passam por um condutor, e um ímã dobra o feixe e o envia novamente à cavidade, fazendo assim um cruzamento do diâmetro. Dessa forma, é possível obter feixes de elétrons com altas energias. Cada vez que os elétrons atravessam a cavidade, sua energia aumenta 1,2 MeV, sendo necessários cinco ímãs para obter 7 MeV (JONGEN *et al.*, 1996).

O Acelerador de Elétrons Rhodotron® modelo TT1000 é mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Acelerador de Elétrons Rhodotron® modelo TT1000.

Fonte: IBA Industrial (2007) - <https://www.iba-industrial.com/>

O Acelerador de Elétrons Rhodotron® modelo TT1000 é composto por:

- a) Canhão de elétrons – localizado na parede externa da cavidade do acelerador, cujo funcionamento tem de estar sincronizado com a frequência, pois os elétrons precisam ser injetados na cavidade quando o campo estiver no ponto para ser acelerado;
- b) Fonte de energia RF – fornece 1.000 kW, porém para obter um campo elétrico é necessário 110 kW, permitindo ganho de 1,2 MeV por cruzamento; no entanto, um adicional de 700 kW fica disponível para chegar a 7 MeV. O sistema de RF tem um oscilador principal, controlado por tensão, seguido por uma cadeia de amplificadores;
- c) Cavidade de aceleração – cavidade coaxial, onde há tubo com eixos coincidentes feitos de chapas laminadas de aço;
- d) Cavidade de ímãs de reflexão externa;
- e) Sistema de refrigeração – fornecido em três circuitos: na cavidade, no tubo amplificador e um circuito de água deionizada para resfriar o poder de 600 kW dissipados pelo feixe no alvo de conversão de raios X, sendo o restante transformado em fótons. O sistema foi projetado

para operar com uma torre de resfriamento de 2 MW até uma temperatura externa de 35°C (95°F); e

f) Sistema de entrega do feixe de elétrons.

O Acelerador de Elétrons Rhodotron® modelo TT1000 foi projetado para produzir feixes de elétrons de 5 MeV e 7 MeV com intensidade máxima de 100 mA, correspondendo à potência de feixe de 500kW e 700kW respectivamente, devendo ser projetada uma planta de dois andares, para que a composição do equipamento fique no andar superior e no andar inferior as esteiras, que é o meio como os produtos passam pelo feixe.

Na Figura 3, é mostrado o Acelerador de Elétrons Rhodotron® com conversor de raios X (JONGENet *et al.*, 1996; GALLOWAY *et al.*, 2004).

Figura 3 – Acelerador de Elétrons Rhodotron® com conversor de raios X.

Fonte: GALLOWAY *et al.*(2004)

O Acelerador de Elétrons Dynamitron® fornece operação contínua com alto rendimento, confiabilidade e baixo custo.

O transformador de radiofrequência do acelerador fica localizado a uma distância de 2 m a 5 m do gerador de alta tensão. Já os componentes de alta tensão dentro do vaso de pressão são pressurizados com hexafluoreto de enxofre (SF₆), como meio isolante para evitar arcos elétricos no vaso de pressão. Isso faz com que se obtenham altas tensões e altos campos elétricos em um volume limitado. Já a aceleração dos elétrons se dá por múltiplos anéis de aceleração. Dentro do vaso pressão, onde se gera a alta tensão, o tubo de aceleração fica em vácuo, para aceleração dos elétrons livres de impurezas, sem afetar o direcionamento do feixe de elétrons.

O canhão de elétrons, posicionado na extremidade da alta tensão do tubo de aceleração, fornece corrente contínua (DC), já o aquecimento do filamento está relacionado com a alta tensão do retificador (GALLOWAY *et al.*, 2004).

Este modelo de equipamento, descrito em detalhes na Figura 4 e melhor visualização da instalação na Figura 5, dá uma visão da composição de sala de irradiação com blindagem radiológica (GALLOWAY *et al.*, 2004).

Figura 4 – Acelerador de Elétrons Dynamitron®.

Fonte: GALLOWAY *et al.*(2004)

Figura 5 – Acelerador de Elétrons Dynamitron® (500 keV até 5 MeV).

Fonte: IBA INDUSTRIAL (2007) - <https://www.iba-industrial.com/>

2.3 Instalações de irradiação com feixe de elétrons

- **Categoria I**

Unidade integralmente blindada com intertravamentos (Figura 6), na qual o acesso durante a operação não é fisicamente possível devido à configuração da blindagem (IAEA, 2010).

Figura 6— Instalação de acelerador de elétrons - Categoria I.

Fonte: IAEA (2010).

- **Categoria II**

Aqui, o acelerador é instalado dentro de salas de irradiação blindadas, mantidas inacessíveis durante a operação por uma série de sistemas de segurança (IAEA, 2010). Na Figura 7 mostram-se exemplos desses equipamentos com feixe de elétrons. Somente um feixe é produzido e, para que irradie todo o produto transportado na esteira, utiliza-se a técnica do feixe de varredura. A delimitação do comprimento do feixe pode ser visualizada pelo sistema de varredura no último estágio da trajetória do feixe mantida em vácuo (MCLAUGHLIN *et al.*, 2010). O isolamento do sistema de varredura é feito por placas finas metálicas chamadas janelas, da ordem de algumas dezenas de micrômetros, para permitir a passagem do feixe de elétrons com pouca perda por

absorção e, ao mesmo tempo, ajudar a manter o vácuo do sistema. Um metal muito empregado para essa função é o titânio.

Figura 7 – Sala de irradiação blindada com acelerador de elétrons - Categoria II.

Fonte: IAEA (2010).

- **Classificações dos aceleradores de elétrons**

Os aceleradores de elétrons são classificados em (IAEA, 2010):

- a) Baixa energia (150 keV a 300 keV);
- b) Média energia (300 keV a 5 MeV); e
- c) Alta energia (5 MeV a 10 MeV).

2.4 Automação

Automação industrial é o emprego de dispositivos mecânicos ou eletroeletrônicos no comando de máquinas e processos. Segundo Nitzan e Rosen (1976), a automação industrial programável pode ajudar a atender às necessidades socioeconômicas de maior produtividade e enriquecimento de trabalho em indústrias intensivas em mão de obra. Caracteriza-se pela flexibilidade de produção e facilidade de configuração para novos produtos e é especialmente adaptável na fabricação de uma variedade de produtos em tamanhos de lotes variáveis com custos de produção em massa. Os sistemas de hardwares/software programáveis e automatizados existentes atualmente na

indústria incluem controle numérico de máquinas-ferramenta, projeto e fabricação assistida por computador, informações e controle de produção e robôs industriais.

A área que recebe maiores investimentos atualmente em automação é de sistemas robóticos. Uma atividade importante envolve a aplicação de robôs com sensores em operações de manuseio de material, inspeção e montagem. O objetivo final da automação programável é uma fábrica automática essencialmente não tripulada e integrada por computador. A automação industrial busca, primordialmente, melhorar a produtividade com qualidade e segurança. Esses sistemas trabalham com as informações alimentadas por sensores por meio de um Controlador Lógico Programável, que define o estado dos atuadores (NITZAN; ROSEN, 1976).

O Controlador Lógico Programável (CLP), ou simplesmente Controlador Programável (CP), é também conhecido pela sigla inglesa PLC (*Programmable Logic Controller*). Geralmente as famílias de CLPs são definidas pela capacidade de processamento de determinado número de pontos de entradas e/ou saídas (E/S).

O CLP, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), é um equipamento eletrônico digital com hardware e software compatíveis com aplicações industriais. Segundo a *National Electrical Manufacturers Association (NEMA)*, trata-se de um aparelho eletrônico digital que utiliza uma memória programável para armazenar internamente instruções e implementar funções específicas, tais como, lógica, seqüenciamento, temporização, contagem e aritmética, controlando, por meio de módulos de E/S, vários tipos de máquina ou processo (RIBEIRO, 2001; MORAES; CASTRUSCCI, 2007; INTERNATIONAL STANDARD, 2003-2005).

Segundo o Laboratório de Energia Elétrica (LEE), os CLPs, são equipamentos eletrônicos utilizados em sistemas de automação flexível. São ferramentas de trabalho muito úteis e versáteis para aplicações em sistemas de acionamentos e controle, e por isso são utilizados em grande escala no mercado industrial. Permitem desenvolver e alterar facilmente a lógica para acionamento das saídas em função das entradas. Desta forma, podemos associar diversos sinais de entrada para controlar diversos atuadores ligados nos pontos de saída (LEE, 2018).

O CLP é indicado para lidar com sistemas caracterizados por eventos discretos (SEDs), ou seja, processos em que as variáveis assumem valores 0 (zero) ou 1 (um), ou variáveis ditas digitais, ou seja, que só assumem valores dentro de um conjunto finito. Podem ainda lidar com variáveis analógicas definidas por intervalos de valores de corrente ou tensão elétrica. As entradas e/ou saídas digitais são os elementos discretos; as entradas e/ou saídas analógicas são os elementos variáveis entre valores conhecidos de tensão ou corrente (RIBEIRO, 2001; MORAES; CASTRUSCCI, 2007; INTERNATIONAL STANDARD, 2003-2005).

Os CLPs são bastante difundidos na área de controle de processos ou de automação industrial. No primeiro caso, a aplicação se dá nas indústrias contínuas, fabricantes de líquidos, materiais gasosos e outros produtos. Na automação industrial, a aplicação se dá nas áreas relacionadas à produção em linhas de montagem, por exemplo, na indústria automobilística.

Num sistema típico, todas as informações dos sensores são concentradas no CLP, que de acordo com o programa em memória define o estado dos pontos de saída conectados a atuadores.

Os CLPs têm capacidade de comunicação de dados via canais seriais. Com isso, podem ser supervisionados por microcomputadores formando sistemas de controle integrados. Os softwares de supervisão controlam redes de CLPs. Os sistemas supervisórios são programas instalados em um microcomputador conectado a uma rede de comunicação de um ou mais CLP, que controla um equipamento, uma máquina ou até mesmo um processo completo de fabricação (RIBEIRO, 2001; MORAES; CASTRUSCCI, 2007; INTERNATIONAL STANDARD, 2003-2005).

O programa de microcomputador busca as informações no CLP e as exibem de forma animada na tela, na forma de sinóticos, gráficos, displays de mensagens ou numéricos, objetos em movimento como motores ou mudança de cores para identificar a presença de produto em tanques e tubos. Também possibilita a atuação sobre o processo, acionando elementos, modificando valores ou até mesmo interrompendo o processo (VIANNA, 2008).

2.5 Gerador de alta tensão Cockcroft-Walton

O gerador de tensão tipo Cockcroft-Walton converte a tensão alternada em tensão contínua (CUNHA, 2016).

2.6 Circuito de Villard Doubler e Greinacher

Em 1921 o físico H. Greinacher deu a conhecer os multiplicadores de tensão, através de um circuito (Figura 8) que surge da adição de um capacitor e um diodo ao Villard Voltage Doubler (Figura 9) (CUNHA, 2016).

Figura 8 – Circuito de Greinacheir e Villard.

Fonte: CUNHA (2016)

Figura 9 – Circuito de Villard Voltage Doubler.

Fonte: CUNHA (2016)

O Villard Voltage Doubler, conhecido assim por meio do físico e químico Paul Ulrich Villard, funciona como um *diode clamper*, ou seja, permite adicionar um *offset* na tensão de saída, que resulta da sobreposição do sinal de entrada com a componente contínua adicionada pelo capacitor presente, alterando o valor médio. Durante o ciclo negativo, o diodo D1 (Figura 9) encontra-se diretamente polarizado, carregando assim o capacitor C1 até a tensão de pico da fonte de alimentação, permitindo que no ponto B esteja presente 0 V. Na outra metade do ciclo, o D1 funciona como circuito aberto, originando assim uma tensão VBG de 2 V de pico. Tem-se assim uma forma de onda VBG em 5 V, com

concordância de fase com a da entrada, mas com um offset introduzido pela componente contínua aos terminais do capacitor (CUNHA, 2016).

Na colocação de um diodo e um capacitor na disposição presente na Figura 8, introduz-se uma tensão VCG contínua. Com comportamento igual no ciclo negativo ao Villard Voltage Doubler, tem-se no ciclo positivo o diodo D1 ao corte e D2 a conduzir, carregando o capacitor C2 até a tensão de pico da onda VBG (CUNHA, 2016).

2.6.1 Multiplicador de tensão meia onda Crockroft-Walton

O gerador Cockcroft-Walton, presente na Figura 10, converte tensão alternada em tensão contínua, elevando o valor desta. Foi proposto em 1932 pelos físicos John Cockcroft e Ernest Walton de forma a alimentar um acelerador de partículas baseado na topologia anteriormente apresentada pelo físico H. Greinacher (CUNHA, 2016).

Desde então muito trabalho tem sido desenvolvido com os multiplicadores de tensão, sendo que o mais comum e utilizado é o *Half Wave Cockcroft-Walton Voltage Multiplier* (Figura 10).

Figura10 – Circuito Half Wave Cockcroft-Walton Voltage Multiplier

Fonte: CUNHA (2016)

Teoricamente, para um único nível do gerador, uma tensão alternada de amplitude é convertida à saída numa tensão contínua “2E”, por meio da transferência de carga de um capacitor para outro durante meio ciclo; e na outra metade do ciclo o primeiro capacitor é recarregado sem descarregar o seguinte.

Adicionando vários níveis e em condição de carga nula tem-se na Equação 1 (CUNHA, 2016):

$$V_o = 2nE \quad (1)$$

Na qual, “n” representa o número de níveis do gerador e “Vo” a tensão de saída.

Quando ligada uma carga aos terminais de saída do multiplicador de Cockcroft Walton, a tensão de saída é menor do que a calculada devido à queda de tensão e de impedância dos capacitores. É assim observada uma queda de tensão Vo e igualmente um *ripple* na tensão de saída Vo (CUNHA, 2016).

2.6.2 Descrição básica multiplicador de tensão

Este circuito possibilita a obtenção de uma tensão contínua de saída que é múltiplo inteiro do valor de pico de uma tensão de entrada, neste caso alternada (quadrada ou senoidal). As chaves ligam e desligam em sincronia com a frequência da fonte. Possui diversas aplicações em situações onde é necessária tensão superior à alimentação principal, ou para gerar uma tensão de polaridade contrária à da alimentação (BONFIM, 2016).

Figura 11 – Circuito do multiplicador de tensão a capacitor chaveado.

Fonte: BONFIM (2016)

Na análise do funcionamento, para que o circuito (Figura 11) atue corretamente, o período de chaveamento das chaves deve ser o mesmo da fonte alternada de entrada Vi. As chaves operam de modo complementar. A polaridade da tensão de saída depende unicamente da fase relativa das chaves em relação à tensão de entrada Vi. Para uma saída positiva, CH1 deve estar ligada no semiciclo negativo de Vi e CH2 no semiciclo positivo. Para uma saída negativa, CH1 deve estar ligada no semiciclo positivo de Vi e CH2 no semiciclo negativo. Seja Vp a tensão de pico do sinal Vi.

Como condição inicial da análise, consideram-se ambos capacitores descarregados e a tensão Vi iniciando no semiciclo negativo.

Analisando-se a condição para a tensão de saída positiva, tem-se:

➤ Primeiro semiciclo T1

V_i está no semiciclo negativo

CH1="ON"; CH2="OFF"

- Capacitor C1 carrega-se com $+V_p$

➤ Segundo semiciclo T2

V_i está no semiciclo positivo

CH1="OFF"; CH2="ON"

- Capacitor C1 e a fonte V_i transferem cargas para C2

As cargas transferidas são dobradas, pois a tensão resultante no nó + de C1 é $2V_p$ (V_p acumulada em C1 somada a V_p da fonte V_i)

➤ Terceiro semiciclo T3

V_i está no semiciclo negativo

CH1="ON"; CH2="OFF"

- Capacitor C1 se carrega com $+V_p$
- Capacitor C2 mantém as cargas acumuladas no ciclo anterior

➤ Quarto semiciclo T4

V_i está no semiciclo positivo

CH1="OFF"; CH2="ON"

- Capacitor C1 e fonte V_i transferem cargas para C2
- Tensão em C2 aumenta

Figura 12 – Formas de onda das tensões (V).

Nota: Vi (vermelho), no capacitor C1 (verde) e no capacitor C2 (azul), para C1=C2.
Fonte: BONFIM (2016).

O processo repete-se resultando num crescimento exponencial da tensão em C2 até atingir $2V_p$ (caso não haja corrente na saída). A Figura 12 mostra as tensões de entrada, em C1 e em C2. Observa-se claramente a tendência exponencial da carga de C2 ao longo do tempo. O circuito equivalente linear dessa configuração é semelhante ao circuito visto no item anterior, representado por uma fonte de tensão, uma resistência equivalente e o capacitor C2 mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Circuito equivalente para dobrador de tensão chaveado.

Fonte: BONFIM (2016).

A resistência equivalente do circuito é:

$$R_{eq} = \frac{T_c}{C2 \cdot \ln \left[\frac{(C1 + C2)}{C2} \right]}$$

A fonte de alimentação VCC é a função da tensão de pico Vi:

$$V_{dc} = 2V_p = V_{pp}$$

É mais conveniente utilizar a tensão de pico a pico (V_{pp}) no lugar da tensão de pico, pois, caso a tensão alternada de entrada seja assimétrica, o pico

positivo é diferente do negativo, levando a erros no cálculo da tensão V_{dc} . No entanto, o valor da tensão pico a pico é independente da assimetria. Nesse caso, o transitório inicial da tensão de saída em $C2$ será diferente, mas em regime permanente o funcionamento do circuito será o mesmo.

No circuito de carga, a saída do dobrador é geralmente utilizada para alimentar outro circuito, que haverá uma corrente não nula que provocará queda de tensão na resistência equivalente. A tensão final de saída com carga RL pode ser obtida utilizando-se o circuito equivalente tratado como divisor de tensão, como mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Circuito equivalente com carga RL_1 .

Fonte: BONFIM (2016).

Em regime permanente o capacitor $C2$ não interfere no cálculo da tensão DC de saída, que é dada por:

$$V_o = V_{dc} \frac{RL}{(RL + R_{eq})} = V_{pp} \frac{RL}{(RL + R_{eq})}$$

As chaves do circuito multiplicador (dobradores) de tensão podem ser implementadas com diodos.

Figura 15 – Circuito equivalente com carga RL_2 .

Fonte: BONFIM (2016).

A Figura 15 mostra o circuito típico com diodos para obtenção de uma saída positiva. Quando a tensão da fonte V_i é negativa, o diodo $D1$ está diretamente polarizado, carregando o capacitor $C1$ com $V_p - V_d$. Nesta condição, o

diodo D2 está reversamente polarizado, bloqueando a passagem de cargas para C2. Quando a tensão da fonte V_i é positiva, o diodo D2 fica diretamente polarizado, transferindo cargas do capacitor C1 e da fonte V_i para o capacitor C2. Nesta condição, o diodo D1 está reversamente polarizado. Os diodos introduzem perdas na tensão final de modo que a tensão de saída tende para $V_{pp}-2V_d$. Para obter uma saída negativa, basta inverter os diodos em relação ao circuito apresentado na Figura 15.

