



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**Desenvolvimento e construção de sistema automatizado para controle de qualidade
na produção de sementes de iodo-125**

João Augusto Moura

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

Orientadora:

**Profa. Dra. Maria Elisa Chuery Martins
Rostelato**

**São Paulo
2015**

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

**Desenvolvimento e construção de sistema automatizado para controle de qualidade
na produção de sementes de iodo-125**

João Augusto Moura

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

Orientadora:

**Profa. Dra. Maria Elisa Chuery Martins
Rostelato**

Versão Corrigida

**São Paulo
2015**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa, meus filhos e meus pais.

Agradecimentos

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

Ao Dr. Wilson Parejo Calvo, diretor administrativo do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, pelo valioso apoio prestado a todo o grupo de braquiterapia, e na execução deste trabalho.

Ao M.Sc. Samir Somessari, gerente de produtos e serviços do Centro de Tecnologia das Radiações, pelas discussões sobre os sistemas de automação.

À Dra. Maria Elisa Chuery Martins Rostelato, pela orientação, pelo incentivo e preciosa amizade.

Ao Dr. Carlos Alberto Zeituni, pela valiosa ajuda no planejamento e avaliação dos experimentos.

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

Ao Eng^o Francisco Edmundo Springer pela valiosa colaboração na elaboração dos projetos mecânicos.

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

Ao Dr. Osvaldo Luiz da Costa, pelas discussões e colaboração.

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 IPEN, pelo apoio e auxílio durante realização deste trabalho.

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

À Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo apoio financeiro no projeto de pesquisa.

DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE SISTEMA AUTOMATIZADO PARA CONTROLE DE QUALIDADE NA PRODUÇÃO DE SEMENTES DE IODO-125

João Augusto Moura

RESUMO

As sementes de iodo-125 são fontes radioativas seladas utilizadas no tratamento de câncer. A semente é composta de uma cápsula de titânio lacrada, contendo em seu interior um fio de prata em cuja superfície se encontra o radioisótopo iodo-125. Uma das etapas da produção de sementes é a realização de ensaios de estanqueidade em todas as sementes produzidas, para garantir que o radioisótopo esteja contido no invólucro de titânio, sem vazamento para o meio externo. Este trabalho apresenta o desenvolvimento, construção e simulação de um sistema automatizado para a realização dos ensaios de estanqueidade nas sementes de iodo-125 a serem produzidas no IPEN, de acordo com a norma ISO 9978, resultando em um conjunto com características inéditas, aplicado a esse processo. O sistema é controlado por computador e utiliza dispositivos eletromecânicos para a realização das várias fases do ensaio de estanqueidade, diminuindo a fadiga operacional e aumentando a confiabilidade dos resultados. Foram desenvolvidos, projetados e construídos diversos dispositivos para colocação e retirada de líquidos em tubos plásticos, lavagem por ultrassom e posicionamento de tubos contendo água em detector de radiação para medidas de atividade radioativa. Foi desenvolvida uma programação de automação para controle de todo o sistema e foram desenvolvidas telas gráficas em computador para a sua operação. O sistema foi exaustivamente testado com simulações operacionais, comprovando sua funcionalidade no processamento das sementes de iodo.

DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR QUALITY CONTROL IN THE IODINE-125 SEEDS PRODUCTION

João Augusto Moura

ABSTRACT

Iodine-125 seeds are a type of sealed radioactive sources, largely applied in cancer treatment. This seed consists of a titanium capsule with silver wire inside, containing the radioisotope iodine-125 in its surface. One of the steps in the seeds production is the leakage test. This essay needs to be performed in all produced seeds, to ensure there is no radioisotope leakage from inside the capsule. This work consisted in the development, construction and simulation of an automated system to perform the leak test, following the ISO 9978 standard, applied to the seeds that will be produced at IPEN. As a result, this thesis generated an innovative and unique equipment to process iodine seeds. All functions are computer controlled and executed by a set of electromechanically actuated devices, avoiding operator fatigue, improving safety and reliability of the essay. Several devices were developed, projected and constructed, to deliver and withdrawn liquid from a plastic tube, to make ultrasound cleaning, to ensure correct tube positioning and to detect radioactivity in water samples. The whole system, as a part of the quality assurance process, is controlled by a computer program, also created as a result of this thesis. Clear graphic screens were instituted in the program to allow easy operator interface. The system was thoroughly tested, demonstrating its functionality in the seeds production process.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Câncer.....	15
1.2 Câncer de próstata.....	16
1.3 Sementes de iodo-125.....	18
1.4 Processo de produção de sementes de iodo-125.....	20
2. OBJETIVOS.....	21
2.1 Objetivos específicos.....	21
3. ORIGINALIDADE.....	22
4. REVISÃO DA LITERATURA.....	23
4.1 Braquiterapia.....	23
4.2 Sementes de iodo-125.....	23
4.3 Norma ISO 9978 – ensaios de estanqueidade.....	24
4.4 Métodos de ensaios por imersão descritos na norma ISO 9978.....	27
4.5 Estudos realizados anteriormente.....	28
4.5.1 Escolha do método de ensaio por imersão mais adequado.....	28
4.5.2 Limpeza superficial das sementes de iodo-125.....	28
4.5.3 Estudo do processamento manual de grandes quantidades de sementes..	31
4.5.4 Ensaio de estanqueidade em lotes de sementes.....	34
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
5.1 Dispositivos desenvolvidos e operações planejadas.....	36
5.1.1 Tubo de poliestireno para processamento de sementes.....	36
5.1.2 Dispositivo automático de fornecimento dos tubos.....	37
5.1.3 Suporte dos tubos no banho de ultrassom.....	38
5.1.4 Dispositivo transportador de tubos.....	38
5.1.5 Dispositivo para colocação de água nos tubos plásticos.....	39
5.1.6 Dispositivo de retirada de água dos tubos.....	40
5.1.7 Transferência da água de imersão das sementes para a medida de atividade.....	41
5.1.8 Dispositivo de posicionamento automático do tubo no detector de radiação.....	42