O circuito equivalente simplificado é mostrado na Figura 16. A tensão de polarização direta dos diodos pode ser considerada constante ($V_d \sim 0,7V$ para diodo de silício).

Figura 16 – Circuito equivalente para multiplicador de tensão.

Fonte: BONFIM (2016).

O cálculo da tensão de saída final da carga, subtraindo-se a tensão de polarização dos diodos é definido pela Equação 2:

$$V_o = (V_{dc} - 2V_d) \frac{RL}{(RL + R_{eq})} = (V_{pp} - 2V_d) \frac{RL}{(RL + R_{eq})} \quad (2)$$

O cálculo da tensão do *ripple* de saída, subtraindo-se a tensão de polarização direta dos diodos, é definido pela Equação 3:

$$V_{r_{pp}} = \frac{(V_{dc} - 2V_d) T_c}{C2(RL + R_{eq})} = \frac{I_o T_c}{C2} \quad (3)$$

$$V_{r_{RMS}} = \frac{(V_{dc} - 2V_d) T_c}{2\sqrt{3} C2(RL + R_{eq})} = \frac{I_o T_c}{2\sqrt{3} C2}$$

A corrente do RMS de entrada e saída é obtida somando-se a expressão do circuito, definida na Equação 4:

$$\begin{aligned}
 I_{i_{RMS}} V_{i_{RMS}} &= \frac{(V_{dc} - 2V_d)^2}{(R_L + R_{eq})} + 2V_d I_d = \frac{(V_{dc} - 2V_d)^2}{(R_L + R_{eq})} + 2V_d \frac{(V_{dc} - 2V_d)}{(R_L + R_{eq})} \\
 I_{i_{RMS}} &= \frac{V_{dc}(V_{dc} - 2V_d)}{V_p(R_L + R_{eq})} = \frac{V_{pp}(V_{pp} - 2V_d)}{V_p(R_L + R_{eq})} \\
 I_{i_{RMS}} &= \frac{2(V_{pp} - 2V_d)}{(R_L + R_{eq})} = 2I_o
 \end{aligned} \tag{4}$$

2.7 Normas de instalações radiativas da CNEN

2.7.1 Organização para a instalação

É necessário obter uma licença do órgão regulador para localização, concepção, construção, aquisição, armazenamento e operação do irradiador, assegurando-se que a instalação seja concebida para satisfazer os objetivos de segurança. Primeiramente, para obter autorização na instalação na CNEN, deve-se providenciar (CNEN, 2014; s/d_1; s/d_2; s/d_3; s/d_4; 2011):

- O processo de abertura e registro jurídico frente à CNEN;
- A solicitação de concessão de registros e autorizações (SCRA); e
- A solicitação para autorização de operação da instalação radiativa.

O licenciamento de instalações radiativas segue os requisitos das normas, porém, deve-se realizar um requerimento que está disponível no site da CNEN (Figura 17).

Figura 17 – Requerimento para licenciamento

Fonte: CNEN (2017)- <http://www.cnen.gov.br/normas-tecnicas>

O formulário eletrônico SCRA, após devidamente preenchido, deve ser impresso, assinado e obrigatoriamente postado à CNEN juntamente com Análise de Segurança (PPR) para aprovação prévia. O recolhimento da TLC (Taxas de Licenciamento) deve ser feito pela Guia de Recolhimento da União (GRU) e realizado no site da Secretaria do Tesouro Nacional, porém, qualquer solicitação deve seguir o formulário e, se pertinente, o recolhimento ou a dispensa do TLC, conforme o cronograma:

- Aprovação prévia;
- Licença de construção;
- Autorização para modificação;
- Autorização para operação;
- Renovação da autorização para operação;
- Alteração de autorização para operação; e
- Autorização para retirada de operação.

A TLC só é recolhida para acelerador nas seguintes solicitações:

- Autorização para construção ou modificação;
- Autorização para operação;

- Retirada de operação; e
- Certificação de qualificação de supervisor em radioproteção.

Para importação do equipamento como mencionado, devem-se preencher os dados no SISCOMEX e também o formulário eletrônico SLI da CNEN para análise, podendo-se acompanhar o andamento do processo pela *homepage* da CNEN.

2.7.2 Aprovação Prévia

O licenciamento da instalação está relacionado à localização, segurança, construção e operação referentes à instalação que utiliza equipamentos geradores de radiação ionizante, enquadrando-se o presente estudo na Categoria III, Subgrupo 7C – Equipamentos geradores de radiação ionizante que produzem feixe com energia maior que 0,60 MeV e menor ou igual a 50 MeV. Dessa forma, as pessoas jurídicas devem requerer autorização na CNEN para o início das atividades, tendo como tópicos aprovação do local, autorização para construção, modificação de itens importante à segurança, comissionamento, operação e retirada de operação.

O processo de licenciamento da instalação deve ser encaminhado por meio de requerimento, de acordo com formulário específico, o qual está disponível no portal da CNEN, caso haja alguma alteração, deve-se encaminhar o mesmo formulário para concessão do ato.

Porém, nas instalações deve haver pelo menos um supervisor de proteção radiológica devidamente qualificado, de acordo com a CNEN.

2.7.3 Aprovações do Local

Para aprovação do local, deve-se providenciar um Relatório de Local (RL) com os seguintes requisitos:

- Características de utilização ao redor da instalação, incluindo a distribuição da população local, as vias de acesso e as distâncias aos centros de população;

- Características gerais de projeto e de operação da instalação proposta;
- Análise preliminar do potencial de impacto radiológico da instalação no meio ambiente, em operação normal e em caso de acidente; e
- Programa preliminar de monitoração ambiental pré-operacional.

2.7.4 Autorizações para construção

A autorização para construção deve ser acompanhada de um Relatório Preliminar de Análise de Segurança (RPAS), com itens de segurança que englobam:

- Qualificação técnica do responsável;
- Descrição e análise da instalação;
- Análise preliminar e avaliação do projeto, desempenho das estruturas, sistemas e componentes da instalação e avaliação dos aspectos de segurança e proteção radiológica;
- Programa de garantia da qualidade aplicado às atividades de gerenciamento, projeto, fabricação, aquisição, construção civil e montagem eletromecânica de itens importantes à segurança da instalação;
- Procedimentos em situações de emergência;
- Relação das normas técnicas e códigos e uso não autorizado;
- Plano de proteção radiológica;
- Plano de proteção física, descrevendo medidas em situação de roubo, perda e uso não autorizado; e

2.7.5 Autorizações para comissionamento

Os itens exigidos de segurança são listados conforme:

- Controles físicos e administrativos restringindo acesso de áreas controladas durante testes;
- Comprovação de que todos os funcionários estejam devidamente treinados antes do início do comissionamento;

- Adoção de medidas que garantam segurança dos trabalhadores;
- Determinação detalhada dos testes executados para garantir que todos os sistemas de segurança estão operando corretamente;
- Fornecimento do nome e descrição da experiência profissional do responsável pelo planejamento e supervisão do comissionamento;
- Indicação do tempo de operação requerido durante o comissionamento;
- Criação da lista de testes que serão efetuados no equipamento para verificação de desempenho;
- Indicação da metodologia para verificação da adequação das blindagens, incluindo a realização de um levantamento radiométrico detalhado;
- Descrição dos equipamentos que serão utilizados no levantamento radiométrico;
- Fornecimento do laudo técnico emitido por profissional registrado no Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia (CREA), atestando que a instalação foi construída em conformidade com o projeto apresentado à CNEN, incluindo a densidade e a espessura de cada barreira empregada como blindagem.

2.7.6 Autorizações para modificação

Se por alguma eventualidade houver necessidade de modificação na estrutura, sistema ou componentes, itens importantes para a segurança da instalação radiativa, essa só podem ser executadas com a autorização da CNEN.

As modificações devem ser checadas durante a implantação, para assegurar a segurança da instalação.

Antes de realizar qualquer modificação, a direção operacional da instalação deve consultar profissionais com conhecimento na área (peritos qualificados), para se avaliar potenciais causas de riscos, tais como as possíveis modificações em:

- Procedimentos operacionais;
- Sistemas de segurança;
- Significativas no irradiador;

- Reorientação do feixe de elétrons; e
- Alterações no quadro de funcionários, quando ocorrem com responsáveis pela radioproteção (empregados ou consultores).

2.7.7 Autorizações para operação

Para a autorização de operação em instalações do “Subgrupo 7C – Equipamentos geradores de radiação ionizante” é necessário providenciar um Relatório Final de Análise de Segurança (RFAS) contendo dados que a CNEN analisa de acordo os requisitos impostos, que requerem ao menos o projeto da instalação e o plano de proteção.

Com relação à autorização para operação esta só será concedida depois da conclusão da construção da instalação e desde que comprovado que a operação atende às condições legais, com os regulamentos e normas emitidas pela CNEN.

2.7.8 Autorizações para retirada de operação

Para instalações radiativas cujas atividades pretendem ser encerradas, devem-se solicitar Autorização para Retirada de Operação, mediante requerimento encaminhado à CNEN, acompanhado de Plano de Descomissionamento.

Dessa forma, como a instalação se trata de equipamentos geradores de radiação ionizante, o processo de desativação será bem simples, obtendo apenas o desligamento do aparelho, pois não há geração de material radiativo.

2.7.9 Diretrizes básicas de proteção radiológica

Este requisito de proteção radiológica está correlacionado à exposição de pessoas à radiação ionizante em:

- Ocupacionais;
- Médicas; e
- Pública.

A proteção radiológica aplica princípios que garantam que o Indivíduo Ocupacionalmente Exposto (IOE) e o público não sofram efeitos biológicos determinísticos e estocásticos, decorrentes da radiação ionizante.

As recomendações, normas e princípios da proteção radiológica vêm sendo desenvolvidos há muito tempo por organismos nacionais e internacionais:

- Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) – estabelece os princípios básicos em nível internacional;
- Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) – incorpora os princípios às normas básicas de segurança em matéria de proteção radiológica; e
- Comitê Científico das Nações Unidas para o Estudo dos Efeitos das Radiações Atômicas (*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation - UNSCEAR*).

3 VIABILIDADE ECONÔMICA, TÉCNICA E SOCIAL

3.1 Estimativa de custo

Com o propósito de estimar o custo do desenvolvimento de um novo sistema de controle para acelerador de elétrons JOB 188 instalado no IPEN-CNEN/SP desde 1978, foram considerados os recursos aplicados durante o desenvolvimento e para a mão de obra utilizada na otimização dos processos de fabricação de componentes e na montagem do painel de controle. Para facilitar a comparação dos valores do novo sistema importado da IBA Industrial (*RDI – Radiation Dynamics, Inc.*), fabricante do acelerador, com desenvolvimento de um sistema de controle nacionalizado, os custos são apresentados em Dólares Americanos.

3.1.1 Recursos/capital investido durante o desenvolvimento

- Desenvolvimento de hardware (US\$10,000.00);
- Desenvolvimento e licenças de software para automação (US\$ 4,000.00);
- Material e insumos utilizados durante o desenvolvimento (estrutural, componentes eletroeletrônicos e mecânicos, energia elétrica (US\$ 8,000.00);
- Serviços utilizados (soldagem, usinagem e montagem) (US\$ 500.00);
- Mão de obra durante o desenvolvimento (US\$ 40,000.00);
- Montante do capital investido (US\$ 62,500.00); e
- Está previsto um tempo estimado de funcionamento do sistema de controle de até 15 anos.

Para estimar o custo do capital investido, adotou-se de modo bastante conservador o tempo do desenvolvimento e montagem do sistema automatizado num período de 3 (três) anos, uma vez que se faz necessário um contínuo processo de atualização do projeto, buscando-se sempre atualização em software e hardware.

3.2 Custo do equipamento Importado

O custo de importação com peças de reposição básica mais *start up* no IPEN-CNEN/SP é de US\$ 380,000.00 sendo que hardwares e softwares são dedicados exclusivos, sem a transferência tecnológica dos mesmos (sistema fechado) – tornando o Instituto muito dependente tanto na manutenção como na aquisição de peças de reposição, o custo de uma máquina nova o valor aproximado de U\$1,800,000.00.

3.3 Viabilidade técnica

A viabilidade técnica inclui executar a nacionalização e obter conhecimentos técnicos em fabricação de sistema de controle automatizado para aceleradores tipo DC, componentes nacionalizados, desenvolvimento de software (sem depender de manutenção do fabricante, no sistema de controle)

3.4 Viabilidade social

A viabilidade social refere o fato de que o IPEN-CNEN/SP prestará serviços de irradiação à comunidade científica, indústrias, pesquisadores, no serviço de irradiação de elétrons para desenvolvimento de novos produtos com inovação tecnológica.

3.5 Exeqüibilidade geral

Conclui-se que não é viável a compra de um novo sistema de controle de acelerador de elétrons da empresa IBA Industrial (*RDI - Radiation Dynamics, Inc.*), pois o alto custo (US\$ 380,000.00) justifica a atualização do acelerador de elétrons pelo IPEN-CNEN/SP. Além da grande economia, o servidor e equipe que irão atualizar a máquina ganharão uma vasta gama de conhecimento, tanto na ordem do aprofundamento intelectual, quanto em custos, já que, havendo o *retrofit*, os componentes são nacionais e não importados. Isso vale também para manutenção e calibração.

Estimando-se que a vida útil do *retrofit* será de 15 anos com custo inicial de US\$ 62,500.00, haverá ganho de produtividade e assim um retorno de investimento que não seria possível na contratação da reforma por terceiros.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Infraestrutura

Neste trabalho foi utilizada a infraestrutura do Laboratório de Fontes Intensas de Radiação (LFIR) e do Laboratório de Dosimetria em Processos de Irradiação (LDPI), no Centro de Tecnologia das Radiações (CTR), do IPEN-CNEN/SP.

Nas Figuras 18 a 20 são mostrados os painéis de controle do acelerador industrial de elétrons Dynamitron® DC1500/25/4 tipo Cockcroft-Walton, com energia de 1,5 MeV, potência total de 150 kW, em operação no IPEN-CNEN/SP desde 1978, cujo sistema operacional necessitou ser estudado, desenvolvido e modernizado, incluindo *drivers*, CLPs, componentes eletroeletrônicos e softwares, por meio deste trabalho de doutorado. Isso incluiu painéis de distribuição para alimentação elétrica das bombas d'água, válvula osciladora, exaustor de gás ozônio (chaminé), ventilador da janela de titânio, torre de resfriamento e sistema de tratamento do gás hexafluoreto de enxofre (SF_6), dentre outros periféricos, com tensões de 127V, 220V e 440V, do Acelerador Industrial de Elétrons Dynamitron®, modelo DC1500/25/4. Na Figura 18 observam-se: a) botoeiras, sinalizadores, chaves seletoras e voltímetros; e b) barramentos de cobre, disjuntores, contadoras, fusíveis e relés térmicos, dentre outros.

Figura 18 – Detalhes do painel elétrico do Acelerador de Elétrons Dynamitron® modelo DC1500/25/4 do IPEN-CNEN/SP.

Fonte: Autor da tese (2018).

Na Figura 19 é mostrado o *rack* do acelerador industrial de elétrons Dynamitron®, modelo DC1500/25/4: a) painéis de controle do feixe de elétrons (*turn on/turn off*), parada de emergência, câmeras de vídeo e sistema de segurança e intertravamento; e b) relés eletromecânicos de controle para elevação de potência do acelerador de elétrons.

Figura 19 – Detalhes dos *racks* de controle do Acelerador de Elétrons Dynamitron® modelo DC1500/25/4 do IPEN-CNEN/SP.

Fonte: Autor da tese (2018).

Exibe-se, na Figura 20, o *rack* do Acelerador Industrial de Elétrons Dynamitron® DC1500/25/4: a) controles da corrente e da varredura de feixe, da alta tensão e do sistema de vácuo (bombas mecânica e difusora); e b) indicadores de alta tensão (*high voltage*, kV), corrente do feixe de elétrons (*beam current*, mA), largura de varredura do feixe de elétrons (*scan*, %) e sistemas auxiliares (*auxiliary*, μA).

Figura 20 – Detalhes internos do *rack* de controle do Acelerador de Elétrons Dynamitron® modelo DC1500/25/4 do IPEN-CNEN/SP.

Fonte: Autor da tese (2018).

4.2 Controlador Lógico Programável (CLP)

Para realizar a função de controle central da automação de todo o sistema, utilizou-se um CLP da Siemens, da família S7-1200. O equipamento é composto de uma Unidade Central de Processamento (CPU) modelo 1214C DC/DC/DC, que se conecta a outros módulos analógicos S7-SM 1234 AI/AQ e módulos digitais SM1223 DC/DC, chamados módulos de extensão, onde é feita a captação de diversos tipos de sinal elétrico (entradas de sinais digitais e analógicos) provenientes de sensores, botões de comando, entre outros. Por meio dos módulos de extensão também são enviados sinais elétricos para diversos componentes (saídas de sinais digitais e analógicos), tais como lâmpadas de sinalização, placas eletrônicas para controle de motores, válvulas eletro-pneumáticas, entre outros. A alimentação elétrica da CPU e dos módulos de extensão é feita em 24 VDC (SIEMENS SIMATIC, 2003)

A CPU executa a programação desenvolvida para a aplicação, sendo o tempo de execução da programação por instrução de aproximadamente 0,08 μ s e a velocidade de processamento matemático, como PID (Proporcional, Integral e Derivativo) e outras instruções, de 2,3 μ s. Esse tempo de ciclo é adequado para o projeto, uma vez que os sinais de entrada e de saída dos eventos do processo acontecem com a duração mínima da ordem de 0,1 segundo (100 ms), tais como sinais de sensores e módulos eletrônicos de controle de motores. Dessa forma, nunca ocorrerá um evento tão rápido que não seja registrado e devidamente processado pela CPU do CLP. Na Figura 21 é mostrada a CPU modelo 1244 e o de módulos de extensão digitais e analógicos da linha S7-1200, fontes de alimentações extensão ethernet.

Figura 21 - Módulos da CPU e módulos analógicos e digitais Siemens S7-1200.

Fonte: Autor da tese (2018).

4.3 Racks e Paineis de Controle

Montou-se o novo sistema de controle desenvolvido em um *rack* de 19 polegadas, padrão de mercado, no qual estão incluídas 2 (duas) Interfaces Homem-Máquina (IHM), botoeiras de controle e sinalizadores dentre outros equipamentos, tais como medidores de vácuo, CPU, geradores de varredura e demais periféricos, mostrados na Figura 22.

Figura 22 – *Rack* do sistema de controle automatizado desenvolvido.

Fonte: Autor da tese (2018).

4.4 Motor de passo e módulos eletrônicos para controle do motor

Os motores de passo utilizados em todos os dispositivos foram especificados pela empresa fornecedora Kalatec Automação, considerando as características mecânicas dos dispositivos a serem acionados. Especificou-se um único modelo de motor, com potenciômetro de controle de feixe, que atendia a todas as aplicações deste desenvolvimento, fabricado pela empresa *Applied Motion Products*, representada no Brasil pela Kalatec Automação. O motor utiliza alimentação elétrica de 13,2 VDC, 0,6 A e fornece um torque de 0,80 Nm. A Figura 23 mostra uma imagem do motor de passo utilizado. Suas dimensões são 56,5 mm de altura (A); 56,5 mm de largura (L); e 50 mm de profundidade (P). O eixo de acionamento tem diâmetro de 6,35 mm.

Figura 23 – Motor de passo utilizado da empresa *Applied Motion Products*.

Fonte: Autor da tese (2018).

Para controle de deslocamento dos motores de passo foram utilizados módulos eletrônicos programáveis da empresa *Applied Motion Products* modelo 1240i, sendo 1 (um) motor de passo com o respectivo módulo eletrônico interligado ao controle central. Na Figura 24 observa-se o módulo de controle do motor de passo (APPLIED MOTION PRODUCTS, 2009).

Figura 24 – Módulo eletrônico de controle do motor de passo modelo 1240i da empresa *Applied Motion Products*.

Fonte: Autor da tese (2018).

Cada módulo eletrônico controla um motor de passo e permite que seja realizada uma programação de movimentos de acordo com a necessidade da aplicação. Esse módulo pode ser integrado a outros equipamentos, recebendo e enviando comandos e informações sobre o posicionamento do motor controlado por ele. Neste projeto, cada módulo de controle de motor foi interligado ao CLP, que realiza o controle centralizado de toda a automação do sistema (APPLIED MOTION PRODUCTS, 2008).

4.5 Materiais elétricos e mecânicos diversos

Foram utilizados diferentes materiais para construção mecânica, tais como chapas e tubos de aço inoxidável, perfis e blocos de alumínio e de latão, placas de PVC, mantas de borracha, elementos de fixação (porcas, parafusos e arruelas) e adesivos, entre outros materiais. Para fazer os circuitos elétricos foram utilizados diversos componentes, tais como disjuntores, interruptores, cabos e fontes de alimentação elétrica, gabinete e painel elétrico, entre outros.

4.6 Notebook para programação e estação de operação

Para realizar as funções de terminal de programação e estação de operação do sistema de ensaios de estanqueidade utilizou-se um microcomputador portátil tipo *notebook* conectado por meio de interface serial aos demais equipamentos eletrônicos durante sua utilização.

O *notebook* utilizado foi da série I5, com frequência de *clock* de 533 MHz, tela de cristal líquido de 15,4 polegadas e resolução máxima de 1280 x 800 *pixels*, e 16 milhões de cores. Possui dimensões de 357 mm de largura; 271 mm de profundidade; e 39 mm de altura, com quatro portas USB. Na Figura 25, observa-se o *notebook* utilizado na programação, o qual pode ser empregado na operação do Acelerador Industrial de Elétrons Dynamitron®, modelo DC1500/25/4, caso a IHM no *rack* do sistema de controle desenvolvido apresente falha (Figura 22). Por meio do *notebook* é possível transferir para a IHM todo o software de supervisão do sistema automatizado do acelerador de elétrons.

Figura 25 – *Notebook* utilizado como estação de operação e programação do Acelerador de Elétrons Dynamitron® DC1500/25/4 do IPEN-CNEN/SP.

Fonte: Autor da tese (2018).

4.7 Programas e aplicativos utilizados no desenvolvimento do sistema automatizado

Foram utilizados três diferentes programas aplicativos para este desenvolvimento. Todos os três foram executados no mesmo *notebook*, utilizado como terminal de programação e como estação de operação, juntamente com o sistema operacional Windows 7 Professional.

4.8 Aplicativo para programação do CLP

Para realizar a programação do Controlador Lógico Programável (CLP) utilizou-se o aplicativo TIA Siemens S7, direcionado para os CLPs da série S7-1200, neste projeto. A programação do CLP é responsável pelo controle de todas as operações automatizadas, sendo armazenada e executada na CPU do sistema (1214C DC/DC/DC). O modo de edição utilizado no aplicativo TIA Simatic Step S7 foi a representação *Ladder Logic*, por utilizar simbologia simples e de fácil aplicação. Na figura 25, observa-se uma imagem da tela gráfica do aplicativo TIA Siemens Step7 V11.

Figura 26 – Tela gráfica do aplicativo TIA V11 da Siemens.

Fonte: Autor da tese (2018).

4.9 Aplicativo de programação dos módulos de controle dos motores

O aplicativo utilizado para programação dos módulos eletrônicos de controle dos motores de passo é o Si Programmer V2.5.7, fornecido pela empresa *Applied Motion Products*, juntamente com os módulo eletrônicos e motores de passo utilizados. Instalou-se o aplicativo no *notebook*, também utilizado como estação de operação. Por meio desse aplicativo é possível ajustar diversos parâmetros do funcionamento do motor, tais como velocidade, sentido de giro, distância a ser percorrida, corrente máxima, entre outros. Na Figura 27 é mostrada a tela gráfica do aplicativo.

Figura 27 – Tela gráfica do aplicativo Si Programmer V2.5.7 da empresa *Applied Motion Products*.

Fonte: Autor da tese (2018).

4.10 Aplicativo de programação da interface gráfica da estação de operação

Para desenvolver a interface gráfica de interação entre o operador e o controle computadorizado, utilizou-se um aplicativo configurável, permitindo programar graficamente os diversos comandos operacionais a serem realizadas durante o ensaio de estanqueidade. O programa utilizado para essa finalidade foi o Indusoft Web Studio V7.1.

O InduSoft Web Studio (ou IWS) é uma poderosa ferramenta que explora as funcionalidades dos sistemas operacionais Microsoft e permite construir aplicações completas SCADA (Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados) ou IHM para a indústria de automação. Na Figura 28 é mostrada a tela de programação do aplicativo Indusoft Web Studio V7.1 (INDUSOFT, 2011).

Figura 28 – Tela gráfica do aplicativo Indusoft Web Studio V7.1

Fonte: Autor da tese (2018).

5 RESULTADOS, PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS E DESENVOLVIMENTO

Para a obtenção de resultados, procedimentos operacionais e no desenvolvimento de hardware e software, para contar com confiabilidade na execução no processo de automação industrial do acelerador, como objetivo de aumentar a eficiência em inovação tecnológica, foram estudados vários manuais e livros técnicos para aprimoramento da técnica em automação (CIPELLI; SANDRINI, 1985; INDUSOFT, 2011; HART, 2012).

O Acelerador de Elétrons Dynamitron® projetado e construído pela *RDI – Radiation Dynamics Inc.*, representa um avançado estado da arte em aceleradores de elétrons. O equipamento Dynamitron®, série JOB 188 instalado em 1978 no IPEN-CNEN/SP atua com energia de 1,5 MeV, corrente de 25 mA e potência de 37,5 kW, com varredura de feixe que varia de 60 cm a 120 cm, cujas características são listadas da forma:

- a) Painel oscilador - Transforma 440 V (sistema de alimentação de energia do IPEN-CNEN/SP) para até 10.000 Volts, com frequência de 100 kHz, sendo conectado ao vaso de pressão;
- b) Vaso de pressão - Há um circuito ressonante eletrônico (grande porte) por onde entra uma tensão de até 10.000 V (100 kHz) gerada pelo painel oscilador e transformada numa ordem de tensão de 1,5 milhão quinhentos mil Volts (1.500 kV) de corrente contínua DC (multiplicadores de tensão Crockroft-Walton);
- c) Tensão dentro do vaso é muito alta - Utiliza-se um gás isolante, o hexafluoreto de enxofre (SF₆) para isolamento elétrica;
- d) Tensão gerada no vaso de pressão de até 1.500 kV DC - Polariza-se o tubo de aceleração (*beam tube assembly*), onde se determina a energia de penetração do feixe de elétrons (polarizando o tubo de aceleração com 1.500 kV obtém-se a energia de 1,5 MeV);
- e) Polarização do filamento - Extrai-se a tensão de 0 V a 8,2 V da alta tensão (gerada no vaso de pressão) e polariza-se o filamento de tungstênio, cujo aquecimento gera a corrente de feixe do Acelerador de Elétrons Dynamitron®, série JOB 188, do IPEN-CNEN/SP, no valor máximo de 25 mA;

- f) Sistema de varredura (*optic and scan system*) - Contém várias bobinas para ajustar, centralizar e varrer o feixe de elétrons de 60 cm a 120 cm. As bobinas são polarizadas com certa tensão/freqüência, quando se determina a freqüência de varredura, que é de 100 Hz;
- g) Sistema de vácuo no Dynamitron®, série JOB 188 - Utiliza-se uma bomba mecânica, uma difusora e outros periféricos no sistema de vácuo, até 10^{-7} Torr. Permanecem em vácuo o filamento, a parte interna do tubo de aceleração e o sistema de varredura (*scan horn*), por meio de uma janela de titânio;
- h) Sistema de controle no Dynamitron®, série JOB 188 - Todo o controle é feito por meio de sistemas e sinais analógicos de controle, propondo-se um novo controle com avançado estado da arte em automação, utilizando-se CLPs de última geração; e
- i) Sistema de segurança – Segue padrões internacionais e normas da CNEN. Utilizam-se *interlocks* (*microswitchs* nas portas e acesso ao acelerador de elétrons), fotocélulas, tapetes capacitivos e também detectores de radiação, tudo controlado por microcomputadores e circuito fechado de TV.

5.1 Desenvolvimento operacional

Para o desenvolvimento técnico-científico foi criado um software operacional e uma IHM, permitindo o trabalho em condições automatizadas. O desenvolvimento inclui um projeto PLC e o software correlato. O projeto baseou-se, anteriormente, em fluxogramas de gerenciamento de energia. Na Figura 29 é mostrado o Fluxograma I, que é a distribuição do sistema de potência elétrica do acelerador e periféricos.

Figura 29 – Fluxograma I do Sistema de Potência do Acelerador de Elétrons

Fonte: Autor da tese (2018).

No Fluxograma II (Figura 30), segue-se a lógica de funcionamento e controle de todos os sistemas interligados com o sistema de automatização.

5.2 Diagrama e seqüência do processo

O esquema da Figura 31 corresponde ao processo tanto no desenvolvimento dos circuitos eletroeletrônicos como no processo para desenvolver o software para seu funcionamento.

O painel oscilador recebe alimentação através de um disjuntor de porta do painel, que é então distribuída para vários circuitos via transformadores. Os transformadores fornecem a potência de funcionamento para o arrefecimento e para motores, ventiladores, circuitos de detecção de falhas e circuito de alimentação do oscilador.

A função principal da montagem de oscilador é a geração de uma tensão de saída RF para utilização nos componentes do acelerador a fim de gerar alta tensão com baixa corrente. Os circuitos de geração de voltagem de RF consistem de uma fonte de alimentação para o triodo. O triodo no oscilador gera saída de RF de 125 kHz no sistema. A amplitude da voltagem de RF a ser gerada é dependente de um sinal (4 mA a 20 mA) a partir do sistema de controle desenvolvido neste trabalho. O CLP compara a saída de alta tensão real com o valor nominal da tensão introduzido no sistema pelo operador e ajusta a tensão de saída. No painel oscilador, há um trocador de calor e ventiladores para evitar que os componentes do painel sofram superaquecimento. O sistema de refrigeração é basicamente um circuito de água tanto para o triodo como para o painel, responsável pelo arrefecimento.

O gerador de alta tensão está localizado dentro do vaso de pressão, que contém os componentes do conjunto do acelerador, onde há duas secções, horizontais e verticais, ligadas. Há também um tubo de aceleração do feixe, que gera a energia e saída do feixe (já localizada na sala de irradiação). Exceto o interior do tubo de feixe, que está em vácuo, todo o interior do vaso de pressão do acelerador é preenchido com gás SF₆ (hexafluoreto de enxofre) para suprimir faíscas e permitir campos elétricos mais fortes.

O vaso de pressão contém um transformador de RF usado para transferência de energia de RF a partir do triodo para uma cadeia longa de unidades de módulos retificadores no interior do recipiente. As unidades de módulo retificador (diodos) estão dispostas de tal modo que cada conjunto pode produzir até 50.000 V com a saída, dependendo do número de conjuntos de

retificador empregados no sistema. No caso desta pesquisa são 30 módulos retificadores.

Os anéis de corona estão conectados aos módulos retificadores para fornecer e transmitir a tensão de RF para cada retificador. A tensão contínua de saída combinada a partir de todos os conjuntos dos retificadores vai para um terminal de alta tensão ligado à extremidade de alta voltagem do tubo de feixe. Há uma longa seqüência de resistências entre o terminal de alta tensão ao terra elétrico, servindo como um divisor de tensão alta (DAT), onde esta corrente pode ser controlada dando uma indicação da alta voltagem presente.

O transformador de RF no recipiente é arrefecido por um trocador de calor circular, abastecido com água gelada, estando os motores dos ventiladores localizados no vaso de pressão para arrefecer os componentes e fazer circular o gás SF₆ (hexafluoreto de enxofre).

O tubo de feixe é um canhão de elétrons que conduz elétrons do terminal de alta tensão para a terra. Os elétrons a partir do terminal de alta-tensão são emitidos a um ritmo constante com base na temperatura do filamento quente na extremidade de alta tensão. Os elétrons seguindo esse caminho dentro do tubo de feixe são acelerados e formam um feixe estreito e focalizado de baixa corrente, energia de alta tensão que passa para a óptica (bobinas elétricas), para varrer o feixe e digitalizar a imagem do feixe. O feixe divisor da corrente do tubo de aceleração (DCTA) é formado pelos resistores que ajudam na aceleração de elétrons dentro do tubo de aceleração e também fornecem um ponto de medição de corrente tubo de feixe.

Dois monitores ópticos (para detecção do arco elétrico) são montados em áreas críticas do vaso de pressão do acelerador a fim de detectar faíscas e assim permitir o desligamento da alta tensão rapidamente para evitar danos aos componentes dos vasos.

Muitas das ligações elétricas e de controle para e a partir do vaso de pressão do acelerador são feitos por meio de uma caixa de junção de RF ligada ao lado do vaso de pressão. A caixa também contém componentes de circuitos que suportam a geração de feixe e fazem o monitoramento de falhas com um detector de arco elétrico para monitorar o transformador de RF.

Figura 31 – Esquema do processo elétrico do acelerador

Fonte: Autor da tese (2018).

No esquema eletrônico, mostrado na Figura 32 foi desenvolvido um sistema de disparo para controlar os tiristores (SCRs), para o sistema oscilador de tensão controlada de 0 V a 10.000 V com freqüência de 100 kHz, que por sua vez controla o gerador de alta tensão dentro do vaso de pressão de 0 a 1.500 kV (1,5 MeV), conforme esquema básico mostrado na Figura 33.

O desenvolvimento da placa de controle e disparo dos tiristores (SCRs) foi elaborado com muitos detalhes técnicos, envolvendo conversão é normalmente de AC ↔ DC/ AC ↔ AC / DC ↔ DC / AC ↔ AC, na finalidade de controlar são tensão, corrente e freqüência. A eletrônica de potência tem como sua principal finalidade processar e controlar o fluxo de tensão, corrente, freqüência elétrica, na utilização de dispositivos semicondutores (tiristores (SCRs), diodos e transistores) operando como chaveadores eletrônicos de controle, para realizar o controle do fluxo de energia elétrica e a conversão de formas de onda de tensões e correntes entre fontes e cargas (HART, 2012; IDOETA; CAPUANO, 1993; SANTOS, 2012).

Figura 32 – Circuito eletrônico de controle de disparo de tiristores (SCRs).

Fonte: Autor da tese (2018).

Figura 33 – Circuito de disparo dos Tiristores (SCRs).

Fonte: Autor da tese (2018).

Na Figura 34, é mostrado o esquema básico do multiplicador de tensão equivalente instalado no acelerador entrada de 0 V a 10.000 V – com a frequência de 100 kHz, no final do circuito tem uma bobina para filtrar o AC (100 kHz) para 1.632 kV DC.

Figura 34 – Esquema básico do gerador de alta tensão (1.632 kV).

Fonte: Autor da tese (2018).

Na Tabela 1 é apresentada a distribuição de tensões, corrente e tensão do triodo, correntes de realimentação no acelerador utilizado para projeto de um simulador para o desenvolvimento de hardware e software para o sistema automatizado do acelerador de elétrons, com sistema de varredura de 100 cm.

Descrição das colunas apresentadas na Tabela 1.

- ✓ Coluna 1 - Realimentação da alta tensão (μA);
- ✓ Coluna 2 - Energia do feixe de elétrons do acelerador (MeV);
- ✓ Coluna 3 - Corrente de feixe (mA);
- ✓ Colunas 4, 5 e 6 - Tensão de alimentação trifásica (V);
- ✓ Colunas 7, 8 e 9 - Corrente de fases RST (A);
- ✓ Coluna 10 - Tensão no anodo do triodo (kV);
- ✓ Coluna 11 - Corrente no anodo do triodo (A); e
- ✓ Coluna 12 - Corrente total no gerador de alta tensão (mA).

Tabela 1 – Tensões e correntes elétricas do Acelerador de Elétrons JOB 188 do IPEN-CNEN/SP.

Corrente HV (μA)	Energia (MeV)	Corrente (mA)	Tensão Fases RS (V)	Tensão Fases RT (V)	Tensão Fases ST (V)	Corrente Fase R (A)	Corrente Fase S (A)	Corrente Fase T (A)	Tensão HV Anodo (kV)	Corrente Anodo (A)	Corrente Total Gerador HV (mA)
0	0	0	437	440	441	12,6	5,7	6,4	0	0	0
12,4	0,2	0	437	440	441	15,1	6,6	9,5	0,9	0,18	0
18,7	0,3	0	437	440	441	16,6	7,6	11,5	1,33	0,28	0
25,2	0,4	0	437	440	441	18,1	8,9	13,5	1,78	0,39	0
31,9	0,5	0	437	440	441	19,7	10,2	15,4	2,18	0,49	0
38,7	0,6	0	437	438	440	20,9	11,9	17,2	2,62	0,59	0
38,7	0,6	1	436	437	439	25,3	16,0	22,6	3,00	0,89	1,31
38,7	0,6	2,5	435	437	439	30,1	20,1	28,5	3,26	1,21	2,88
38,7	0,6	5	435	435	438	36,6	28,1	37,4	3,65	1,70	5,48
49,4	0,75	0	436	437	439	23,5	14,3	20,6	3,28	0,75	0,19
49,4	0,75	1	436	437	438	27,2	18,8	25,7	3,67	1,05	1,34
49,4	0,75	2,5	436	437	438	32,7	23,8	31,7	3,99	1,39	2,85
49,4	0,75	5	435	437	438	39,6	31,1	40,7	4,36	1,89	5,42
49,4	0,75	10	434	436	436	57,7	47,9	60,1	4,96	2,84	10,6
68,2	1	0	435	436	438	26,3	19,1	25,7	4,43	1,02	0,23
68,2	1	1	435	437	438	31,4	23,4	30,8	4,82	1,31	1,38
68,2	1	2,5	435	437	438	36,4	27,9	36,4	5,13	1,65	2,83
68,2	1	5	435	435	437	45,1	36,4	46,0	5,55	2,21	5,44
68,2	1	10	432	434	435	63,4	54,2	68,6	6,12	3,17	10,4
88,2	1,25	0	434	436	437	30,1	23,6	30,3	5,62	1,29	0,32
88,2	1,25	1	434	436	437	34,1	27,8	34,5	6,00	1,55	1,30
88,2	1,25	2,5	433	434	435	41,1	33,2	42,2	6,33	1,93	2,85
88,2	1,25	5	433	434	434	50,4	41,9	53,2	6,76	2,50	5,52
88,2	1,25	10	430	432	432	68,5	59,1	74,1	7,40	3,50	10,7
88,2	1,25	15	430	431	432	87,2	72,8	92,1	7,92	4,43	15,6
109,3	1,50	0	432	434	435	33,3	29,0	34,9	6,82	1,55	0,40
109,3	1,50	1	433	432	434	37,6	32,9	39,0	7,17	1,77	1,40
109,3	1,50	2,5	431	432	434	44,4	37,7	47,3	7,56	2,18	3,00
109,3	1,50	5	432	432	433	53,9	46,1	59,1	7,98	2,73	5,52
109,3	1,50	10	432	432	433	74,3	61,1	81,6	8,67	3,80	10,6
109,3	1,50	15	429	431	433	91,2	76,5	98,4	9,17	4,75	15,8

Fonte: Autor da tese (2018).