5.1.9 Tratamento das sementes aprovadas e reprovadas.....	42
5.1.10 Fluxograma representativo do processo de ensaio de estanqueidade.....	43
5.2 Materiais e equipamentos utilizados na construção do sistema automatizado.....	44
5.2.1 Caixa de contenção (<i>glove-box</i>).....	44
5.2.2 Banho de ultrassom.....	45
5.2.3 Controlador digital de temperatura.....	46
5.2.4 Motor de passo e módulos eletrônicos para controle do motor.....	47
5.2.5 Cilindros e válvulas pneumáticas.....	48
5.2.6 Controlador Lógico Programável.....	49
5.2.7 Materiais elétricos e mecânicos diversos.....	51
5.2.8 Computador utilizado como terminal de programação e estação de operação.....	51
5.2.9 Medidor de radiação.....	52
5.2.10 Dispensador de água.....	53
5.3 Programas e aplicativos utilizados no desenvolvimento do sistema automatizado.....	53
5.3.1 Aplicativo para a programação do Controlador Lógico Programável.....	53
5.3.2 Aplicativo para a programação dos módulos de controle de motores de passo.....	54
5.3.3 Aplicativo para a programação da interface gráfica da estação de operação.....	55
5.4 Simulação operacional do sistema.....	56
5.5 Estimativa de incerteza das medições.....	57
5.6 Estratégias de segurança e tratamento das possíveis falhas.....	57
6 RESULTADOS.....	59
6.1 Banho de ultrassom.....	59
6.2 Dispositivo automático de fornecimento dos tubos.....	60
6.3 Suporte para tubos no banho de ultrassom.....	62
6.4 Controle do nível de água do banho de ultrassom.....	66
6.5 Dispositivo transportador de tubos.....	68
6.5.1 Verificação da uniformidade no posicionamento dos tubos.....	70
6.6 Dispositivo para colocação de água no tubo.....	72
6.7 Dispositivo para retirada de água dos tubos.....	73

6.7.1 Escolha da ponteira do dispositivo para retirada de água.....	73
6.7.2 Avaliação da eficiência na retirada de água dos tubos.....	76
6.7.3 Avaliação da possibilidade de transferência de contaminação entre tubos causada pelo dispositivo de retirada de água.....	78
6.8 Dispositivo posicionador de tubos no detector de radiação.....	80
6.8.1 Estudo da influencia do posicionamento do tubo na medida de atividade..	82
6.9 Estrutura de automação do sistema.....	86
6.10 Interface gráfica operacional.....	89
6.11 Programa de automação do sistema.....	94
6.11.1 Bloco de programa principal.....	94
6.11.2 Bloco de programa de colocação dos tubos no suporte do banho de ultrassom.....	94
6.11.3 Bloco de programa de lavagem e imersão das sementes.....	95
6.11.4 Bloco de programa de medida de atividade.....	95
6.12 Simulação operacional do sistema.....	96
6.13 Tratamento dos rejeitos sólidos e líquidos.....	101
6.14 Estratégias de segurança e tratamento das possíveis falhas.....	102
6.14.1 Falhas de equipamento.....	102
6.14.2 Falhas de operação.....	103
6.14.3 Falha no fornecimento de energia elétrica.....	105
6.14.4 Falha no suprimento de ar comprimido, vácuo e sucção.....	105
7. CONCLUSÃO.....	107
TRABALHOS FUTUROS.....	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110

LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 1: Escolha do método de ensaio para sementes de iodo-125.....	26
TABELA 2: Resultado do arraste de sementes.....	74
TABELA 3: Valores de massa dos tubos com sementes e água remanescente.....	77
TABELA 4: Valores de atividade da água nos tubos nº 2 e nº 3.....	79
TABELA 5: Resultados de medida de atividade nos ensaios estático e dinâmico.....	85
TABELA 6: Tempos de execução parciais e totais nas simulações operacionais.....	100

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 1: Tipos de câncer mais incidentes entre os homens (2014).....	15
FIGURA 2: Tipos de câncer mais incidentes entre as mulheres (2014).....	16
FIGURA 3: Localização da próstata ⁴	16
FIGURA 4: Representação de um implante de sementes de iodo-125.....	17
FIGURA 5: Desenho esquemático da semente a ser produzida pelo IPEN.....	19
FIGURA 6: Valores de atividade remanescentes na água após cada uma das lavagens das sementes contaminadas com iodo-131.....	29
FIGURA 7: Nível de água no banho e no interior do tubo durante a lavagem das sementes.....	30
FIGURA 8: Realização manual de ensaios de estanqueidade no interior de capela com exaustão.....	32
FIGURA 9: Posicionamento do operador junto à caixa de contenção (a) e vista superior do ambiente operacional (b).....	33
FIGURA 10: Manuseio de pipeta com as luvas plumbíferas (a) e a colocação de água nos tubos plásticos (b).....	33
FIGURA 11: Tubo plástico contendo lote de 50 sementes inativas.....	34
FIGURA 12: Tubo de poliestireno utilizado. Dimensões em milímetros.....	37
FIGURA 13: Esboço do dispositivo automático de fornecimento de tubos.....	37
FIGURA 14: Banho de ultrassom com os tubos plásticos posicionados em um suporte.....	38
FIGURA 15: Representação esquemática da operação de transporte e posicionamento dos tubos no suporte do banho de ultrassom.....	39
FIGURA 16: Representação do dispositivo para colocação de água nos tubos...40	40
FIGURA 17: Representação da operação de retirada de água dos tubos.....	40
FIGURA 18: Transferência manual de água entre tubos.....	41
FIGURA 19: Representação esquemática do posicionamento do tubo no detector.....	42
FIGURA 20: Fluxograma do processo de ensaio de estanqueidade.....	44
FIGURA 21: Vista externa da caixa de contenção (a) e desenho da área interna (b).....	45
FIGURA 22: Banho de ultrassom modelo LS-12DA.....	46