5.3 Desenvolvimentos do processo de automação do sistema de controle

As fases de desenvolvimento do processo de automação, dos estudos bibliográficos em sistemas de potência e da utilização dos softwares de simulação de circuitos eletroeletrônicos permitem eleger parâmetros já avaliados e qualificados:

- ✓ Hardware – Microcomputador; CLP; *drivers* de comunicação; motores de passo; sensores; interfaces de comunicação; e desenvolvimento e projetos de dispositivos eletroeletrônicos, pneumáticos, mecânicos e circuitos eletrônicos;
- ✓ Software e otimização do sistema de controle operacional – Programação dos *drivers* de controle dos sistemas de vácuo e de varredura do feixe de elétrons; programação do CLP Step S7 1200, da empresa Siemens; e programação do supervisório ou IHM Web Studio 7.0 da empresa Indusoft; e
- ✓ Testes de funcionamento – No processo de automação do acelerador de elétrons Dynamitron® ® DC1500/25/4, conforme normas de segurança da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN-NN-6.02 – Licenciamento de Instalações Radiativas e CNEN-NN-3.01 – Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica), e boas práticas de fabricação (BPF).

5.4 Desenvolvimento da placa conversora de sinais

Utilizando uma placa eletrônica conversora de sinais analógicos, os sinais que entrarem, em valores não comerciais, serão espelhamentos na saída com os valores comerciais encontrados em CLPs.

A essencialidade no desenvolvimento da placa eletrônica são os sinais gerados dentro do vaso de pressão (Figura 35), na qual os valores de tensão chegam a 1.635 kV, para serem controlados.

Os sinais são as correntes de realimentações dos módulos retificadores para gerar a alta tensão, tubo de aceleração, corrente de feixe, identificados no projeto:

- ✓ DCT - Sinal do divisor de corrente total;

No Gráfico da Figura 36 observa-se a relação entre a tensão de controle original do acelerador analógico com a tensão do módulo analógico do CLP S7-1200.

Figura 36 – Relação das tensões de controle (original/CLP).

Fonte: Autor da tese (2018).

A Tabela 2 mostra levantamento e teste comparando a elevação da alta tensão (energia) sem corrente de feixe com a placa analógica e com controle via CLP no próprio acelerador de elétrons para conhecer a repetibilidade e eficiência para elaboração do software de controle.

Descrição das colunas apresentadas na Tabela 2:

- ✓ Coluna 1 - Energia (MeV);
- ✓ Coluna 2 - Corrente da alta tensão (μA);
- ✓ Coluna 3 - Corrente no tubo de aceleração (μA);
- ✓ Coluna 4 - Corrente total no gerador da alta tensão (mA);
- ✓ Coluna 5 - Alta tensão (kV);
- ✓ Coluna 6 - Tensão de controle do acelerador para gerar alta tensão (V);

- ✓ Coluna 7 - Tensão de controle automatizado para gerar a mesma energia e alta tensão (V); e
- ✓ Coluna 9 - Diferença entre tensão de controle (analógico original) com o controle via CLP (software do módulo analógico) em Volts.

Tabela 2 – Teste no controle da alta tensão do Acelerador de Elétrons JOB 188 do IPEN-CNEN/SP.

Energia (MeV)	Corrente de Retorno da Alta Tensão (μA)	Corrente do Tubo de Aceleração (μA)	Corrente Total (mA)	Alta Tensão (kV)	Tensão Controle Original (V)	Tensão de Controle do CLP (V)	Diferença (V)
0,20	12,4	27	0,03 - 0,04	199 - 200	0,301	0,298	0,003
0,30	18,7	42	0,05 - 0,06	301 - 302	0,433	0,428	0,005
0,40	25,2	58 - 59	0,07 - 0,08	405 - 406	0,566	0,559	0,007
0,50	31,9	76	0,10 - 0,11	512 - 513	0,700	0,691	0,009
0,60	38,7	94	0,12 - 0,13	621	0,834	0,823	0,011
0,70	45,8	113	0,15 - 0,16	735 - 736	0,972	0,957	0,015
0,80	53,1	133	0,17 - 0,18	852 - 853	1,111	1,094	0,017
0,90	60,5	153	0,20 - 0,21	970 - 971	1,248	1,228	0,020
1,00	68,2	174	0,23 - 0,24	1095 - 1096	1,389	1,368	0,021
1,10	76,0	196	0,26 - 0,27	1220 - 1221	1,530	1,505	0,025
1,20	84,1	218	0,30 - 0,31	1350 - 1351	1,668	1,642	0,026
1,30	92,3	241	0,33 - 0,34	1480 - 1481	1,811	1,780	0,031
1,40	100,7	265	0,36 - 0,37	1614 - 1615	1,955	1,917	0,038
1,50	109,3	289	0,39 - 0,40	1752 - 1753	2,099	2,058	0,041
1,51	110,2	291 - 292	0,39 - 0,40	1769 - 1770	2,116	2,073	0,043
1,52	111,1	294	0,40 - 0,41	1786 - 1787	2,130	2,087	0,043
1,53	111,9	296 - 297	0,40 - 0,41	1797 - 1798	2,141	2,099	0,042
1,54	112,8	299	0,41	1812	2,154	2,112	0,042

Nota: Acelerador de elétrons RDI Dynamitron® DC/1500/25/4 - JOB 188 (IPEN-CNEN/SP). Corrente de feixe em 0 mA.
 Fonte: Autor da tese (2018).

Foi desenvolvido, como mostrado na Figura 37, um protótipo com as simulações desses sinais, que é de grande valia no desenvolvimento de interfaces de hardware e software para novos sistemas automatizados.

O projeto em resumo consiste em “espelhar” nas 4 saídas o conteúdo das 4 entradas mantendo as proporções e respectivas grandezas.

A alimentação da placa é de 24 VDC. A placa possui um filtro passa-baixa de Ordem 1 ajustável via trimpot (potenciômetro miniatura ajustável), com frequência de corte de 80 kHz a 160 kHz.

Entradas analógicas – a placa eletrônica possui 4 entradas analógicas:

- 0 uA a 160 uA DC;
- 0 uA a 400 uA DC;
- 0 uA a 200 uA DC; e
- 0 uA a 100 mA DC.

Saídas analógicas – a placa eletrônica possui 2 saídas analógicas por entrada analógica:

- 0 V a 10 V DC| 4 a 20 mA;
- 0 V a 10 V DC| 4 a 20 mA;
- 0 V a 10 V DC| 4 a 20 mA; e
- 0 V a 10 V DC| 4 a 20 mA.

Figura 37 – Placa conversora de sinais

Fonte: Autor da tese (2018).

A listagem dos componentes numerados na placa eletrônica mostrada na Figura 37:

- 1 Borne de alimentação (24 VDC);
- 2 Trimpot de ajuste do filtro no bloco (0 mA a 100mA);
- 3 Conector BNC para entrada do sinal no bloco (0 mA a 100mA);
- 4 Trimpot de ajuste do filtro no bloco (0 uA a 400 uA);
- 5 Conector BNC para entrada do sinal no bloco (0 uA a 400 uA);
- 6 Trimpot de ajuste do filtro no bloco (0 uA a 200 uA);
- 7 Conector BNC para entrada do sinal do bloco (0 uA a 200 uA);
- 8 Trimpot de ajuste do filtro no bloco (0 uA a 160 uA);
- 9 Conector BNC para entrada do sinal no bloco (0 uA a 160 uA);
- 10 Conector BNC de saída (4 mA a 20 mA) relacionado ao bloco (0 mA a 100 mA);
- 11 Conector BNC de saída (0 V a 10 V) relacionado ao bloco (0 mA a 100 mA);
- 12 Borne de saída (4 mA a 20 mA) relacionado ao bloco (0 mA a 100mA);
- 13 Borne de saída (0 V a 10 V) relacionado ao bloco (0 mA a 100 mA);
- 14 Conector BNC de saída (4 mA a 20 mA) relacionado ao bloco (0 uA a 400 uA);
- 15 Conector BNC de saída (0 V a 10 V) relacionado ao bloco (0 uA a 400 uA);
- 16 Borne de saída (4 mA a 20 mA) relacionado ao bloco (0 uA a 400 uA);
- 17 Borne de saída (0 V a 10 V) relacionado ao bloco (0 uA a 400 uA);
- 18 Conector BNC de saída (4 mA a 20 mA) relacionado ao bloco (0 uA a 200 uA);
- 19 Conector BNC de saída (0 V a 10 V) relacionado ao bloco (0 uA a 200 uA);
- 20 Borne de saída (4 mA a 20 mA) relacionado ao bloco (0 uA a 200 uA);
- 21 Borne de saída (0 V a 10 V) relacionado ao bloco (0 uA a 200 uA);
- 22 Conector BNC de saída (4 mA a 20 mA) relacionado ao bloco (0 uA a 160 uA);
- 23 Conector BNC de saída (0 V a 10 V) relacionado ao bloco (0 uA a 160 uA);
- 24 Borne de saída (4 mA a 20 mA) relacionado ao bloco (0 uA a 160 uA); e
- 25 Borne de saída (0 V a 10 V) relacionado ao bloco (0 uA a 160 uA).

O projeto mostrado na Figura 38 exige bastante precisão nos resistores utilizados, que fogem dos valores comerciais.

Todos os pontos da placa estão identificados na própria serigrafia, visando tornar fácil a identificação e utilização como exemplificado na Figura 36.

As entradas estão disponíveis via conector BNC (Interno positivo) e as saídas estão disponíveis via conector BNC assim como também via bornes.

Figura 38 – Identificação e precisão dos componentes da placa de sinais.

Fonte: Autor da tese (2018).

5.4.1 Esquemática do projeto

No projeto do hardware da placa conversora de sinais, houve um estudo rigoroso no desenvolvimento em eletrônica analógica e digital (HART, 2012; IDOETA; CAPUANO, 1993).

Para chegar aos valores desejados, normalmente usam-se trimpots, no entanto sua utilização pode tornar-se um problema futuro devido a desajustes acidentais e indesejados, desregulando a eletrônica.

A solução foi a utilização de vários resistores em cada ponto, para que pudessem ser associados de modo a obter uma resistência equivalente à desejada em cada ponto.

5.4.2 Esquema elétrico da placa conversora de sinais

No circuito da placa conversora de sinais mostrado na Figura 39 (bloco 0 mA a 100mA), e onde se converte o sinal EB – Feixe de elétrons (gerado no filamento) e o sinal DCT é do divisor de corrente total do acelerador convertendo a corrente de entrada 0 mA a 100 mA, gerada nos módulos retificadores do acelerador dentro no vaso de pressão do acelerador de elétrons, com a saídas de em 0 V a 10 V e de 4 mA a 20 mA, a serem conectadas no módulos analógicos do CLP, para serem processadas e analisadas para o sistema de automação.

Figura 39 – Circuito conversor de corrente 0 mA a 100 mA.

Fonte: Autor da tese (2018).

No circuito da placa conversora de sinais (Figura 40) (bloco 0 – 400 μ A), e onde se converte o sinal DCTA divisor de corrente do tubo de aceleração convertendo a corrente de entrada 0 a 400 μ A, gerada no tudo de aceleração do acelerador, dentro do vaso de pressão de 0 V a 10 V e de 4 mA a 20 mA, a serem conectadas no módulos analógicos do CLP, para serem processadas e analisadas para o sistema de automação

Figura 40 – Circuito conversor de corrente 0 μ A a 400 μ A.

Fonte: Autor da tese (2018).

No circuito da placa conversora de sinais mostrado na Figura 41 (0 μA a 160 μA), e onde se converte o sinal DAT divisor de alta tensão convertendo a corrente de entrada 0 a 160 μA , gerada no *shunt* de resistores da alta tensão dentro do vaso de pressão em 0 V a 10 V e de 4 mA a 20 mA, que será ligada num dos módulo analógico do CLP, para serem processadas e analisadas para o sistema de automação.

Figura 41– Circuito conversor de corrente 0 μA a 160 μA .

Fonte: Autor da tese (2018).

No circuito da placa conversora de sinais mostrado na Figura 41 (bloco 0 μA a 200 μA), e onde se converte o sinal DCT é do divisor de corrente total e DCF divisor de corrente do feixe de elétrons convertendo a corrente de entrada 0 a 200 μA , gerada nos resistores de shunt da alta tensão dentro do vaso de pressão em 0 V a 10 V e de 4 mA a 20 mA, que será ligada num dos módulo analógico do CLP, para serem processadas e analisadas para o sistema de automação.

Com o conversor funcionando por meio do software no CLP, a conversão dos sinais consegue-se medir e converter uma corrente de corona e descarga fria (correntes espúrias dentro do vaso de pressão na geração da alta tensão), com essa análise e medição conseguiu-se determinar a estabilidade das correntes e tensões dentro do vaso de pressão, nesse módulo com o processamento no CLP, se houver uma variação de 5% (programado) entre as tensão e correntes corretas com as medidas a máquina detecta um erro de operação desliga automaticamente a alta tensão e informa a instabilidade ocorrida.

Figura 42– Circuito conversor de corrente 0 μA a 200 μA .

Fonte: Autor da tese (2018).

5.4.3 Filtro passa-baixa (ordem 1)

Para obter um sinal mais estável nas entradas de sinais vindos do acelerador, na placa conversora de sinais foi construído um filtro passa-baixa de ordem 1 com frequência de corte ajustável via trimpot de 80 kHz a 160 kHz. Vale lembrar que o FPB de ordem 1 atenua apenas -6dB por oitava, mostrado no gráfico da Figura 43.

Figura 43 – Curva do filtro passa-baixa 80 kHz a 160 kHz.

Fonte: Autor da tese (2018).

O cálculo da frequência de corte é definido pela Equação 5:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5)$$

Cada módulo do circuito da placa conversora de sinais, na entrada das correntes elétricas vindas do vaso de pressão, possui filtro independente, sendo que cada um tem trimpot para ajuste da frequência de corte (Figura 44).

Figura 44 – Placa conversora de sinal (filtro passa-baixa)

Fonte: Autor da tese (2018).

5.5 Desenvolvimento do sistema de vácuo

Na Figura 45, está mostrando a integração do sistema de vácuo do acelerador com o sistema de controle automatizado. A função dessa integração é que o controlador lógico programável, através de suas entradas e saídas analógicas e digitais, executa as funções de fazer o vácuo dentro do tubo de aceleração e também no sistema de varredura, sendo assim nenhum contato manual evitando algum acidente num procedimento que poderá causar, a implosão na janela de titânio, que separa a região interna em vácuo com meio ambiente.

Figura 47 – Diagrama do processo de realimentação do sistema de varredura.

Fonte: Autor da tese (2018).

O funcionamento do sistema de varredura está diretamente ligado à energia do acelerador, para ter certificação da dose, foi preciso fazer uma dosimetria do acelerador e testar a confiabilidade do sistema desenvolvido, sendo utilizados dados de energia em MeV, relacionando as correntes de alimentação conforme Tabela 2 (tópico 5.4), para desenvolvimento do software e também da dosimetria, conforme Figura 48 (curva do feixe) e Figura 49 (certificado de dosimetria do feixe, sendo a curva analisada com espectrofotômetro) (CAPUANO, 1993; SANTOS, 2012).

Figura 48 – Curva da dosimetria do feixe de elétrons (Energia x varredura)

Fonte: Autor da tese (2018).

Figura 49 – Certificado de dosimetria

GOVERNO FEDERAL Ministério da
Ciência, Tecnologia, Inovações e
Comunicações

São Paulo, 05 de Outubro de 2018

CERTIFICADO DE DOSIMETRIA

Certificado: LDPJ - EB - 001/2018

Solicitação: Medidas de dose em Alaninas irradiadas

Instalação Radiativa: Acelerador de Elétrons
E = 1,5 MeV
I = 1,26 mA
Dose/passada = 5 kGy
V da bandeja = 2m/min

Dosímetro: Alanina Pellet Lote Aêrial 05/05

Equipamento: Espectrômetro de Ressonância Paramagnética Eletrônica (EPR), Miniscope MS 400, microprocessado em ambiente windows e com software AeEDE para leitura de sinais do EPR e parâmetros que são automaticamente salvos em um Banco de Dados para fins de Calibração e Cálculo de Dose.

Solicitante: Samir Luiz Somessari
CTR-IPEN-CNEN/SP

Doses Solicitadas (kGy)	Dosímetros	Temperatura (°C)	Dose ¹ (kGy) medida	Dose na superfície (kGy)	Dose Média (kGy) na superfície
5	1	32,5	6,72	5,05	5,04
	2		6,71	5,05	
	3		6,69	5,03	
	4		6,70	5,04	
10	1	35,0	13,40	10,06	9,98
	2		13,30	10,00	
	3		13,30	10,00	
	4		13,10	9,85	
25	1	37,5	33,30	25,04	25,47
	2		34,20	25,71	
	3		34,10	25,64	
	4		33,90	25,49	
50	1	42,5	67,30	50,60	50,24
	2		66,60	50,08	
	3		66,90	50,30	
	4		66,50	50,00	
100	1	47,5	135,00	101,50	101,32
	2		134,00	100,75	
	3		134,00	100,75	
	4		136,00	102,26	

¹A Restituibilidade das Medidas da Dose é medida pelas intercomparações, entre Laboratórios de Dosimetria Industrial dos Países Latinoamericanos, patrocinadas e garantidas pela Agência Internacional de Energia Atômica.

MSc. Celia Marina Napolitano
 Pesquisadora Responsável
 Laboratório de Dosimetria em Processos de Irradiação
 Centro de Tecnologia das Radiações

Fonte: Laboratório de Dosimetria em Processos de Irradiação do IPEN-CNEN/SP (2018).