FIGURA 23: Controlador de temperatura modelo N1200.....	47
FIGURA 24: Motor de passo utilizado.....	47
FIGURA 25: Modulo eletrônico de controle do motor de passo.....	48
FIGURA 26: Cilindro pneumático utilizado.....	49
FIGURA 27: Bloco de válvulas eletropneumáticas.....	49
FIGURA 28: CPU modelo 224 utilizada na automação do sistema.....	50
FIGURA 29: Módulo de extensão conectado à CPU modelo 224.....	50
FIGURA 30: Computador utilizado como estação de operação.....	51
FIGURA 31: Medidor CRC-15W conectado ao detector tipo poço de iodeto de sódio e à impressora (a) e detalhe da instalação do medidor CRC-15W do lado externo da caixa de contenção (b).....	52
FIGURA 32: Dispensador Eppendorf modelo Varispenser plus.....	53
FIGURA 33: Tela gráfica do aplicativo Microwin SP4 Step 7 V4.0.....	54
FIGURA 34: Tela gráfica do aplicativo Si Programmer V2.5.7.....	55
FIGURA 35: Tela de programação do aplicativo Indusoft Web Studio V6.1.....	56
FIGURA 36: Distribuição dos equipamentos dentro da caixa de contenção.....	59
FIGURA 37: Cuba do banho de ultrassom após as modificações.....	60
FIGURA 38: Gabinete elétrico do banho de ultrassom montado na parte externa da caixa de contenção.....	60
FIGURA 39: Dispositivo automático de fornecimento de tubos.....	61
FIGURA 40: Esquema do dispositivo automático de fornecimento de tubos.....	61
FIGURA 41: Sequencia de movimentos do dispositivo de fornecimento de tubos.....	62
FIGURA 42: Suporte de tubos com mecanismo de fixação por mola.....	63
FIGURA 43: Suporte de tubos com inserto de borracha.....	63
FIGURA 44: Imagem do suporte montado no banho de ultrassom (a) e imagem dos tubos inseridos no suporte (b).....	64
FIGURA 45: Suporte de tubos com sensor óptico e as marcações de posição “zero’ e posição do tubo nº 1.....	65
FIGURA 46: Posicionamento dos três sensores ópticos que detectam a presença de tubos.....	65
FIGURA 47: Trava mecânica do suporte de tubos acionada (a) e recolhida (b)...	66
FIGURA 48: Imagem da trava mecânica do suporte de tubos.....	66

FIGURA 49: Esquema do indicador de nível (a) e imagem do indicador de nível (b).....	67
FIGURA 50: Imagem do bocal de abastecimento do banho de ultrassom.....	67
FIGURA 51: Representação do dispositivo transportador.....	68
FIGURA 52: Sequencia de movimentos do transportador de tubos.....	69
FIGURA 53: Descida da pinça para agarrar o tubo (a), subida da pinça com o tubo (b) e inserção do tubo no suporte de tubos do banho de ultrassom (c).....	70
FIGURA 54: Representação da altura (h) do tubo em relação à superfície do suporte no banho de ultrassom.....	71
FIGURA 55: Resultados das medidas de altura (h), com destaque para o valor máximo e valor mínimo.....	71
FIGURA 56: Esquema de funcionamento do dispositivo para colocação de água no tubo.....	72
FIGURA 57: Imagem do dispositivo executando o enchimento de um tubo.....	73
FIGURA 58: Tipos de ponteiros avaliadas quanto ao arraste de sementes.....	73
FIGURA 59: Conjunto para avaliação das ponteiros de sucção de água.....	74
FIGURA 60: Arraste de semente ocasionado pela ponteira de pipeta.....	74
FIGURA 61: Desenho do dispositivo para retirada de água.....	75
FIGURA 62: Dispositivo de retirada de água sobre o tubo (a) e no interior do tubo (b).....	75
FIGURA 63: Arranjo para experimento de retirada de água.....	76
FIGURA 64: Sucção sequencial realizada nos três tubos.....	78
FIGURA 65: Dispositivo posicionador do tubo no detector de radiação.....	80
FIGURA 66: Sequencia de movimentos do posicionador de tubos.....	81
FIGURA 67: Retirada do tubo com água do seu suporte (a), transporte do tubo (b) e colocação do tubo com água no detector de radiação (c).....	82
FIGURA 68: Arranjo para variação do posicionamento vertical do tubo no detector de radiação.....	83
FIGURA 69: Valores da atividade obtidos variando-se a posição vertical do tubo em relação ao fundo do detector.....	83
FIGURA 70: Posicionamento automático do tubo no detector de radioatividade..	84
FIGURA 71: Estrutura de automação do sistema.....	86

FIGURA 72: Distribuição física dos componentes da automação.....	87
FIGURA 73: Vistas frontal (a) e traseira (b) do painel eletroeletrônico.....	87
FIGURA 74: Estação de operação.....	88
FIGURA 75: Estação remota de operação.....	88
FIGURA 76: Tela inicial da interface operacional.....	90
FIGURA 77: Tela de colocação dos tubos no suporte do banho de ultrassom.....	90
FIGURA 78: Tela de lavagem e imersão das sementes.....	91
FIGURA 79: Tela de medição de atividade.....	91
FIGURA 80: Sinalização correspondente à etapa de lavagem das sementes.....	93
FIGURA 81: Tela de manutenção da estação de operação.....	93
FIGURA 82: Desajuste no posicionamento do tubo.....	97
FIGURA 83: Sensor óptico e ajuste de posição.....	98
FIGURA 84: Válvulas de ajuste de velocidade.....	99

1 INTRODUÇÃO

1.1 Câncer

O câncer é um problema de saúde pública mundial. A Organização Mundial da Saúde (OMS) estimou que, no ano 2030, podem-se esperar 27 milhões de casos de câncer¹. No Brasil, os dados do último período avaliado mostram o câncer como a segunda causa de mortes por doenças, depois das doenças do sistema circulatório².

As estimativas do Instituto Nacional do Câncer - INCA são publicadas a cada dois anos e a última, publicada em 2014, estimou para o ano de 2015 a ocorrência de 576.580 novos casos de câncer no Brasil, sendo 302.350 para o sexo masculino e 274.230 para o sexo feminino.

Excetuando-se o câncer de pele não melanoma, entre os homens o câncer de próstata é o mais incidente com 68.800 casos (FIG. 1)³ e entre as mulheres o mais incidente é o câncer de mama com 57.120 casos (FIG. 2)³.

Fonte: INCA/MS.

Localização Primária	Casos Novos	%
Próstata	68.800	22,8%
Traqueia, Brônquio e Pulmão	16.400	5,4%
Cólon e Reto	15.070	5,0%
Estômago	12.870	4,3%
Cavidade Oral	11.280	3,7%
Esôfago	8.010	2,6%
Laringe	6.870	2,3%
Bexiga	6.750	2,2%
Leucemias	5.050	1,7%
Sistema Nervoso Central	4.960	1,6%
Linfoma não-Hodgkin	4.940	1,6%
Pele Melanoma	2.960	1,0%
Linfoma de Hodgkin	1.300	0,4%
Glândula Tireoide	1.150	0,4%
Todas as Neoplasias sem pele*	203.930	
Todas as Neoplasias	302.350	



FIGURA 1: Tipos de câncer mais incidentes entre os homens (2014)³.

Fonte: INCA/MS.