Para elaboração do sistema de varredura, segue o fluxograma do projeto utilizado (Figura 50) e, na Tabela 3, a tensão de controle e ganho para o amplificador de corrente.

Figura 50 – Fluxograma do projeto do sistema de varredura do acelerador de elétrons.

Fonte: Autor da tese (2018).

Tabela 3 – Relação da tensão de controle e ganho do amplificador.

SCAN (%)	V_{1pp} (V)	V_{2pp} (V)	Ganho (V_{2pp} / V_{1pp})
15	0,82	27,5	33,54
20	1,04	35	33,65
30	1,48	50	33,78
40	1,95	64,5	33,08
50	2,40	80	33,33
60	2,80	96	34,29
62,5	2,92	100	34,19
70	3,30	112	33,94
80	3,72	126	33,83
90	4,20	141	33,57
91	4,30	144	33,49
96,1	4,50	152	33,78
100	4,70	157	33,40
Ganho médio			33,68

Fonte: Autor da tese (2018).

5.7 Desenvolvimento para controle de feixe de elétrons

Por meio da geração de alta tensão (Figuras 51 e 52), é retirada uma faixa de -600 V a +600 V num potenciômetro para controlar a corrente de feixe de elétrons. O sistema é montado em uma haste de plástico longa, e para o isolamento de tensão está instalado na secção horizontal dentro do vaso de pressão (gerador de alta tensão), conectando o potenciômetro com o motor de passo. Um motor de passo numa extremidade do eixo recebe sinais do CLP, enquanto um potenciômetro em outra extremidade do eixo de filamentos fornece

energia para aquecer os filamentos para dentro do tubo de aceleração do feixe. Com o motor de passo ligado por meio do CLP, o tubo de aceleração do feixe de elétrons começa a acelerar os elétrons. O operador pode variar a tensão de entrada do motor de passo, o que altera a posição do potenciômetro, por sua vez, do filamento altera a temperatura do filamento de tungstênio no tubo de aceleração em conformidade para controlar a magnitude da corrente do feixe de elétrons. Para ter controle do motor de passo, foram instaladas chaves de fim de curso determinado limites máximos e mínimos da corrente de feixe e também indicando o desligamento da geração do feixe de elétrons.

Figura 51 – Diagrama de instalação dentro do vaso de pressão

Fonte: Autor da tese (2018).

Figura 52 – Diagrama elétrico e controle

Fonte: Manual de treinamento (DPC 2000) IBA Industrial e autor da tese (2018).

5.8 Sistemas de segurança

É importante estar ciente que alguns dos sistemas de controles, incluindo o sistema de controle de redes, sempre permanecem em subtensão. Isso mantém todas as travas do sistema ativadas a menos que seja deliberadamente desligado pelo usuário. Mesmo com o sistema desligado, a energia elétrica ainda está presente em vários dos painéis, incluindo o console de controle.

Quando energizado, o acelerador produz raios X e elétrons, que podem ser letais para o operador ou para pessoas que estejam dentro da sala de irradiação. Com o CLP interligado ao sistema de controle, é necessário sempre se certificar de que todas as travas estão operando normalmente, evitando assim algum acidente.

Para ligar o acelerador, é necessário executar uma seqüência de procedimentos no interior da sala de irradiação e na sala de controle, a fim de acionar um circuito lógico que, por sua vez, libera a ligação do circuito mestre de energização do acelerador.

Este circuito lógico é constituído pelos dispositivos relacionados na forma de:

- Duas botoeiras de pressão (de emergência), localizadas dentro da sala de irradiação e denominadas de Estação 1 e Estação 2 (Figura 53). A disposição das botoeiras é de tal forma que obriga o operador a percorrer toda a sala de irradiação para pressioná-las, certificando-se de que não haja nenhum indivíduo no local;
- Uma chave tipo fim de curso, chamada de Estação 3 (Figura 54), colocada na entrada da sala de irradiação e que é acionada ao ser pendurada sobre ela uma corrente de segurança;
- Três chaves tipo fim de curso, instaladas sobre a porta de acesso à sala de irradiação, comutadas à medida que a porta é fechada. Essas chaves constituem a Estação 4 (Figura 53).

As operações feitas para criar condições de ligar o acelerador de elétrons obedecem a uma ordem de passos descritos na forma:

- Aperta-se a botoeira da Estação 1, começam então a soar os alarmes de alerta no interior da sala de irradiação e na galeria subterrânea;

- Aperta-se a botoeira da Estação 2;
- Coloca-se a corrente de segurança sobre a chave tipo fim de curso na Estação 3; e
- Fecha-se a porta de acesso à sala de irradiação, quando então as chaves tipo fim de curso da Estação 4 são acionadas.

Com esse procedimento executado, a ligação do circuito mestre (diagrama mostrado na Figura 52) é autorizada pelo circuito lógico. Todas essas etapas são indicadas por sinaleiros localizados no painel de segurança na sala de controle.

A energia elétrica do circuito lógico pode ser cortada por uma série de botoeiras de pressão e rearme colocadas na sala de irradiação (Estação 1 e 2), no painel de segurança na sala de controle, na galeria e no piso superior. Ao apertar qualquer dessas botoeiras, todo o procedimento deverá ser reiniciado.

O circuito lógico não se energizará se as operações forem executadas em ordem diferente do procedimento descrito.

Se o circuito lógico estiver totalmente energizado e a porta for aberta, todo o circuito é desligado, obrigando o reinício das operações.

O circuito mestre, após o procedimento correto ter sido executado, recebe a alimentação elétrica no console permitindo assim acionamento dos relês que acionam o acelerador. Na Figura 53 é mostrada a planta da instalação e na Figura 54 o diagrama elétrico do sistema de segurança.

Convém lembrar que no caso de alguma pessoa permanecer na sala de irradiação após o sistema de segurança estar armado, basta pressionar os botões de emergência para abrir a porta, já que há um sistema de abertura por dentro da sala de irradiação. Ao tirar a corrente de segurança de posição, impede-se que o acelerador seja ligado, e, caso esteja energizado, os circuitos se desligam imediatamente aterrando todo o circuito de controle e potência do acelerador.

No interior da sala de irradiação há um monitor de radiação, de forma que, havendo radiação superior a 2mR/h, a abertura da porta de acesso à sala de irradiação é bloqueada.

O sistema descrito foi elaborado para melhorar e aperfeiçoar um sistema de controle do acelerador de elétrons e, para que isso acontecesse, foi feito uma simulação de sinais correspondentes aos sinais de controle, utilizando a tecnologia de automação industrial e preservando os direitos intelectuais no desenvolvimento de hardware e software desse trabalho.

Foi desenvolvida a integração do sistema existente com o novo sistema de controle, proporcionando a execução segura do processo de controle, visando obedecer a todas as normas técnicas de segurança radiológica física dos operadores e também a confiabilidade da operação, que inclui a parte de dosimetria em função da energia, corrente de feixe e outros parâmetros em todo o processo nas diversas etapas.

Paralelamente está sendo desenvolvida a interface gráfica operacional, que permitirá comandar todas as funções automatizadas utilizando telas dedicadas em computador. Uma vez que esses dois itens estejam concluídos, deverá ser realizada a simulação e o aperfeiçoamento do sistema até se atingir uma condição de rotina operacional.

Uma vez que os testes de cada sistema tanto de hardware como de software forem realizados com sucesso, o sistema funcionará de modo integrado, sincronizando todos os parâmetros de máquina.

Está sendo dada ênfase especial à automação e interface homem-máquina (IHM), permitindo a interferência do operador, porém com redução de tarefas manuais.

São utilizados sistemas de automação com CLP da Siemens modelo S7-1200 (Figuras 55 e 56) e sistemas de interface operacional gráfica computadorizada (sistema supervisório Indusoft), mostrado nas Figuras 57, 58 e 59. Estes sistemas atendem totalmente às necessidades deste desenvolvimento.

A lógica de funcionamento dos dispositivos eletrônicos, mecânicos, pneumáticos e outros periféricos desenvolvidos serão testados individualmente e, após a integração entre eles, será realizada a simulação e funcionamento no sistema.

Para garantir um bom funcionamento do sistema automatizado, será feito um trabalho de dosimetria para certificar o processo, funcionamento e confiabilidade do trabalho.

Figura 55 – Software TIA Siemens para programação no CLP

Fonte: Autor da tese (2018).

Figura 56 –Software da lógica de programação

Fonte: Autor da tese (2018).

Figura 57 – Tela de controle IHM do acelerador e monitoração

Fonte: Autor da tese (2018).

Figura 58 – Tela de monitoração de sinais digitais.

Fonte: Autor da tese (2018).

Figura 59 – Tela de monitoração de sinais analógicos.

Fonte: Autor da tese (2018).

5.10 Desenvolvimento do simulador de sinais

Foi feito um protótipo com a simulação desses sinais, que é de grande valia para desenvolver as interfaces de hardware e software para novos sistemas automatizados (Figuras 60, 61, 62 e 63), do simulador de correntes equivalentes às correntes geradas na realimentação das derivações de impedância do acelerador de elétrons.

Importante dizer que esse simulador poderá ser utilizado após a defesa da tese, para treinamento de manutenção em aceleradores de elétrons.

Figura 60 – Simulador de sinais do acelerador de elétrons

Fonte: Autor da tese (2018).

Figura 61 –Desenvolvimento de software

Nota: CLP S7-1200 da Siemens e supervisório de controle Indusoft (Webstudio 7.1).
Fonte: Autor da tese (2018).

Figura 62 – Desenvolvimento de placa de dados de controle de hardware.

Fonte: Autor da tese (2018).

Figura 63 – Simulador de alta tensão e de sinais pertinentes ao projeto.

Fonte: Autor da tese (2018).

5.11 Falhas de equipamento

As falhas como alta temperatura, pressão de água, entre outros, dizem respeito a todos os elementos elétricos, mecânicos e eletrônicos que fazem parte do sistema automatizado. As falhas elétricas que causam sobrecarga ocasionarão o desligamento automático da alimentação elétrica do painel oscilador correspondente, efetuado por componentes de proteção no circuito elétrico. O CLP executa automaticamente uma rotina de supervisão de todos os módulos, interrompendo o processamento e desligando todas as saídas de controle em caso de falha. Essas são as falhas mais críticas com relação aos equipamentos elétricos e causarão a interrupção do ensaio e a perda das operações já realizadas.

As falhas mecânicas poderão causar ou não sobrecarga elétrica. Caso a falha ocasione alterações detectáveis pelo circuito elétrico, ocorrerá o desligamento automático. Para detectar este tipo de falha, o operador deve ser treinado, possuir experiência na execução de operação do acelerador e acompanhar passo a passo cada procedimento de execução.

No caso de qualquer falha detectada que não tenha causado o desligamento automático, o operador deverá utilizar o botão de comando “Emergência”, posicionado no painel de controle ou na tela do supervisório do computador, descrito anteriormente. O comando “Emergência” interrompe as linhas de alimentação elétrica de todos os dispositivos, de modo independente do controle de automação do sistema, sendo a última e mais eficaz etapa de segurança, que se sobrepõe a todas as outras.

6 CONCLUSÕES

A automação industrial desempenhou um papel imprescindível no desenvolvimento do processo automatizado de controle operacional do Acelerador Industrial de Elétrons Dynamitron®, modelo DC1500/25/4, a fim de aumentar sua produtividade e flexibilidade, com alta qualidade e confiabilidade, reduzindo custos e evitando-se falhas humanas, com execução das Boas Práticas de Fabricação (BPF) no processo de irradiação dos materiais, no IPEN-CNEN/SP.

O sistema automatizado desenvolvido neste trabalho, para controle operacional do Acelerador Industrial de Elétrons Cockcroft-Walton contou com uma tecnologia de ponta, utilizando o controlador lógico programável (CLP), que integrou conforto e praticidade aos operadores durante a operação, os quais podem administrar o processo por intermédio de um microcomputador (*notebook*), com o auxílio de um sistema supervisório. Assim, com a interface gráfica de alta definição, o sistema fornece informações objetivas durante a operação.

Sistemas complexos de automação integram hardware e software no microcomputador, linha de equipamentos robóticos, processos de controle, estoque e treinamento, para aumentar a eficiência de produção e a produtividade dos funcionários. O hardware e software instalado no *notebook*, utilizado como estação de operação e programação do Acelerador de Elétrons Dynamitron® DC1500/25/4 desempenharam, igualmente, papel importante no sistema de automação, gerenciando tarefas físicas e analíticas, e soluções de última geração em automação industrial.

A automação do processo e a nacionalização decorrente deste projeto de pesquisa culminaram no desenvolvimento de um novo método na automação no sistema de controle operacional do Acelerador Industrial de Elétrons Dynamitron®, modelo DC1500/25/4, sendo desenvolvidos dispositivos e sistemas eletrônicos com inovação tecnológica, em equipamentos geradores de radiação ionizante.

No desenvolvimento dos dispositivos eletrônicos superaram-se dificuldades de se encontrar componentes de precisão, tais como capacitores, resistores, trimpotes, diodos e triodos, dentre outros. Assim, realizaram-se associações de resistores e capacitores, pesquisaram-se melhores amplificadores operacionais com respostas satisfatórias nos sinais amplificados, uma vez que os

sinais analisados e convertidos eram da ordem de μA . Desenvolveu-se uma placa de sinais de alta confiabilidade durante os testes, tanto no simulador quanto nas derivações de impedância do próprio acelerador industrial de elétrons.

Buscou-se no mercado nacional uma empresa especializada para confecção e montagem das placas de circuito impresso, com qualidade, preço competitivo, peças de reposição e garantia de sigilo do projeto desenvolvido. Esse fato repetiu-se na seleção do controlador lógico programável (CLP) e respectivo supervisor, e no medidor de vácuo, dentre outros componentes eletrônicos.

No desenvolvimento dos dispositivos mecânicos, pneumáticos e eletroeletrônicos, projetaram-se novas peças e componentes que suportassem altas tensões, além de válvulas pneumáticas de alta confiabilidade, agregando conhecimentos técnicos e científicos à equipe, superando-se obstáculos na fabricação dos dispositivos específicos nacionais ao Acelerador Industrial de Elétrons Dynamitron®, do IPEN-CNEN/SP.

No projeto do sistema de potência do acelerador de elétrons, utilizaram-se diversos equipamentos eletrônicos, tais como multímetros, fontes de alta tensão, osciloscópios e geradores de função, essenciais na obtenção das medidas de tensão e correntes com grande precisão, além de auxiliar no desenvolvimento do hardware (placa de disparo dos tiristores) e no software, necessários à automação.

No projeto e desenvolvimento do software, superaram-se dificuldades na programação, nos cálculos matemáticos e controles proporcional, integral e derivativo (PID), no controle entre os sinais do acelerador de elétrons para controle da alta tensão, corrente de feixe e corrente de retorno do sistema de varredura. Contudo, concluiu-se a programação foi adequada, evitando-se acidentes e danos muitas vezes irreversíveis ao Acelerador Industrial de Elétrons Dynamitron®, modelo DC1500/25/4, do IPEN-CNEN/SP.

O sistema de segurança física e radiológica, integrado ao sistema de controle, atendeu fielmente as normas de segurança em instalações radioativas, estabelecidas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA).

Manteve-se a integralidade de funcionamento do Acelerador Industrial de Elétrons Dynamitron®, modelo DC1500/25/4 realizando-se o intertravamento do equipamento com os sistemas periféricos de irradiação por feixe de elétrons,

garantindo-se o perfeito processamento dos produtos. Analisaram-se os parâmetros operacionais da máquina, comparando-os com os cálculos dosimétricos teóricos e a dosimetria industrial, por meio dos dosímetros de alanina e CTA. Os resultados das dosimetrias prática e teórica foram similares, mantendo-se a confiabilidade em relação à dose de radiação desejada ao produto, com o novo sistema de controle automatizado.

6.1 Trabalhos futuros

- Desenvolvimento de controle automático da alta tensão;
- Integração de um sistema dosimétrico (fotodiodos ou calorímetros) com o sistema de controle computadorizado;
- Realização de treinamento para engenheiros e técnicos na manutenção de aceleradores de elétrons de baixas e médias energias;
- Planejamento e realização de experimentos integrando na otimização no processo de produção na irradiação de produtos utilizando bandejas e esteiras no processo de irradiação com o sistema automatizado de controle;
- Preparação dos processos de pedidos de patente dos dispositivos desenvolvidos com conversor de sinais e outros apresentados; e
- Publicação de artigos relacionados aos vários desenvolvimentos realizados (APÊNDICE I).

7 REFERÊNCIAS

- A DOUBLE Van de Graaff Generator. 2007. Disponível em <<http://www.coe.ufrj.br/~acmq/myvdg.html>>. Acesso em 25 ago. 2015.
- APPLIED MOTION PRODUCTS. Manual do Usuário Hardware. Si Programmable step motor. Código 920-0006 – Rev. 5-19 março 2009, USA.
- APPLIED MOTION PRODUCTS. Manual do Usuário Software. Si Programmable step motor. Driver 1240i. – Rev 2 – 23 abril 2008, USA
- BONFIM, Márlcio José do Couto. TE051 – Circuitos não lineares/multiplicadores de tensão – parte 10. 2016. Universidade Federal do Paraná. Disponível em <www.eletr.ufpr.br/~marlio/te051>. Acesso em 12 ago. 2018.
- CALVO, W.A.P. *et al.* Electron beam accelerators – trends in radiation processing technology for industrial and environmental applications in Latin America and the Caribbean. **Radiation Physics and Chemistry**, v.81, pp.1276–1281, 2012.
- CIPELLI, A.M.V.; SANDRINI, W. J. **Teoria e desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos**. 10^a ed. São Paulo: Erica, 1985.
- CLELAND, M.R. Improvements in or relating to voltage multiplication apparatus. *Radiation Dynamics* July 1962: GB900838 900,838. Rectifying. **Radiation Dynamics Inc.** July 28, 1958, no. 24290/58.
- CLELAND, Marshall R.; STICHELBAUT, Frédéric. Radiation processing with high-energy x-rays. 2009. 12 f. CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DO ATLÂNTICO NUCLEAR – Inac. Associação Brasileira de Energia Nuclear – Aben. Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2009.
- CNEN. Requerimento – Licenciamento, Fiscalização e Controle. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Disponível em: <<http://www.cnem.gov.br/requerimentos-referente-a-licenciamentos>>. Acesso em 28 mai. 2017.
- _____. Resolução n.112 de 24 de agosto de 2011, publicada no D.O.U. em 01/09/2011, pela Comissão Nacional de Energia Nuclear.
- _____. Diretrizes básicas de proteção radiológica. S/data_3. Acesso em 12 mar 2018. (CNEN-NN-3.01).
- _____. Fatores de Ponderação para as Grandezas de Proteção Radiológicas, PR301_02, Rio de Janeiro, maio, 2011 (Posição Regulatória - 3.01/002:2011).
- _____. Licenciamento de Instalações radiativas. Rio de Janeiro, abril, 2014 (CNEN -6.02).
- _____. Licenciamento e Controle de Instalações Industriais. S/data_2. Disponível em: <<http://www.cnem.gov.br/images/cnem/documentos/drs/orientacoes/NEW-P2->

Licenciamento-e-Controle-de-Instalacoes-Instalacoes-Industriais.pdf>. Acesso em: 29 maio 2017.