Localização Primária	Casos Novos	%
Mama feminina	57.120	20,8%
Cólon e Reto	17.530	6,4%
Colo do útero	15.590	5,7%
Traqueia, Brônquio e Pulmão	10.930	4,0%
Glândula Tireoide	8.050	2,9%
Estômago	7.520	2,7%
Corpo do útero	5.900	2,2%
Ovário	5.680	2,1%
Linfoma não-Hodgkin	4.850	1,8%
Leucemias	4.320	1,6%
Sistema Nervoso Central	4.130	1,5%
Cavidade Oral	4.010	1,5%
Pele Melanoma	2.930	1,1%
Esôfago	2.770	1,0%
Bexiga	2.190	0,8%
Linfoma de Hodgkin	880	0,3%
Laringe	770	0,3%
Todas as Neoplasias sem pele*	190.520	
Todas as Neoplasias	274.230	

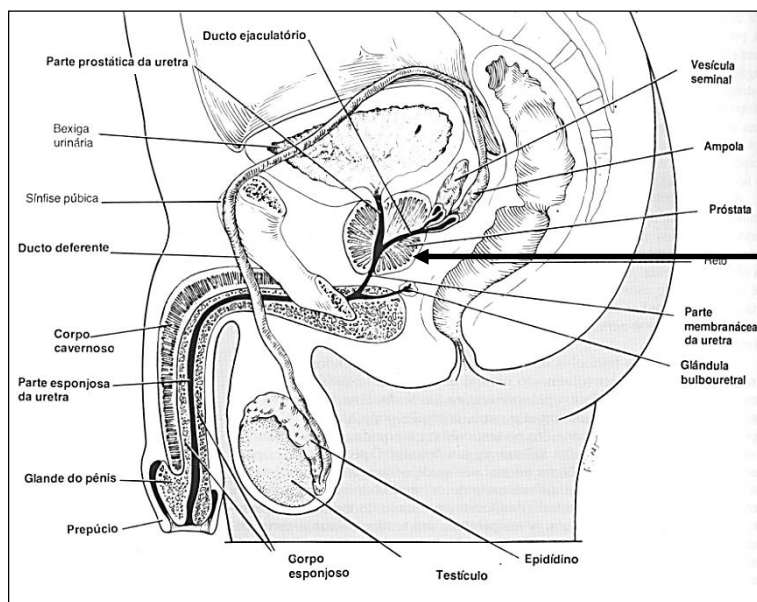


FIGURA 2: Tipos de câncer mais incidentes entre as mulheres (2014)³.

1.2 Câncer de próstata

A glândula prostática é um órgão localizado logo abaixo da bexiga urinária⁴, conforme mostrado na FIG. 3⁴.

Fonte: Spence, A.P. Anatomia humana.



PRÓSTATA

FIGURA 3: Localização da próstata⁴.

Na próstata ocorrem distúrbios benignos, que afetam 80% a 90% dos homens acima de 40 anos de idade⁵. Outro distúrbio que afeta a próstata é o câncer de próstata, que apresenta uma grande incidência no Brasil³.

Uma vez detectado, o tumor de próstata pode ser tratado de várias formas, entre elas a cirurgia e a radioterapia, dependendo do estágio e agressividade da doença bem como de fatores individuais do paciente^{6,7}. A cirurgia é um procedimento bastante invasivo e requer um pós-operatório longo e desconfortável para o paciente⁸.

O tratamento por radioterapia pode ser de dois tipos. Na teleterapia, feita com feixe de radiação externo, a próstata bem como os tecidos da região vizinha recebem um feixe de radiação proveniente de um acelerador de elétrons ou de uma fonte radioativa. O outro tipo de radioterapia é denominado braquiterapia, e consiste na colocação de pequenas fontes radioativas seladas chamadas sementes junto ao tumor. Para o tratamento do câncer de próstata utilizam-se sementes contendo o radioisótopo iodo-125. Dessa maneira, a região alvo do tratamento recebe alta dose de radiação, sendo essa dose reduzida sensivelmente nos tecidos circunvizinhos saudáveis^{9,10,11}. Na FIG. 4 é mostrada a representação de um implante de sementes de iodo-125¹².

Fonte: www.aboutcancer.com

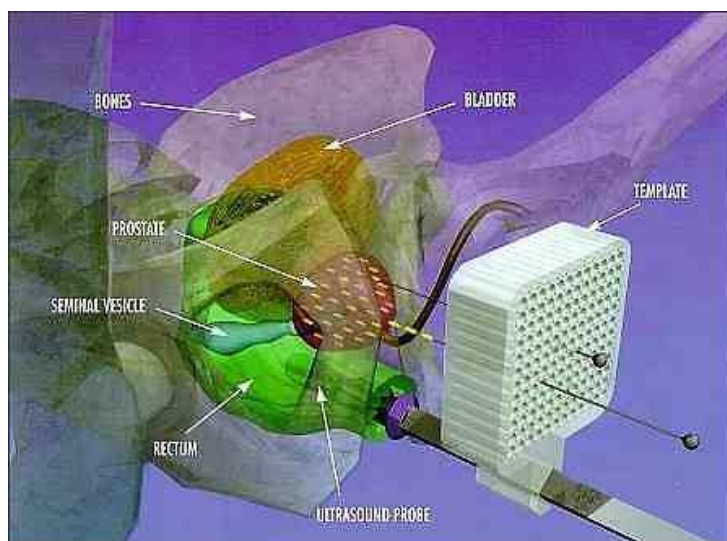


FIGURA 4: Representação de um implante de sementes de iodo-125¹².

1.3 Sementes de iodo-125

O iodo-125 pode ser produzido em reator nuclear a partir do gás xenônio- ^{124}Xe ¹³ por meio da reação nuclear de captura radioativa $^{124}\text{Xe}(n,\gamma)^{125(m+g)}\text{Xe}$, cuja seção de choque para neutros térmicos (0,0253 eV) perfaz 165 ± 11 barn¹⁴.

O núcleo produto Xe-125g decai com meia vida de 16,9 horas gerando diretamente o iodo-125, enquanto o núcleo produto Xe-125m primeiro decai com meia-vida de 57 segundos para Xe-125g, o qual, por sua vez, decai gerando o iodo-125¹⁵. O decaimento do iodo-125 é acompanhado da emissão de fótons de 27 keV, 31 keV e 35 keV^{15,16} e possui uma meia-vida de 59,4 dias¹⁷. O alvo pode ser o ^{124}Xe enriquecido (99,99%) ou o xenônio natural, em cuja composição encontra-se o isótopo ^{124}Xe na proporção de 0,096%¹⁸.

O uso de sementes de iodo-125 no tratamento do câncer de próstata vem acontecendo no Brasil, em hospitais e clínicas particulares. No tratamento da próstata, cada implante utiliza entre 80 a 120 sementes. Uma vez que não existem fabricantes no Brasil, a totalidade das sementes utilizadas é importada a custos elevados, onerando o tratamento e dificultando sua disponibilização para hospitais da rede pública.

Para diminuir esse custo e viabilizar a implantação do tratamento no sistema público de saúde, foi feito um estudo e desenvolvida uma nova tecnologia de fabricação de sementes de iodo-125, pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP). Estimativas da classe médica indicam uma demanda mensal de 8000 sementes, a ser suprida pela produção nacional. Devido à sua originalidade, essa tecnologia dispensa o pagamento de *royalties* aos fabricantes estrangeiros, além de diminuir o custo de fabricação¹⁹.

Atualmente encontra-se em fase de desenvolvimento o laboratório para produção das sementes de iodo-125, no Centro de Tecnologia das Radiações (CTR) do IPEN/CNEN-SP. As sementes a serem produzidas pelo IPEN empregam como invólucro um tubo de titânio de 4,5 mm de comprimento, 0,8 mm de diâmetro externo e parede de 0,05 mm. No interior do tubo é introduzido um fio de prata com 0,5 mm de diâmetro e 3 mm de comprimento, contendo o iodo-125 fixado.

Após a introdução do fio de prata contendo o iodo-125, as extremidades do tubo de titânio são soldadas, selando o material radioativo no interior do tubo e permitindo a passagem da radiação para o meio externo. A escolha do titânio se deve à suas características mecânicas e sua biocompatibilidade^{20,21}. As dimensões da cápsula e as demais características dessa semente coincidem com as do modelo utilizado atualmente no Brasil (OncoSeed ¹²⁵I, modelo 6711)²², facilitando sua introdução e aceitação no mercado nacional. Este modelo de semente de iodo-125, como todos os modelos existentes, deve atender a requisitos gerais de segurança e de classificação para fontes radioativas seladas, utilizando-se para isso a norma ISO 2919²³. Deve também ter seus parâmetros dosimétricos medidos e calculados na fase de desenvolvimento ou quando houver qualquer alteração na produção^{24,25,26}. Na FIG. 5 é mostrado o desenho esquemático da semente de iodo-125 a ser produzida pelo IPEN¹⁹.

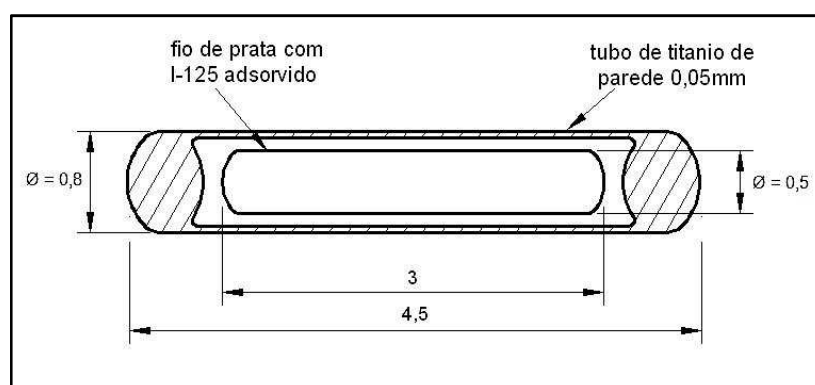


FIGURA 5: Desenho esquemático da semente a ser produzida pelo IPEN¹⁹.
Dimensões em milímetros.

Durante os trabalhos de desenvolvimento deste novo modelo de semente de iodo-125, diversas metodologias foram criadas e aperfeiçoadas. O método de fixação do iodo-125 no fio de prata, que é utilizado na primeira etapa da produção, foi desenvolvido no Centro de Tecnologia das Radiações em 2005¹⁹. Posteriormente, em 2012, esse método foi aprimorado obtendo melhores resultados de adsorção do iodo-125 na prata²⁷.

A metodologia utilizada na etapa de soldagem das sementes também foi desenvolvida no Centro de Tecnologia das Radiações, inicialmente utilizando a

tecnologia de solda por plasma^{28,29}. Após diversos estudos e adequações, outro método para soldagem foi estabelecido, utilizando a tecnologia de solda a laser³⁰.

1.4 Processo de produção de sementes de iodo-125

Para se produzir esta semente de iodo-125 são necessárias várias operações, resumidas em quatro etapas:

- Etapa de fixação do iodo-125 no fio de prata. Nesta etapa, os núcleos (fios) de prata com 0,5 mm de diâmetro e 3,0 mm de comprimento recebem tratamento químico, sendo o iodo-125 aderido à superfície do núcleo de prata;
- Etapa de soldagem. O tubo de titânio de diâmetro externo 0,8 mm e parede de 0,05 mm tem uma das extremidades fechada por solda. O núcleo de prata com o iodo-125 previamente fixado em sua superfície é introduzido no tubo pela extremidade aberta. Finalmente a segunda extremidade é fechada por solda, selando o núcleo radioativo no interior da cápsula de titânio e isolando o material radioativo do meio externo;
- Etapa de ensaio de estanqueidade. Este ensaio é necessário para garantir que a fonte selada não apresente vazamento de material radioativo para fora da cápsula de titânio³¹, o que resultaria na sua dispersão no meio ambiente ou no corpo do paciente. A norma “Radiation protection – sealed radioactive sources – leakage test methods” - ISO 9978³² orienta quanto à realização desses ensaios, que são o objeto deste trabalho.
- Etapa de medição de atividade. Após aprovadas no ensaio de estanqueidade, as sementes tem sua atividade medida individualmente e são separadas por faixas de atividade.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento e construção de um sistema automatizado para controle de qualidade, por meio de ensaios de estanqueidade, em sementes de iodo-125 para braquiterapia.

2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- Projeto e construção dos dispositivos eletromecânicos necessários para a realização do ensaio de estanqueidade;
- Desenvolvimento de automação de movimentos dos diversos dispositivos eletromecânicos e integração entre os mesmos, utilizando programas e equipamentos eletrônicos específicos para automação;
- Desenvolvimento de interface gráfica para permitir a interação entre o operador e o sistema automatizado, utilizando programa específico para interface gráfica operacional;
- Avaliação do desempenho do sistema automatizado por meio da simulação operacional.

3 ORIGINALIDADE

A revisão bibliográfica sobre o assunto não apresentou número significativo de publicações. Os trabalhos publicados a respeito referem-se a experimentos de laboratório com abrangência limitada a ensaios com sementes de iodo-125. O conteúdo desses trabalhos, no que se refere aos ensaios de estanqueidade, é restrito a citações sobre a utilização da norma aplicável nos ensaios de estanqueidade de fontes seladas (ISO 9978).