_____. Licenciamento e Controle de Instalações Industriais. S/data_4 Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/drs/orientacoes/NEW-P2-Licenciamento-e-Controle-de-Instalacoes-Instalacoes-Industriais.pdf>>. Acesso em: 29 maio 2017.

_____. Movimentação de Fontes Radioativas e Equipamentos Geradores de Radiação Ionizantes. S/data_1. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/drs/orientacoes/NEW-P5-Movimentacao-de-Fontes-Radioativas-e-Equipamentos-Geradores-de-Radiacao-Ionizantes.pdf>>. Acesso em: 29 maio 2017.

COTTEREAU, E. DC Accelerator. Tandetron, CNRS/CEA, Bat 30 Ave de la Terrasse, F-91198 Gif-sur Yvette Cedex, France. 2004. Disponível em: <<https://cas.web.cern.ch/cas/Pruhonice/PDF/DC-accel-DB1.pdf>> acesso em: 22 julho 2017.

CROCKROF John D.; WALTON, Earnest T.S. Cockroft-Walton Accelerators. 1932. Disponível em <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Particles/accel3.html>>. Acesso em 21 junho 2015.

CUNHA, João Filipe Abreu de Paulo. **HVDC baseado em gerador de Cockcroft-Walton**. 2016. Dissertação (Mestrado) – IFT – Técnico Lisboa/Portugal, 2016.

DUARTE, C.L. *et al.* Electron beam combined with hydrothermal treatment for enhancing the enzymatic convertibility of sugarcane bagasse. **Radiation Physics and Chemistry**, v.81, pp.1008–1011, 2012.

GALLOWAY, R.A. *et al.* The New IBA Self-shielded Dynamitron® Accelerator For Industrial Applications. **Radiation Physics And Chemistry**, New York: Elsevier, v. 71, n. 2, 2 jun. 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969806X04001458>>. Acesso em: 16 maio 2017.

GALLOWAY, R.A.; LISANTI, T.F.; CLELAND, M.R. A new 5 MeV – 300 kW Dynamitron for radiation processing. IBA Technology Group, Long Island Facility, NY, USA. *Radiation Physics and Chemistry*, Volume 71, Issue 1-2, p. 551-553. 2004.

HART, D. W. **Eletrônica de potência** – análise e projetos de circuitos. São Paulo: AMGH, 2012.

IAEA. Radiation Technology series 1. Use of mathematical modelling in electron beam processing: a guidebook. International Atomic Energy Agency. Vienna: IAEA, 2010.

_____. Radiation treatment of gaseous and liquid effluents for contaminant removal – **Proceeding...** of technical meeting held in Sophia – Bulgaria – 07-10 Sept, 2004.

_____. Radiation safety of gamma, electron and X ray irradiation facilities, Specific Safety Guide no. 8, Vienna, 2010a.

_____. Industrial radiation processing with electron beams and X-rays. Vienna: International Irradiation Association, 2011. 115 p.

_____. Radiation processing: environmental applications. ISBN 92-0-100507-5 – Vienna: IAEA – Library Cataloguing Publication Data, 2007.

IDOETA I. V.; CAPUANO, F. G. **Elementos de eletrônica digital**. 20 ed. São Paulo: Erica, 1993.

INDUSOFT. Indusoft Web Studio 7.1. Getting Started Guide. PN: IND-GSG-WD002, USA. 2011.

INTERNATIONAL STANDARD. International Electrotechnical Commission IEC 61131-3 - Programmable controllers. Second edition 2003-05. Disponível em <<https://www.sis.se/api/document/preview/571565/>>. Acesso em 18 jul. 2018.

JONGEN, Y. *et al.* Rhodotron accelerators for industrial electron-beam processing: a progress report. **Proceedings...of the EPAC**, Bristol, UK (1996): 2687-2692.

LABORATÓRIO DE ENERGIA ELÉTRICA (LEE) Curso de Controladores Lógicos Programáveis. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 2018. Disponível em <<http://www.lee.eng.uerj.br/downloads/cursos/clp/clp.pdf>>. Acesso em 19 jul. 2018

MCLAUGHLIN, W. L. *et al.* Dosimetry for radiation processing. Taylor & Francis, Philadelphia, 1989.

MILLER, R.B. Electronic irradiation of foods; An introduction to the technology. Chapter 3 and 4. Springer, New York, 2010.

MORAES, C. C.; CASTRUSCCI, P. L. Engenharia de automação, 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

NITZAN, D.; ROSEN, C.A. Programmable industrial automation. IEEE Transactions on Computers, vol. C-25, Issue: 12, Dec. 1976. Acesso em: 14 julho 2014. Disponível em <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1674593/authors#authors>>. Acesso em 16 jul. 2018.

RADIATION DYNAMICS, Inc – RDI. General Dynamitron®. Manual of Electron Beam Accelerator. 1996.

RIBEIRO, M.A. **Automação industrial**. Salvador: Tek, 2001.

SANTOS, Thais C. **Dosimetria de elétrons em processos de irradiação com diodos resistentes a danos de radiação**. 2012. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear: Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares- IPEN-CNEN/SP São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-05112012-095317/publico/2012SantosDosimetria.pdf>>. Acesso em 22 jul. 2014.

SIEMENS SIMATIC S7-1200. System software for S7-1200 and standard functions. Reference Manual Siemens AG. 2003, Germany.

SOMESSARI, S.L. *et al.* A dosimetric survey of the DC1500/25/04 electron beam plant installed at IPEN-CNEN/SP. **Proceedings...** of INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE –Inac, 2015. ISBN: 978-85-99141-06-9.

SOMESSARI, S.L. *et al.* Electron beam accelerator facilities at IPEN-CNEN/SP. INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE (INAC 2007). **Proceedings...** Santos, SP, Brazil, September 30 to October 5, 2007.

VIANNA, W. S. Sistema SCADA supervisor – Instituto Federal Fluminense de Educação Ciência e Tecnologia – Campos dos Goytacazes/ RJ, 2008.

APÊNDICE I

TRABALHOS PUBLICADOS

Journal of Physical Science and Application 5 (5) (2015) 356-366
doi: 10.17265/2159-5348/2015.05.006

Analysis of the Power System from an Electron Beam Accelerator and the Correlation with the Theoretical Dosimetry for Radiation Processing

Samir Luiz Somessari*, Elizabeth S. Ribeiro Somessari, Carlos Gaia da Silveira and Wilson Aparecido Parejo Calvo

Radiation Technology Centre, Nuclear and Energy Research Institute, National Nuclear Energy Commission (IPEN-CNEN/SP), Sao Paulo, 05508-000, Brazil

Abstract: Dynamitron DC1500/25/04 type EBA (Electron beam accelerator), model JOB 188, was manufactured by IBA Industrial (Radiation Dynamics, Inc.) and installed at IPEN-CNEN/SP, in 1978. The technical specifications of the EBA are: energy 0.5 to 1.5 MeV; beam current: 0.3 to 25.0 mA; beam scanning: 60 to 120 cm; beam width: 25.4 mm and frequency: 100 Hz. Nowadays, this accelerator has been used for innumerable applications, such as: For sterilization of medical, pharmaceutical and biological products, treatment of industrial and domestic effluents and sludge, preservation and disinfestations of foods and agricultural products. Other important application are lignocellulosic material irradiation as a pre-treatment to produce ethanol bio-fuel, decontamination of pesticide packing, solid residues remediation, organic compounds removal from wastewater, treatment of effluent from petroleum production units, crosslinking of foams, wires and electric cables. Electron accelerator JOB 188 is, also, very important composite and nanocomposite materials and carbon fibers irradiation, irradiated grafting ion-exchange membranes for fuel cells application, natural polymers and multilayer packages irradiation and biodegradable blends production. The energy of the electron beam is calculated as a function of the current in the accelerator high-voltage divisor, taking into account the thickness and density of the material to be irradiated. This energy is calculated considering the electron through the entire material and the distance from the titanium foil window, so that the absorbed doses at the points of entrance and exit are equivalent on the material. The dose is directly proportional to the beam current and the exposure time of the material under the electron beam and inversely proportional to the scan width. The aim of this paper is to analyze the power system parameters of the EBA Dynamitron DC1500/25/04, such as, voltage and RMS (Root-mean-square) current in the oscillator system, high voltage generator and waveform. For this purpose software developed in the Radiation Technology Center at IPEN/CNEN-SP to simulate the energy efficiency of this industrial accelerator. Finally, it is also targeted to compare theoretical dosimetry using parameters of energy and beam current with data from the accelerator power system. This knowledge will be very useful and essential for the control system upgrade of EBA, mainly Dynamitron DC1500/25/04 taking into consideration that radiation processing technology for industrial and environmental applications has been developed and used worldwide.

Key words: Electron beam accelerator, industrial dosimetry, radiation processing, accelerator power system, Dynamitron DC1500/25/04 accelerator.

1. Introduction

Electron beam processing is an important technology that the IAEA (International Atomic Energy Agency) supports and promotes, having several programs to facilitate its use in developing

Member States. This technology is used in diverse industries to enhance the physical and chemical properties of materials and to reduce undesirable contaminants, such as pathogens or toxic by-products [1].

The industrial uses of EBA (Electron beam accelerator) started in the late 1950's, with the crosslinking of polyethylene wire insulation. Nowadays, the number of EBA in use for various

*Corresponding author: Samir Luiz Somessari, electronic engineer, research fields: automation systems, industrial electronic systems and electron beam accelerators.

radiation processing applications exceeds 1,500 radioactive facilities. These accelerators are used mainly in plastics, automotive field, wire and electric cables, semiconductors, health care, aerospace and environmental industries, as well as, numerous research and development facilities around the world [2, 3].

Crosslinking provides significant commercial benefits to wire and cable insulation. Ionizing energy, as provided by an accelerated EB (Electron beam), is an efficient means of crosslinking the polymers that are used for wire and cable jacketing. In this process, chemical bonds are formed between polymer molecules to produce a three-dimensional insoluble network. EB processing is faster, more controllable and more economical than thermal and/or chemical crosslinking, when used in the production of insulated wires and cables [4].

The most important specification for any irradiation process is the absorbed dose. The quantitative effects of the process are related to this factor. Absorbed dose is proportional to the ionizing energy delivered per unit mass of material. The international unit of dose is the Gray (Gy), which is defined as the absorption of one joule per kilogram (J/kg). A more convenient unit for most radiation processing applications is the kilogray (kJ/kg or J/g) [5].

The objective is to analyze the power system parameters of the EBA Dynamitron DC1500/25/04, such as, voltage and RMS (Root-mean-square) current in the oscillator system, high voltage generator and waveform, using software developed to simulate the energy efficiency of this industrial accelerator. It is also targeted to compare theoretical dosimetry using parameters of energy and beam current with data from the accelerator power system.

The basic operation of the accelerator electron DC1500/25/4- JOB188 oscillator panel turns 440 Volts AC - 60 Hz, for up to 10,000 Volts, with a frequency of 100 kHz, connected to the pressure vessel. In the pressure vessel, there is a resonant electronic circuit, which takes up a voltage 10,000 Volts/100 kHz

generated by the oscillator panel and processed in an order of 1,500 kV DC. The voltage inside the pressure vessel is very high: to avoid sparks or short circuit inside the pressure vessel, an insulating gas (SF₆ sulfur hexafluoride) is used; to measure the high voltage in the pressure vessel, a shunt (resistors) is used, indicating an electrical current, called HVD (High voltage divider). The tension generated in the pressure vessel of up to 1,500,000 Volts DC polarizes the beam tube assembly, where the penetration energy of the beam electrons was determined, through the shunt (resistors); the bias current measurement of the tube is called BTD (Beam tube divider); the LVR is the sum of electric currents, which involve the tube beam current (BTD), the current of high voltage (HVD) and other currents. Polarizing the tungsten filament, and by heating, a beam current of the electron accelerator is generated. The scan system and optics contain some coils that are polarized with a certain voltage/frequency, determined by the frequency scanning [6-9].

1.1 Absorbed Dose versus Electron Beam Current and Area Throughput Rate

Dose is calculated by Eq. (1):

$$D = E/M \quad (1)$$

In which,

D = Dose (kGy);

E = Absorbed energy (kJ);

M = Mass (kg).

Additionally,

Absorbed energy (kJ) = Beam power, P (kW) * Treatment time, T (s);

Beam power, P (kW) = Electron energy, E (MeV) * Beam current, I (mA);

Electron energy, E (MeV) = D(e) (MeV·cm²/g) * Z (g/cm²);

D(e) = Energy deposition per unit area density per incident electron;

Z = Thickness (cm) * Volume density (g/cm³);

Z = Mass, M (g)/Area, A (cm²) or Area density (g/cm²);

358 **Analysis of the Power System from an Electron Beam Accelerator and the Correlation with the Theoretical Dosimetry for Radiation Processing**

Mass, M (g) = Z (g/cm²) * Area A (cm²).

Then,

$$D \text{ (kGy)} = P \text{ (kW)} * T \text{ (s)} / M \text{ (kg)};$$

$$D \text{ (kGy)} = E \text{ (MeV)} * I \text{ (mA)} * T \text{ (s)} / M \text{ (kg)};$$

$$D \text{ (kGy)} = D(e) \text{ (MeV cm}^2\text{/g)} * Z \text{ (g/cm}^2\text{)} * I \text{ (mA)} * T \text{ (s)} / M \text{ (kg)};$$

$$D \text{ (kGy)} = D(e) * Z * I * T / [Z * A \text{ (cm}^2\text{)} * 10^{-3}];$$

$$D \text{ (kGy)} = D(e) * I * T / [A \text{ (m}^2\text{)} * 10].$$

Furthermore, dose at depth z in the irradiated material is calculated by Eq. (2).

$D(z)$ = Dose at depth z in the irradiated material;

$D(e, z)$ = Electron energy deposition at depth z in the material;

$F(i)$ = Fraction of emitted beam current intercepted by the material.

Then,

$$D(z) = D(e, z) \cdot F(i) \cdot I \cdot T / (10 \text{ A})$$

or

$$D(z) = D(e, z) \cdot F(i) \cdot I / (10 \text{ A/T}) \quad (2)$$

2. Methods, Materials and Testing Procedures

The curve of dose distribution with raised CTA (Cellulose triacetate) dosimeter (density, $\rho = 1.32 \text{ g/cm}^3$) for EB energy of 1.5 MeV, from which the remaining curves were constructed in this study is shown in Fig. 1. In this curve, it was considered that

the desired dose on the surface of the material and the dose distribution, in percentage, at this bulk area density function (σ = density against thickness) in g/cm². The curve was prepared at the IPEN-CNEN/SP's Dosimetry Laboratory.

In Fig. 2, the power system schematic diagram of the EBA is shown, with its properties of voltage, current and other electrical parameters and measurement points, using scopemeter, multimeters and probes to specific current measures and voltage.

In Fig. 3, energy curves between LVR of the current return circuit voltage and power in the oscillator triode EBA system are shown. Curves of power determined in the oscillator panel show that the effectiveness of the EBA is 45.53%. This means that beam energy of 15 kW should have a power triode of 32.94 kW, in the oscillator panel.

In Fig. 4, curves of electron energies and high voltage in the pressure vessel of accelerator are shown. Curves ratio between high voltage and energy, and ratio between energy (MeV) with HVD are also shown.

2.1 Types and Forms of Irradiation Processes-Plan Materials

The irradiation system for this type of material consists of convey or roller driven currents, which are placed on trays where the materials are distributed to

Fig. 1 Dose distribution with raised CTA dosimeter for EB energy of 1.5 MeV.

Fig. 2 Power system schematic diagram of the EBA.

Fig. 3 Energy curves (MeV) of LVR current (mA) versus power triode (kW).

be irradiated. This conveyor is composed of two modules: one-way, which takes the tray with the material inside their radiation chamber (Fig. 5) to their radiator (electron accelerator) and another (that brings

back) the tray out of their radiation chamber. After the tray with the material passes through the electron beam, it is transported by currents to the module return (back), again passing through the beam.

Fig. 4 Curves of high voltage (kV) versus energy (MeV) and HVD (μA) versus energy (MeV).

Fig. 5 Conveyor installed in their radiation chamber at IPEN-CNEN/SP.

Fig. 6 Irradiation form I - plan material irradiation diagram.

Therefore, for each tray back on the conveyor (input and output tray of their radiation chamber), the material passes twice by the electron beam.

2.1.1 Irradiation form I – Plan Material

In this irradiation form I, the electron beam runs

through the material so that the dose at the point of input and output are equal (Fig. 6).

The curve of dose distribution (irradiation form I) is shown in Fig. 7, take into account the following irradiation parameters.

Energy (E): 1.5 MeV;

Beam current (I): 10 mA;

Scanning beam: 100 cm;

Material transport speed (v): 10 m/min;

Number of electron beam passes (P): 2 (1 turn on the treadmill);

Dose for pass (D/P): 6 kGy;

Total dose (TD): 12 kGy;

Dose rate: 40 kGy/s;

Density (ρ): 1 g/cm³;

Thickness: 4.45 mm.

Fig. 7 Irradiation form I – plan material irradiation diagram and dose distribution curves a function of the sample thickness (kGy/mm).

Fig. 8 Irradiation form II – plan material irradiation diagram.

Take into account the power beam of 15 kW and beam thickness of 25.4 mm (1"), dose in their radiated material is calculated by Eq. (3):

$$D \text{ (kGy)} = 15 \text{ kW} \cdot \text{Time(s)} / M(\text{kg})^* \quad (3)$$

*Application of Eq. (3) is not so evident, since a number of factors should be considered, such as the size and the shape of the object to calculate the area, volume and mass. The fraction of energy deposited on the material, by back scattering dispersion of the beam, can be calculated by means of Monte Carlo simulation [5].

2.1.2 Irradiation form II - Plan Material

In this irradiation form II, the electron beam cannot pass through the entire material. It is necessary to irradiate it on both sides, so that after being irradiated from both sides, the dose on the surfaces of the material and the medium are equals (Fig. 8).

The curve of dose distribution (irradiation form II) is shown in Fig. 9 take into account the following irradiation parameters:

Energy (E): 1.5 MeV;

Beam current (I): 10 mA;

Scanning beam: 100 cm;

Material transport speed (v): 10 m/min;

Number of electron beam passes (P): 2 (1 turn on the treadmill, on one side of the material) plus 2 (1 turn on the treadmill, on the other side of the material);

Dose for pass (D/P): 6 kGy;

Total dose (TD): 12 kGy;

Dose rate (D): 40 kGy/s;

Density (ρ): 1 g/cm³;

Thickness: 11.3 mm.

Take into account the power beam of 15 kW and beam thickness of 25.4 mm (1"), dose in their radiated material is calculated by Eq. (3).