Este trabalho orientou-se pela norma ISO 9978 no desenvolvimento de um sistema automatizado aplicado aos ensaios de estanqueidade, como parte do processo de produção de sementes de iodo-125 utilizadas para o tratamento do câncer de próstata, visando atender à demanda do país.

As dimensões minúsculas dessas fontes radioativas e as exigências de radioproteção exigem especial atenção^{33,34,35} e a alta demanda de produção inviabiliza o processamento das sementes de forma manual.

Este sistema utiliza componentes eletromecânicos e dispositivos que foram desenvolvidos, projetados e construídos exclusivamente para esta aplicação e utiliza controle de automação computadorizado cuja programação foi desenvolvida para esta aplicação, como também foi desenvolvida a programação para uma interface gráfica operacional, permitindo ao operador interagir com o sistema durante o processo. Todas essas características conferem a este trabalho o caráter original e inovador.

O desenvolvimento de um sistema automatizado para ensaios de estanqueidade apresenta-se como alternativa viável tecnicamente, mas também apresenta vantagens no aspecto econômico, utilizando-se sempre que possível equipamentos nacionais, de custo reduzido e fácil aquisição, desonerando o projeto e os futuros custos de manutenção do sistema. O domínio dessa tecnologia proporcionará a redução do custo das sementes utilizadas no Brasil, representando um benefício para a sociedade brasileira.

4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 Braquiterapia

A descoberta da radioatividade no final do século passado abriu espaço para o desenvolvimento da braquiterapia, um importante recurso para o tratamento do câncer³⁶. A braquiterapia é um tratamento com a fonte de radiação em contato ou em grande proximidade aos volumes-alvo tumorais. Esta proximidade possibilita que a radiação vá diretamente ao tumor, sem ultrapassar os tecidos normais³⁷.

As fontes seladas encapsuladas em metais como aço inoxidável ou titânio podem ser posicionadas interna ou externamente à lesão, em tratamentos superficiais, intracavitários ou intersticiais. Os implantes radioativos podem ser temporários ou permanentes, dependendo da localização da lesão e do radioisótopo utilizado. Estudos de radiobiologia mostraram que uma das vantagens da braquiterapia é que se pode liberar altas doses de radiação em curto intervalo de tempo. O tumor é abrangido pela radiação e os tecidos sadios, ao redor da lesão, recebem uma dose mínima resultando numa razão terapêutica mais eficiente que aquela obtida com a teleterapia³⁸.

4.2 Sementes de iodo-125

As sementes de iodo-125 surgiram em 1967, com a patente de Lawrence³⁹, sob o título *Therapeutic metal seed containing within a radioactive isotope disposed on a carrier and method of manufacture*. Os primeiros estudos utilizando as sementes de iodo-125 foram realizados no *Memorial Sloan-Kettering Câncer Center*, nos Estados Unidos, em 1972, pelo grupo de Whitmore⁴⁰. Os primeiros relatórios foram favoráveis quanto à redução da incontinência urinária e da impotência, porém evidenciaram que o método não permitia uma distribuição uniforme da dose de radiação na próstata, além do que a avaliação da qualidade do implante foi seriamente questionada. Com a evolução na prostatectomia radical (retirada da próstata) e o refinamento da técnica de irradiação com feixe externo, diminuiu o interesse pela braquiterapia.

A partir de 1983, avanços tecnológicos renovaram o interesse pela braquiterapia prostática. As novas tecnologias como o ultrassom transretal e a tomografia computadorizada, que proporcionaram imagens e medidas detalhadas do tamanho e formato da próstata, facilitaram o planejamento, a colocação precisa das sementes e estimularam o uso dessa técnica. A distribuição das sementes no órgão pode ser verificada após o implante por tomografia computadorizada ou raios-X⁴¹. Durante a última década, diversos desenvolvimentos importantes em fontes radioativas seladas têm relação com aplicações médicas, incluindo fontes de iodo-125 para tratamento do câncer oftálmico e da próstata, entre outros.

A literatura sobre o desenvolvimento de novos protótipos de sementes para braquiterapia relata experimentos em que o substrato de prata é submetido a diferentes processos para a fixação do iodo-125, incluindo a adsorção. A homogeneidade da distribuição do iodo sobre o fio de prata é um item importante na qualidade do produto final, necessitando ser avaliado⁴².

Na próxima etapa, de soldagem da cápsula de titânio, são necessários posicionamentos mecânicos precisos devido às pequenas dimensões dessa cápsula⁴³ e para realizar a solda, diversas tecnologias podem ser utilizadas, incluindo a solda TIG (*tungsten inert gás*), solda microplasma⁴⁴ e solda a laser⁴⁵.

Após a soldagem são efetuados ensaios de estanqueidade para garantir a ausência de vazamentos. Foram relatados ensaios de estanqueidade em sementes de iodo-125 utilizando métodos de imersão a 20°C durante 24 horas e imersão a 50°C por 5 horas^{46,47}.

4.3 Norma ISO 9978 – ensaios de estanqueidade

A norma ISO 9978³² trata de ensaios de estanqueidade em fontes radioativas seladas e se aplica na validação dos protótipos de fontes durante o seu desenvolvimento, no controle de qualidade durante a sua produção e nas inspeções periódicas dessas fontes, realizadas a intervalos regulares durante sua vida útil (quando aplicável). A norma ISO 9978 descreve os diferentes métodos de ensaio e orienta na escolha do método aplicado a cada tipo de fonte, apresentando algumas definições importantes, descritas abaixo.

- Fonte radioativa selada:

Material radioativo permanentemente selado em uma ou várias cápsulas e/ou associado a um material ao qual se encontra preso. Essa cápsula ou material devem ser resistentes o suficiente para manter a ausência de vazamento na fonte selada, sob as condições de uso e desgaste para as quais foi projetada.

- Cápsula:

Invólucro de proteção normalmente feito de metal, utilizado para prevenir o vazamento de material radioativo.

- Ausência de vazamento:

Termo aplicado a fontes seladas que, após serem submetidas aos ensaios de estanqueidade foram consideradas isentas de vazamento, segundo o critério estabelecido pela norma.

- Fontes *Dummy*:

Fontes seladas idênticas àquelas que se deseja ensaiar, porém sem material radioativo.

- Fontes seladas simuladas:

Fontes seladas idênticas àquelas que se deseja ensaiar, porém contendo apenas traços do material radioativo a ser utilizado.