2.2 Irradiation of Wires and Electric Cables

The irradiation system for wires and electric cables consists of two sets of pulleys, with 24 pulleys each, placed in parallel so that the electron beam is between them. The electric cable passing from a sheave of a pulley set for the other set is irradiated and, to make the contrary path, in the position diametrically opposite to the previous one, is again irradiated. This going and return of electric cable is called link.

2.2.1 Irradiation form I – Wires and Electric Cables

In this irradiation form I, the electric cable is fully irradiated in two positions (roundtrip), passing through the electron beam. Taking into account the internal diameter (wire diameter) and the outside diameter (overall cable diameter), the electron traverses across the tangent line to the conductor (greater extension

Fig. 9 Irradiation form II – plan material irradiation diagram and dose distribution curves as a function of the sample thickness (kGy/mm).

Fig. 10 Pulley system for wires and electric cables irradiation by electron beam.

Fig. 11 Irradiation form I – wires and electric cables.

insulator), so that the dose at the points of input and output are equals (Fig. 11).

Examples of irradiation conditions of wires and electric cables in pulley system are shown in Fig. 12. The curve of dose distribution (irradiation form I) is shown in Fig. 13, take into account the following irradiation parameters:

- Energy (E): 1.5 MeV;
- Beam current (I): 10 mA;
- Scanning beam: 100 cm;

Speed (v): 100 m/min;

Number of electron beam passes (P): 48 (24 links);

Total dose (TD): 28.8 kGy;

Dose rate (D): 40 kGy/s;

Density of the insulating (ρ): 1 g/cm³;

Core (internal diameter): 1 mm (wire diameter);

Outside diameter: 4.56 mm (overall diameter of the electric cable);

Power beam: 15 kW;

Beam thickness: 25.4 mm (1").

Take into account the power beam of 15 kW and beam thickness of 25.4 mm (1"), dose in their radiated material is calculated by Eq. (3).

2.2.2 Irradiation form II – Wires and Electric Cables

In this irradiation form II, the electric cable will only be completely irradiated after completing the link. When passing through the electrons beam, it cannot fully penetrate the cable; the irradiation is completed, when the cable passing through the electron beam in position diametrically opposite to the previous one. Taking into account the internal diameter (wire diameter) and the outside diameter (overall cable diameter), after the cable is irradiated at diametrically opposed positions, the dose and the end points and middle of the line tangent to the conductor (greater extension insulator) are equals (Fig. 14).

Examples of irradiation conditions of wires and electric cables in pulley system are shown in Fig. 15. The curve of dose distribution (irradiation form II) is

Fig. 12 Irradiation form I – wires and electric cables in pulley system.

Fig. 13 Curve of distributed dose I - wires and electric cables (kGy/mm).

Fig. 14 Irradiation form II – wires and electric cables.

shown in Fig. 16, take into account the following irradiation parameters,

Energy (E) 1.5 MeV;

Beam current (I): 10 mA;
 Scanning beam: 100 cm;
 Speed (v): 100 m/min;
 Number of electron beam passes (P): 48 (24 links);
 Total dose (TD): 14.4 kGy;
 Dose rate (D): 40 kGy/s;
 Density of the insulating (ρ): 1 g/cm³;
 Core (internal diameter): 1 mm (wire diameter);
 Outside diameter: 11.34 mm (overall diameter of the electric cable);
 Power beam: 15 kW;
 Beam thickness: 25.4 mm (1").
 Take into account the power beam of 15 kW and beam thickness of 25.4 mm (1"), dose in their radiated material is calculated by Eq. (3).

364 Analysis of the Power System from an Electron Beam Accelerator and the Correlation with the Theoretical Dosimetry for Radiation Processing

Fig. 15 Irradiation form II - wires and electric cables in pulley system.

Fig. 16 Curve of distributed dose II -wires and electric cables (kGy/mm).

Fig. 17 Graph thickness (mm) versus density (g/cm^3) for irradiated materials by Electron Accelerator Dynamitron DC1500/25/4 - JOB 188.

Analysis of the Power System from an Electron Beam Accelerator and the Correlation with the Theoretical Dosimetry for Radiation Processing

365

Fig. 18 Graphs with two intervals of density (g/cm^3) and material thickness (mm) values.

Fig. 20 Curve of energy loss in window (titanium foil).

3. Thickness of the Material to be Irradiated and its Density for the Energy of 1.5 Mev

The graph (Fig. 17) was obtained using the calculations for determining the conditions of irradiation, for the Electron Accelerator Dynamitron DC1500/25/4- JOB 188.

Fig. 18 is shown the dissociation of the graph thickness (mm) versus density (g/cm^3) for irradiated materials in two intervals, with different density values, for better accuracy.

4. Titanium Window and Energy Loss

As the high voltage is directly associated with the energy of the electron beam, should we also to be considerate that, in the acceleration process, there are to a loss of energy through the window titanium which isolates the areas in vacuum (the scan horn and beam tube) of the environment with normal atmosphere and by where passes the electron beam. In Fig. 20 is shown the curve of energy loss in window (titanium foil).

5. Conclusions

Through this study, there liability of the equations used in the calculations of their radiation conditions for flat materials and cables could be verified, both for form I and form II of irradiation. These calculations were developed for use in irradiation with the Electron Accelerator Dynamitron DC/1500/25/4 JOB188 at IPEN/CNEN-SP.

Thus, it was concluded:

In the form I of irradiation, using the calculated thickness of 4.45 mm, a small difference between the doses on the upper and on the lower surfaces of the material was found. In the graph, the correct thickness was 4.3 mm, 0.15 mm different from the calculated (approximately 3.37% less), so that these doses were equal.

In the form of irradiation II, using the calculated thickness of 11.3 mm, a difference between the doses was found, between the dose on the surface of the material and in its middle. The graph shows the correct thickness of 10.7 mm, 0.6 mm different from the calculated (about 5.3% lower), so that these doses were equal.

This study allows the equivalence between the electrical parameters (beam power), used by industries, and the dose absorbed by the material (kGy) in the electron beam processing. It also explains to researchers the use of the electron irradiation process,

the limits of penetration, distribution and dose rates.

References

- [1] International Atomic Energy Agency. 2010. International Irradiation Association. *Industrial Electron Beam Processing*, IAEA, IIA.
- [2] Calvo, W. A. P., Duarte, C. L., Machado, L. D. B., Manzoli, J. E., Geraldo, A. B. C. and Kodama, Y. et al. 2009. "Needs and Emerging Opportunities of Electron Beam Accelerators on Radiation Processing Technology for Industrial and Environmental Applications in South America." *International Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Accelerators* IAEA, Vienna, May: 4-8.
- [3] Calvo, W. A. P., Duarte, C. L., Machado, L. D. B., Manzoli, J. E., Geraldo, A. B. C. and Kodama, Y. et al. 2012. "Electron Beam Accelerators Trends in Radiation Processing Technology for Industrial and Environmental Applications in Latin America and the Caribbean." *Radiation Physics and Chemistry* (1993) 81: 1276-81.
- [4] Cleland, M. R. and Galloway, R. A. 2009. *Electron Beam Crosslinking of Wire and Cable Insulation*, Technical Information Series TIS 01812. IBA Industrial, Inc., Edgewood, New York, USA.
- [5] Cleland, M. R. 2009. *Industrial Applications of Electron Accelerators*. IBA Industrial, Inc., Edgewood, New York, USA.
- [6] Radiation Dynamics, 1974. Inc. *Operation's Instruction Manual for the Dynamitron Electron Accelerator DC1500/25/4*, RDI.
- [7] Radiation Dynamics, 1994. Inc. *General Dynamitron Introductory Manual*, RDI.
- [8] Radiation Dynamics, 1996. Inc., *Dynamitron Training Course for Electron Beam Accelerator*, RDI.
- [9] IBA Industrial, 2012. Inc. *PLC Dynamitron Training Manual for Electron Accelerator*.

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR THE OPERATION OF AN ELECTROM BEAM ACELLERATOR

Samir L. Somessari¹, João A. Moura¹, Wilson Ap. P. Calvo¹

¹ Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN / CNEN - SP)
 Av. Professor Lineu Prestes 2242
 05508-000 São Paulo, SP
 somessar@ipen.br

ABSTRACT

Electron beam accelerators are used in many applications, such as basic physical research, chemistry, medicine, molecular biology, microelectronics, agriculture and industry, among others. The majority of the accelerators have electrons from a hot tungsten filament and their energy is increased as it passes through an electric field in the vacuum chamber. For industrial purposes, the most common model is Dynamitrons®. At IPEN-CNEN/SP, there is an electron beam accelerator Dynamitron® Type (Manufactured by RDI- Radiation Dynamics Inc., 1978) model DC1500/25/4. The technology applied was available in the 60's and 70's, but, nowadays is obsolete. Moreover, there are not original spare parts for this equipment any longer. The aim of this work is to develop a nationalized automated operation system for the accelerator, to replace the old equipment.

1. INTRODUCTION

Ion accelerators are sophisticated and expensive equipment used to accelerate electrically charged particles such as electrons, protons and ions, besides less common particles, like positrons. The equipment and process are the result of years of research and dedication of dozens of thousands of professionals, in many countries. Its various applications range from industry, medicine, basic physical research, molecular biology, chemistry and agriculture, among others. At the end of the 1920's, it became clear that natural radioactive sources were not enough anymore and the ion accelerators were necessary in the development and research of nuclear physics. At the beginning of the 1930's, different types of accelerators started to be developed, almost simultaneously: the Linear high frequency accelerator, the Circular and the Direct Current accelerator. Cockroft and Walton built their first generator of 600 KeV, cascade type, in 1932. Almost at the same time, Robert Van de Graaff built his 1.5 MeV machine. All the electron beam accelerators have an electron source, a vacuum acceleration chamber and a device to extract and distribute the electrons over the product surface. The majority of the accelerators have electrons from a hot tungsten filament and their energy is increased as it passes through an electric field in the vacuum chamber. For industrial purposes, the most common model in the market is Dynamitrons® [1,2]. At IPEN-CNEN/SP, there is an electron beam accelerator Dynamitron® Type (Manufactured by RDI- Radiation Dynamics Inc., 1978, model DC1500/25/4 [3,4]. This accelerator is used to reticulate the insulation of electric cables and wires, polyethylene blankets and retractable tubes, besides medical products radio sterilization, composites and polymeric materials modification and food treatment [5-8]. The technology applied to this accelerator was available in the 60's and 70's, but, nowadays is obsolete. Moreover, there are not original spare parts for this equipment any longer. The aim of this work is to develop a nationalized automated operation system for the accelerator, to

replace the old equipment. The project started with an economic and technical feasibility study and industrial dosimetry study. The safety standards from the IAEA and CNEN were used to guide the project. Several studies have been conducted and major development has been reached, including printed circuit boards construction, mechanical solutions, CLP automation, software for the automation and process parameters. In this work, the services of the industrial dosimetry laboratory, at IPEN-CNEN-SP Radiation Technology Center (CTR), were used. The main results are the development of an automated control system, signal converting boards, electron beam intensity and sweep system, safety system, overall control system and a device to simulate the electrical signals of the accelerator, allowing the whole system to be tested. This work will permit a considerable amount of money to be saved, once the complete new system from the manufacturer could reach as much as US\$400,000.00.

2. MATERIALS AND METHODS

The facilities used were the Laboratory of High Intensity Radiation Sources (LFIR) and the Laboratory of Irradiation Process Dosimetry (LDPY), in the Radiation Technology Center (CTR) of IPEN-CNEN/SP.

The control panels of the Dynamitron® DC1500/25/4 Cockcroft-Walton type accelerator, with energy of 1.5 MeV are shown in FIG.1 (command panel) and FIG. 2 (electrical protection and safety).

FIG.1: Command panel

FIG.2: Protection and safety

The panel for control of the electron beam, emergency stop, video cameras and the accelerator power control are showed in FIG.3 (electron beam control) and FIG.4 (power control).

FIG.3: Electron beam control panel

FIG.4: Power control

The panel of electron beam scan is showed in FIG.5 and the indicators of the electron beam electrical parameters are showed in FIG.6.

FIG.5: Electron beam scan panel

FIG.6: Electrical parameters indicators

With this scientific work an operating software and men machine interface were designed, allowing work in automated conditions. This development includes a Programmable Logic Controller design (PLC) and the correlate software. The design was, previously, based on the flowsheets of power management, showed in FIG.7, and process control, showed in FIG.8.

INAC 2017, Belo Horizonte, MG, Brazil.

FIG.9: Electrical block diagram of the accelerator.

FIG.10: Signal feedbacks of the controlled parameters in the accelerator.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The design of the new automated system for the accelerator consists of:

Hardware - microcomputer; Programmable Logic Controller (PLC); drivers for communication; step motors; sensors; communication interfaces; electronic and pneumatic devices.

An electronic interface board was constructed to take analogic feedback signals and feed it to the automated system. The board is showed in FIG.11.

FIG.11: Analogic signals electronic feedback board.

Software – operational control software; vacuum, electron beam sweep drivers; PLC programming using Step S7-1200, from Siemens; man-machine interface programming (Web Studio 8.0, from Indusoft).

The various functions were integrated in the supervisor system running in the man-machine interface software. The beam electron sweep control is showed in FIG. 12.

FIG.12: Electron beam sweep control.

The resulting spectrum of the electron beam was measured and is showed in FIG. 13.

FIG.13: Electron beam resulting spectrum.

To make it possible to operate the system using a computerized digital control for all functions of the accelerator, some screens with commands and displays were created for activating and adjusting the operational parameters. FIG. 14 shows one operational screen for command and parameter adjustment.

FIG.14: Computer screen for command and parameter adjustment.

REFERENCES

1. DC ACCELERATOR – E. Cottureau, Tandetron, CNRS/CEA, Bat 30 Ave de la Terrasse, F-91198 Gif sur Yvette Cedex, France. Disponível em : <https://cas.web.cern.ch/cas/Pruhonice/PDF/DC-accel-DB1.pdf>> Acesso em: 22 julho 2014.
2. GENERAL DYNAMITRON MANUAL OF ELECTRON BEAM ACCELERATOR Radiation Dynamics, Inc – RDI.
3. CALVO, W. A. P. et al. Electron beam accelerators - trends in radiation processing technology for industrial and environmental applications in Latin America and the Caribbean. Radiation Physics and Chemistry, v.81 (2012), p.1276–1281.
4. DUARTE, C. L. et al. Electron beam combined with hydrothermal treatment for enhancing the enzymatic convertibility of sugarcane bagasse. Radiation Physics and Chemistry, v.81 (2012), p.1008–1011.
5. SOMESSARI, S. L. ; SILVEIRA, C. G.; Paes H.; SOMESSARI, E. S. R. – Electron beam accelerator facilities at IPEN-CNEN/SP. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE (INAC 2007). Proceeding... Santos, SP, Brazil, September 30 to October 5, 2007.
6. International Atomic Energy Agency (IAEA). Radiation Processing: Environmental Applications –ISBN 92-0-100507-5 – IAEA – Library Cataloguing Publication Data - Vienna – 2007.
7. International Atomic Energy Agency (IAEA). Radiation treatment of gaseous and liquid effluents for contaminant removal – Proceeding... of technical meeting held in Sophia – Bulgaria – 07-10 Sept, 2004.
8. International Atomic Energy Agency (IAEA). Radiation Technology series 1 – Use of m

A study about the measurement method of the homogeneity of radioactivity along an iridium-192 wire used in brachytherapy

Osvaldo L. Costa,
Wilson A. P. Calvo,
Carlos A. Zeituni,
Maria E. C. M. Rostelato,
João A. Moura,
Anselmo Feher,
Carla D. Souza,
Samir L. Somessari

Abstract. The Nuclear and Energy Research Institute has produced, since 1998, iridium-192 wires used in low dose rate brachytherapy. In the paper the authors studied the influence of wire profile on the homogeneity distribution of radioactivity of iridium-192 along the wire. The authors propose the improvements in the quality control procedure that will provide more accurate measurement data and suggest changes in control devices.

Key words: iridium-192 • iridium wire • low dose rate brachytherapy • quality control • cancer treatment • radioactive sources production

Introduction

Brachytherapy uses radioactive sources that are placed within the volume of tissue being treated, or adjacent to the volume [1]. Among the radionuclides used in brachytherapy iridium-192 distinguishes itself by advantageous physical characteristics as the half-life of 74 days and an average energy of 380 keV [2]. The Radiation Technology Center of the Nuclear and Energy Research Institute (CTR-IPEN) have produced commercially iridium-192 wires used in low dose rate (LDR) brachytherapy since 1998 [3].

Materials and methods

For the production of iridium-192 wire, a platinum-iridium (25%Pt, 75%Ir) wire (Goodfellow), 50 cm long and 0.1 mm in diameter is used. The overall diameter of the wire of 0.3 mm results in a platinum sheath of 0.1 mm thick. The wire is wound in helical form and inserted into an aluminum tubular shape capsule with 2 cm in diameter and 7 cm in height. The capsule is sealed and irradiated in the IEA-R1 nuclear reactor under a neutron flux of $5 \times 10^{13} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ for a period of 30 h. After irradiation, the wire is cooled for 30 days. By this means the main contaminants (Ir-194, Pt-197, Pt-199) are reduced. After the cooling period, the capsule containing the wire is brought into a hotcell with 5 cm lead wall, where it is cut and iridium wire is removed, then the measurement of radioactivity homogeneity is carried out. The wire is inserted in the mechanism shown in Fig. 1 and pulled by pulleys through the guide pipe. The ionization chamber, placed inside the lead shield, has been used for the

O. L. Costa[✉], W. A. P. Calvo, C. A. Zeituni,
M. E. C. M. Rostelato, J. A. Moura, A. Feher,
C. D. Souza, S. L. Somessari
Nuclear and Energy Research Institute
(IPEN/CNEN-SP),
Radiation Technology Center (CTR),
2242 Prof. Lineu Prestes Ave.,
05508-000, São Paulo, SP, Brazil,
Tel.: +55 11 3133 9821, Fax: +55 11 3133 9765,
E-mail: olcosta@ipen.br

Received: 27 August 2013
Accepted: 27 January 2014

Fig. 1. Iridium-192 traction mechanism.

determination of distribution of activity along the irradiated wire. In the lead shield of ionization chamber there is a conical slit. The slit has the dimensions of 10 mm in width and 5 mm in height near the position of the wire, and its width increases by an angle of 20° , as shown in Fig. 2. The ionization chamber “sees” only 10 mm iridium-192 wire through the slit. This ionization chamber is fed with a 300 V source voltage (Canberra, model 3002D). The chamber is also connected to a Keithley electrometer model 617. The device counts the charge produced by ionizing radiation and derived from the piece of iridium-192 wire, that is opposite to the slit. The charge is counted every 2 min. Three passages of wire are performed by pulleys and, with each performed pass the charge along the wire is measured. In view of the expression no maximum or minimum reading of the charge, the difference in relation to the average value of the readings along the wire should not exceed 10%. This procedure is called the quality control of iridium-192 wire used in brachytherapy, which aims at verifying the homogeneity of the wire, with respect to the activity, along its 50 cm length. Variations in the activity of the wire along its length are most often caused by irregularities in the concentration of iridium. The homogeneity of radioactivity along the wire, will guarantee the homogeneity of dose in the treatment site.