A TAB. 1 foi extraída da norma ISO 9978 e contém a orientação para a escolha do método de ensaio a ser utilizado, dependendo do tipo de fonte selada que se deseja ensaiar.

TABELA 1: Escolha do método de ensaio para sementes de iodo-125

Tipo de fonte		Testes para produção de fontes		Testes para classificação de fontes	
		Preferido	2ª opção	Preferido	2ª opção
A	Fontes seladas contendo material radioativo	Imersão (5.1)	Vazamento (5.3)	Imersão (5.1)	Vazamento (5.3)
A1	Janela única e fina, por exemplo detectores de fumaça				
A2	Fontes de referencia de baixa atividade, por exemplo, encapsuladas em plástico				
A3	Fontes encapsuladas uma ou duas vezes (excluindo trítio e rádio) para medição, radiografia e braquiterapia	Imersão (5.1) Hélio (6.1)	Bolhas (6.2)	Imersão (5.1) Hélio (6.1)	Bolhas (6.2)
A4	Fontes encapsuladas uma ou duas vezes de rádio e outras fontes gasosas	Emanação gasosa (5.2)	Imersão (5.1)	Emanação gasosa (5.2)	Imersão (5.1)
A5	Fontes encapsuladas duas vezes para teleterapia e fontes de alta atividade de irradiação	Hélio (6.1)	Vazamento (5.3.2)	Imersão (5.1) Hélio (6.1)	Bolhas (6.2)
B	Fontes seladas simuladas dos tipos A3, A4 e A5			Imersão (5.1) Hélio (6.1)	Bolhas (6.2)
C	Fontes seladas tipo "Dummy"			Hélio (6.1)	Bolhas (6.2)

Fonte: Norma ISO 9978³².

As fontes para braquiterapia são denominadas com o código A3, e os métodos de ensaio preferidos tanto para validação como para o controle de qualidade na produção são os de imersão (5.1) ou de hélio (6.1). Os números em parênteses referem-se aos itens da norma.

O ensaio com gás hélio para que seja válido, necessita que o volume interno livre da fonte selada seja igual ou maior que 0,1 cm³. A semente de iodo-125 possui volume interno livre de apenas 0,0014 cm³. Sendo assim este tipo de ensaio não pode ser utilizado, restando os ensaios que utilizam o método de imersão.

Na execução do ensaio de estanqueidade por imersão, inicialmente a semente recém-soldada deve ser submetida a uma limpeza superficial, cujo objetivo é retirar quaisquer traços de material radioativo em sua superfície externa

que eventualmente possam estar presentes após a etapa de soldagem da semente.

A semente é então imersa em água por um determinado período de tempo e a uma determinada temperatura. Após o período de imersão, a água é retirada e sua atividade será medida. Caso o valor de atividade da água esteja abaixo do limite de 185 Bequerel (Bq), equivalente a 5 nano Curie (nCi) estabelecido na norma ISO 9978, a semente será aprovada e liberada para utilização. Caso o valor de atividade esteja acima do limite, a semente será reprovada.

4.4 Métodos de ensaios por imersão descritos na norma ISO 9978

- **Ensaio de imersão em líquido aquecido a 50° C**

Imergir a fonte selada em líquido aquecido a 50° C \pm 5° C e manter nessa temperatura por pelo menos 4 horas. Remover a fonte selada e medir a atividade do líquido remanescente.

- **Ensaio de imersão em líquido aquecido a 70° C**

Imergir a fonte selada em um líquido aquecido o líquido a 70° C \pm 5° C e manter nessa temperatura por pelo menos 30 minutos com aplicação simultânea de ultrassom. Remover a fonte selada e medir a atividade do líquido remanescente.

- **Ensaio de imersão com líquido fervente**

Imergir a fonte selada em um líquido fervente por 10 minutos, deixar esfriar, então enxaguar a fonte em líquido frio. Repetir essa sequência mais duas vezes, utilizando sempre o mesmo líquido original. Remover a fonte selada e medir a atividade desse líquido.

- **Ensaio de imersão com líquido cintilador**

Colocar a fonte selada por pelo menos 3 horas em temperatura ambiente, em solução líquida cintiladora. Guardar longe de luz para prevenir fotoluminescência. Remover a fonte selada e medir a atividade do líquido utilizando técnica de contagem com líquido cintilador.

- **Ensaio de imersão em temperatura ambiente**

Imergir a fonte selada em um líquido em temperatura ambiente ($20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$). Manter em imersão por 24 horas. Remover as fontes seladas e medir a atividade do líquido.

- **Critério de aprovação**

A fonte selada será considerada isenta de vazamento se a atividade medida no líquido não exceder 185 Bq (5n Ci).

4.5 Estudos realizados anteriormente

Durante o mestrado realizado por este autor no Centro de Tecnologia das Radiações, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP)⁴⁸ foram realizados diversos experimentos relativos aos ensaios de estanqueidade e estudos sobre a norma ISO 9978, cujos resultados são utilizados neste trabalho.

4.5.1 Escolha do método de ensaio por imersão mais adequado

Foram executados e avaliados os métodos de ensaio de estanqueidade por imersão recomendados pela norma ISO 9978. Essa avaliação determinou como método mais simples e conveniente para ser utilizado no processo produtivo, o que utiliza para a imersão das sementes água em temperatura ambiente ($20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$), por um período de 24 horas. Também como conclusão dessa avaliação foi acrescentada a aplicação de ultrassom nos primeiros 10 minutos do período de imersão das sementes. Essa melhoria excede a exigência da norma ISO 9978 e aumenta a sensibilidade na detecção de falhas de estanqueidade das sementes⁴⁸.

4.5.2 Limpeza superficial das sementes de iodo-125

Este estudo definiu os parâmetros referenciais de limpeza superficial das sementes de iodo-125, para serem utilizados durante os ensaios de

estanqueidade, tendo por base a norma ISO 9978. Foi simulada a contaminação superficial das sementes, utilizando-se iodo-131, porque sua formulação química é a mesma do iodo-125 (iodeto de sódio), a sua meia-vida é de apenas 8 dias¹⁷ e é produzido no IPEN.

A simulação consistiu em colocar 37×10^6 Bq (1 mCi) de iodo-131 na forma de iodeto de sódio, em um tubo contendo um lote de sementes inativas (sem material radioativo no núcleo) e 2 mL de água destilada. O valor de contaminação adotado (1 mCi) equivale ao vazamento de todo o material radioativo de uma semente utilizada no tratamento de câncer de próstata⁴⁹ durante a operação de soldagem da semente.