After quality control, the activity of wires were measured in the ionization chamber (Capintec, model CRC-15R).

Fig. 2. Ionization chamber and shielding.

Fig. 3. Measurement of the charge along the Ir-192 wire 1.

Fig. 4. Measurement of the charge along the Ir-192 wire 2.

Results and discussion

Analyzing the graphs of the charge measurement along the iridium wires 1 and 2 (Figs. 3 and 4), we note that there is a decrease of peak height values in the second and third measurement in relation to the first measurement. This can also be verified by variation of the means of measurements shown in Table 1. Rostelato *et al.* [4] also present values of this type of variation in their study about the production of radioactive sources. There is also a gradual decrease of the values of standard deviations of the wire 1, while the wire 2 had its standard deviation values increased slightly in the second measurement and then return to the same level in the third measurement is observed. The maximum and minimum values of the wire had a downward trend when compared with the arithmetic mean of the measurements. In the case of wire 2, maximum and minimum values showed an oscillating behaviour similar to the standard deviations.

The irregularities in the concentration of iridium along the wire cause variations in the activity along its length. However, such irregularities cannot explain the decrease of the peaks read, averages and standard deviations in the measurement sequences. These variations are related to two main factors:

1. The internal diameter of guide pipe, which provides the passage of radiation toward the detector, is much larger than the iridium wire diameter (iridium wire is 0.3 mm in diameter, while the guide pipe is 2 mm in diameter).
2. The iridium wire reaches the hotcell in the helical form.

The iridium wire will lose its curl on its shape as it passes between the pulleys, which position the wire for

Table 1. Results from evaluation of homogeneity of wires

	Wire 1	Wire 2	Rostelato <i>et al.</i> , [4] wire
Average 1	4.801 nC	2.741 nC	2.2056 nC
Average 2	4.719 nC	2.711 nC	2.0228 nC
Average 3	4.697 nC	2.697 nC	1.9230 nC
SD ^a 1	0.166 nC	0.114 nC	
SD 2	0.135 nC	0.125 nC	
SD 3	0.126 nC	0.115 nC	
Higher measure 1	5.4%	10.0%	
Higher measure 2	5.0%	11.0%	
Higher measure 3	4.9%	8.4%	
Lower measure 1	8.1%	9.2%	
Lower measure 2	7.7%	9.4%	
Lower measure 3	7.3%	8.3%	
Activity	244.0 mCi	143.5 mCi	

^aSD – standard deviation.

Fig. 5. Iridium wire profile in front of the slit.

measurement, losing their rolling shape, the length of wire that the detector sees through the slit goes down and, thus, the measured value also decreases.

In Fig. 5 are shown four examples of profiles, which can take iridium wire in front of the slit.

Setting the wire “visible” width as 10 mm and maximum height to 2 mm, we can calculate the approximate values of the lengths of the four profiles shown in Fig. 5:

- straight profile – 10 mm long;
- ramp profile – given a right triangle, base 10 mm and height of 2 mm, we get a result of 10.198 mm in length, a difference of 1.98% compared to the ideal profile;
- sawtooth profile – considering an isosceles triangle of base 10 and height 2 mm, we obtain a result of 10.77 mm, a difference of 7.7% compared to the ideal profile;
- hill profile – considering the following sinusoidal function $x = t$; $y = \{(\pi/5) \cdot \sin t, t \in [0, \pi]\}$, to calculate the length of the wire we get the following line integral:

$$\int_0^{\pi} \sqrt{1 + \frac{\pi^2 \cos^2 t}{25}} \cdot dt$$

through the software Calculus Tools [5] we got the result 3.43, as the interval between 0 and π is equivalent to the interval between 0 and 10 mm, we obtain the length of the wire as 10.92 mm, the difference being 9.2% compared to the ideal profile.

In the examples presented profiles we obtained a variation of wire length ranging from 1.98 to 9.2%, values that influence too much the end result of iridium-192 wire quality control. Therefore, it is necessary to establish measures to restrict this type of variation. By continuing

the use of the same system of pulleys employing the method push-pull wire, it is necessary that before the measurements, the wire loses its wavy shape, and also should avoid creasing. New projects of traction should aim to keep the wire as taut as possible in front of the slit, using the guide tube with an internal diameter smaller, or stretch the wire through the clamps that attach at their ends. Thus, it is possible to minimize the effect that the geometry of the source causes the reading and thus improve the quality control of the iridium-192 wire used in LDR brachytherapy.

Conclusion

The current method of quality control of the iridium-192 wire used in LDR brachytherapy shows systematic errors that directly influence the final result of the wire accordance. These errors can be minimized by procedures that allow the wire stays as straight as possible in front of the slit, without deviation, folds or sinusoids. Innovative projects about traction should aim at the wire stays as taut as possible in front of the slit.

References

- Aird, E. G., Williams, J. R., & Rembowska, A. (2000). Brachytherapy. In J. R. Williams, & D. I. Thwaites (Eds.), *Radiotherapy physics in practice* (2nd ed., pp. 187–226). Oxford: Oxford University Press.
- Khan, F. M. (1994). *The physics of radiation therapy*. Baltimore: Williams & Wilkins.
- Rostelato, M. E. C. M. (1997). *Preparação de fontes de irídio-192 para uso em braquiterapia*. Unpublished master's thesis, Nuclear and Energy Research Institute, São Paulo, Brazil.
- Rostelato, M. E. C. M., Rela, P. R., Zeituni, C. A., Feher, A., Manzoli, J. E., Moura, J. A., Moura, E. S., & Silva, C. P. G. (2008). Development and production of radioactive sources used for cancer treatment in Brazil. *Nukleonika*, 53(S2), S99–S103.
- McSherry, A. (2013, August 12). *Calculus Tools for Android* (Version 1.2.1) [Software]. Retrieved from http://market.android.com/details?id=com.andymc.derivative&feature=search_result.

2015 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2015
 São Paulo, SP, Brazil, October 4-9, 2015
 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA NUCLEAR - ABEN
 ISBN: 978-85-99141-06-9

A DOSIMETRIC SURVEY OF THE DC1500/25/04 ELECTRON BEAM PLANT INSTALLED AT IPEN-CNEN/SP

**Florent Kuntz¹, Elizabeth S. R. Somessari², Carlos G. da Silveira², Carmen C. Bueno²,
 Wilson A. P. Calvo², Célia M. Napolitano², Josemary A. C. Gonçalves², Samir L.
 Somessari²**

¹ Aérial, Centre de Ressources Technologiques, Parc d'Innovation,
 250, Rue Laurent Fries, B.P. 40443, F-67412 Illkirch, France
florent.kuntz@aerial-crt.com

² Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN / CNEN - SP)
 Av. Professor Lineu Prestes 2242
 05508-000 São Paulo, SP
esomessar@ipen.br, cgsilvei@ipen.br, ccbueno@ipen.br, wapcalvo@ipen.br, cmnapoli@ipen.br,
josemary@ipen.br, somessar@ipen.br.

Keywords: Dosimetry, Electron Beam Accelerator, Alanine, EPR spectrometer

ABSTRACT

In this work we describe a dosimetric survey of the DC1500/25/04 electron beam accelerator installed in the Intense Sources of Radiation Laboratory at IPEN/CNEN-SP. As this accelerator has been used for innumerable applications in radiation processing, product surface and internal doses must be targeted and controlled via the beam energy, beam current, scan width and conveyor speed. The study was carried out in order to observe the current performances of the irradiation plant using Alanine (ESR) and CTA (UV Spectrophotometry) dosimeters. Energy (Electron penetration in material) calculations, scanning width/length, homogeneity and irradiation uniformity were evaluated according to ISO/ASTM 51649, as well as process uncertainty establishment [1, 2].

1. INTRODUCTION

Since was installed in 1978 at the Intense Sources of Radiation Laboratory (IPEN/CNEN-SP), the JOB 188 type electron beam accelerator from IBA Industrial has been used for innumerable applications, such as sterilization of medical, pharmaceutical and biological products, treatment of industrial and domestic effluents and sludge, preservation and disinfection of foods and agricultural products, lignocellulosic material irradiation as a pre-treatment to produce ethanol bio-fuel, decontamination of pesticide packing, solid residues remediation, organic compounds removal from wastewater, treatment of effluent from petroleum production units, crosslinking of foams, wires and electric cables, composite and nanocomposite materials and carbon fibers irradiation, irradiated grafting ion-exchange membranes for fuel cells application, natural polymers and multilayer packages irradiation, and biodegradable blends production [3, 4].

For all those applications, product surface dose and internal dose must be targeted and controlled via the processing parameters as beam energy, beam current, scan width, conveyor

speed. Recently, a high precision and speed-controlled conveyor was built so as to increase the product velocity control thus, achieving better uniformity during irradiations. With the aim of implement a Secondary Standard Dosimetry Laboratory, some important technical aspects have been evaluated. One of them is the characterization of the Electron Beam plant in terms of Operational Qualification (OQ) according to ISO/ASTM 51649, described in this work [5].

2. MATERIALS AND METHODS

As the electron energy spectrum and the average beam current are the most important characteristics that influence the absorbed dose, several duties were performed to characterize the Electron Beam plant in terms of Operational Qualification (OQ) according to ISO/ASTM 51649: measurement of EBeam energy with stack technique in Polystyrene (PS), depth dose distribution in PS, wood, carton and cork, effect of aluminum scattering foil on dose distribution, linearity test Surface Dose vs Current/Speed, linearity test Surface Dose vs number of pass, scan length and scan uniformity of 1.5 MeV EBeam, surface dose uniformity in travel direction (conveyor direction).

Dosimetry for the studies listed above was realized by using mainly optical and EPR dosimetry systems. The EPR spectrometer, a MS-400 from Aerial, is a free radical measurement tool which is used to determine absorbed dose with Alanine pellets. The Spectrophotometer/GEX or Spectrophotometer/CTA dosimetry systems were used to measure surface dose with single chip dosimeters or to determine dose profiles with strips of CTA [6, 7, 8].

Dynamitron DC1500/25/04 type electron beam accelerator (EBA-model JOB 188) was manufactured by IBA Industrial (Radiation Dynamics, Inc.) and installed in the Intense Sources of Radiation Laboratory at IPEN/CNEN-SP in 1978. The technical specifications of the EBA are summarized in Table 1.

Table 1 - Technical specifications of electron beam accelerator model JOB 188, dynamitron DC1500/25/04 type, manufactured by IBA Industrial.

Parameter	Value
Energy	0.5 to 1.5 MeV
Beam current	0.3 to 25.0 mA
Beam scanning	60 to 120 cm
Beam width	25.4 mm
Frequency	100 Hz

3. RESULTS

3.1. Energy of electron beam accelerator and depth-dose distributions

For electron energies of few MeV it is well established that depth-dose measurements with a stack of polystyrene plates can be used to determine the electron beam energy. Both electron beam energy and depth-dose evaluation in homogeneous materials were performed/done using the stack procedure, where plates of reference materials were arranged one on top of another, placed in-between with dosimeter films of CTA (280 nm). Figure 1 presents the

results obtained with this technique for plates of polystyrene (PS), density 1.025, 0.100 g/cm² per plate, target energy of 1.5 MeV and the distance from window 17 cm. It can be seen that the practical electron range (Rp) is 0.6 g/cm². The ISO/ASTM 51649 standard gives a relation formula between Rp and electron energy (E) in polystyrene in the range between 0.3 and 2.0 MeV as below:

$$E = 1.972 \times R_p + 0.245 \quad (1)$$

For $R_p = 0.6$ g/cm², one can calculate $E = 1.43$ MeV. The same measurements were done for wood, density 0.78, 0.131 g/cm² per plate; carton, plates density 0.60, 0.108 g/cm² per 2 plates and cork plates density 0.345, 0.088 g/cm² per plate. Placed on the same graph (Figure 2), all depth dose curves exhibit similar shape and similar practical electron range of about 0.6 g/cm².

Figure 1: Depth dose curve in PS at target energy of 1.5 MeV and the distance from window 17 cm (CTA dosimeters).

Figure 2: Depth dose curve in PS, wood, carton and cork at target energy of 1.5 MeV and the distance from window 17 cm (CTA dosimeters).

3.2. Linearity test Surface Dose vs Current/Speed

As part of the calibration of the electron beam plant, the relation between the surface dose at the center of the beam and the average beam current/conveyor speed ratio was studied for a 1.5 MeV electron energy positioning a PMMA plate with locations for 4 alanine pellets 17 cm distant from the window. Current and conveyor speeds used are given in the Table 2 below.

Table 2 - Current and conveyor speeds used in the linearity test. Expected doses are displayed where X is the dose in kGy delivered for current/speed = 1 mA.min/m.

	1mA	3mA	6mA	10mA	15mA
3 m/min	X/3 kGy	X kGy	2X kGy	(10/3)X kGy	5X kGy
6 m/min	X/6 kGy	X/2 kGy	X kGy	(10/6)X kGy	2.5X kGy
10 m/min	X/10 kGy	3X/10 kGy	6X/10 kGy	X kGy	1.5X kGy

Figures 3 and 4 depicted the results obtained for the surface dose versus current/speed and its residuals, respectively.

Figure 3: Surface dose (kGy) at 17 cm from window (Alanine) according to current/speed ratio in mA.min/m.

Figure 4: Residual plot (%) according to current/speed ratio in mA.min/m.

A linear relationship between surface dose derived from Alanine dosimeter readings and the current/Speed ration has been demonstrated in equation 2.

$$\text{Dose surface (kGy)} = 7.0 \times \text{Current/ Speed (mA.min/m)} \quad (2)$$

The residual plot in Figure 4 shows the spread of the data around this linear model and reveals an overall standard deviation (1sigma) of 3.1%. This value can be used as the irradiation uncertainty on the surface dose to a product when measured with Alanine dosimeters. It represents the combined uncertainty of the irradiation process and the reproducibility of alanine dose measurements. Thus, the relationship can be written as follows:

$$\text{Dose surface (kGy)} = 7.0 \pm 0.4 (k=2) \times \text{Current/ Speed (mA.min)} \quad (3)$$

3.3. Scan width, spot size (length) and scan uniformity

The EBeam shape coming out of the scanner can be characterized through 3 relevant parameters: (a) scan width; (b) scan homogeneity and (c) centering of the electron beam. These parameters were evaluated for 1.5 MeV energy beam through a CTA dosimeter strip of 1.3 m length placed on top of a wood bar, 1.3 m length, positioned parallel to the scanning horn on the tray. The distance from window was 17 cm and scanning width of 1 m. The dosimeter was readout with a Dos'ASAP equipment (Figure 5) which allows measuring the strip in a continuous mode. All of the 3 parameters of interest have been derived from the recorded dose profile provided by Dos'ASAP as follows in Figure 6.

Figure 5: Dos'ASAP equipment (Aerial®) measuring the strip in a continuous mode.

Figure 6: Beam shape (dose profile) along the scanning.

As expected, the scan width is measured to be about 1.02 m long (distance between red cursors). Irradiation uniformity across the tray (70 cm) of the conveyor (CV% of the yellow cursor zone) is evaluated to be -10% to +30% from the average delivered dose. The middle of the EBeam is out of center of scanner by about 17 mm towards the left hand side. Those results show that the products to be irradiated must be placed in the center of the tray where the surface dose is the most homogeneous. For products larger than 35 cm, one can expect a surface dose variation higher than +/- 5 % (minimum to maximum)

For the spot size (Beam length) test, the wood bar with CTA strip has been irradiated for several seconds in static mode across the beam. The result is shown in Figure 7 below. At a distance of 17 cm from the window, where the CTA strip has been placed, the beam length at half maximum (FWHM) has been evaluated being FWHM = 7.0 cm.

Figure 7: Surface dose profile in travel direction.

3.4. Linearity test Surface Dose vs Number of pass

This test was performed by irradiating a PMMA plate with locations for 4 alanine pellets with 1.5 MeV target energy, 17 cm distance from window and scanning width of 1 m. The results obtained presented in Table 3 and Figure 8 confirm that multiple pass under the EBeam with proportionally less current will conduct to the same surface dose.

Table 3: Current and conveyor speeds used in the linearity test, as well as the alanine readouts.

Speed (m/min)	Current (mA)	Number pass	Surface Dose (kGy)
3	12.5	1	31.6 +/- 0.4
3	6.25	2	29.7 +/- 0.8
3	4.16	3	31.3 +/- 0.6
3	3.13	4	30.4 +/- 0.4
6	12.5	2	31.4 +/- 0.5
6	8.3	3	30.4 +/- 0.5
6	6.25	4	30.6 +/- 0.6

For this test, the tolerated dose limits indicated with red lines are defined as the average of the measured doses $\pm 6.2\%$ (see 3.2).

Figure 8: Linearity Dose vs number of pass

This graph shows that all measured data points are positioned between the two limits corresponding to the uncertainty of the EBeam process and alanine dosimeter reproducibility.

4. CONCLUSIONS

The work presented reflects the tests performed in DC1500/25/04 electron beam accelerator at IPEN-CNEN/SP during IAEA expert mission with the aim of qualify implement a Secondary Standard Dosimetry Laboratory for Brazil and South America. Based on the calibrated EPR/Alanine dosimetry system, qualified EBeam plant and calibrated gamma sources (yet to be done), the counterpart benefits now from the necessary tools to provide accredited dose measurements to its customers. The accreditation of this laboratory to the dose measurement between 10 Gy and 50 kGy with EPR/Alanine system for gamma and high energy EBeams (10 MeV) following ISO 17025 is under way.

ACKNOWLEDGMENTS

The collaboration of Eng. Helio A. Paes, from accelerator staff, is highly acknowledged. This work was partially supported by Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) under contract nº 310493/2009-9.

REFERENCES

1. Radiation Dynamics, Inc., *Operation's Instruction Manual for the Dynamitron Electron Accelerator DC1500/25/4*, RDI (1974).

2. Standard Practice for Dosimetry in an Electron Beam Facility for Radiation Processing at Energies Between 300 keV and 25 MeV - ISO / ASTM51649 - 15
3. International Atomic Energy Agency; International Irradiation Association. Industrial Electron Beam Processing, IAEA, IIA (2010).
4. Cleland, M.R.. *Industrial Applications of Electron Accelerators*. IBA Industrial, Inc., Edgewood, New York, USA.
5. Radiation Dynamics, Inc.. *General Dynamitron Introductory Manual*, RDI (1994).
6. K. Farah, F. Kuntz, O. Kadri, L. Ghedira; Investigation of the effect of some irradiation parameters on the response of various types of dosimeters to electron irradiation - Radiation Physics and Chemistry 71 (2004) 337–341.
7. Radiation Processing – Dosimetry - Aérial, Centre de Ressources Technologiques, Parc d'Innovation, 250, Rue Laurent Fries, B.P. 40443, F-67412 Illkirch, France. Home page: <http://www.aerial-crt.com/en/radiation.htm> - june-2015
8. EPR spectrometer, a MS-400 Technical Manual User.

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

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