Após a contaminação superficial das sementes foram feitas diversas lavagens com água em um banho de ultrassom. Após cada uma das lavagens foi retirada a água de lavagem e sua atividade foi medida. As lavagens foram realizadas colocando-se de água destilada no tubo contendo as sementes com aplicação de ultrassom por 10 minutos.

As sementes foram consideradas limpas quando a atividade detectada ficou abaixo do limite de 185 Bq (5 nCi) estipulado pela norma ISO 9978. Na FIG. 6 são mostrados os valores de atividade remanescentes na água após cada uma das lavagens.

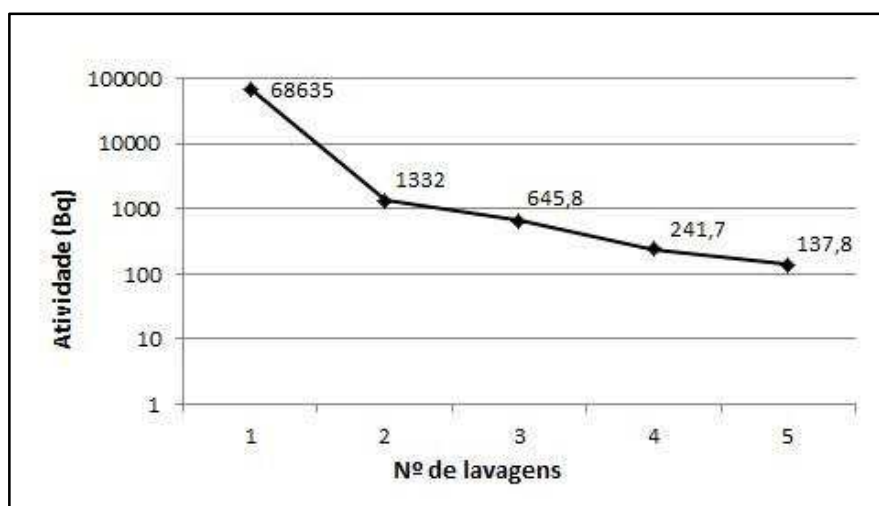


FIGURA 6: Valores de atividade remanescentes na água após cada uma das lavagens das sementes contaminadas com iodo-131⁴⁸.

Para se atingir o valor de atividade desejado na água foram necessárias cinco operações de lavagem, utilizando 2 mL de água em cada lavagem e aplicando o ultrassom por 10 minutos. O volume de água (2 mL) foi estabelecido para que após o posicionamento do tubo contendo sementes no interior da cuba do banho e o preenchimento do tubo com água, o nível resultante no interior do tubo estivesse abaixo do nível da água do banho de ultrassom. Dessa maneira ocorre uma transferência de energia satisfatória do banho de ultrassom para o interior do tubo, possibilitando ainda manipular o tubo utilizando-se o restante de sua altura. Na FIG. 7 é mostrado esquematicamente esse arranjo.

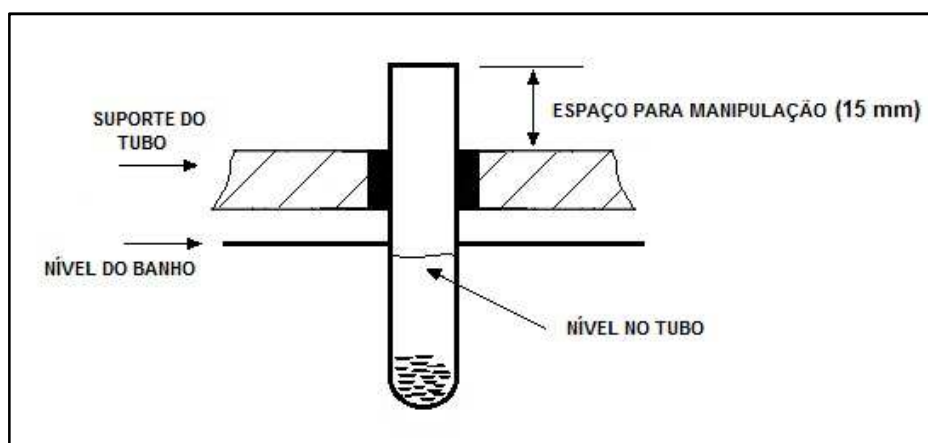


FIGURA 7: Nível de água no banho e no interior do tubo durante a lavagem das sementes.

Alterações no volume de água das lavagens interferem nas dimensões do tubo e em todos os demais requisitos do projeto, tais como dimensões de componentes mecânicos, equipamentos, utilização do espaço interno da caixa de contenção e sistemas de sucção. Devido a essas implicações foi fixado o volume de água em 2 mL, variando-se o número de lavagens consecutivas até se atingir a condição de limpeza superficial das sementes.

Para o procedimento de imersão das sementes foi estabelecido o mesmo volume de água (2 mL), uma vez que não há na norma ISO 9978 orientação quanto ao volume a ser utilizado na lavagem ou na imersão das fontes. Após o período de imersão a água é transferida na sua totalidade para a medida de atividade, independentemente do volume utilizado.

O tempo de 10 minutos para a lavagem no banho de ultrassom foi estipulado com uma grande margem de segurança, uma vez que os experimentos não demonstraram grande melhora no resultado da lavagem com tempo de aplicação de ultrassom superior a 5 minutos.

Os resultados desse experimento (volume de água a ser utilizado, tempo de lavagem e número de lavagens) foram adotados como orientação para os procedimentos de limpeza superficial de sementes a serem realizados nos futuros experimentos e desenvolvimentos, e também foram adotadas como referência as dimensões do tubo plástico utilizado.

Posteriormente, outro estudo realizado no IPEN utilizou este método para limpeza superficial de sementes durante a produção de um lote experimental de sementes ativas (com núcleo de prata contendo iodo-125), obtendo resultado satisfatório na limpeza superficial das sementes após 4 lavagens consecutivas³⁰.

4.5.3 Estudo do processamento manual de grandes quantidades de sementes

Inicialmente todas as etapas do ensaio de estanqueidade foram realizadas manualmente, desde a colocação e retirada de água para a lavagem das sementes até a transferência da água de imersão das sementes para a medida da atividade. O número de sementes ensaiadas manualmente foi de 150. Os estudos foram realizados utilizando-se uma capela com exaustão e filtros na saída de ar para o ambiente. Na FIG. 8 é mostrada uma imagem das operações sendo realizadas manualmente no interior da capela.



FIGURA 8: Realização manual de ensaios de estanqueidade no interior de capela com exaustão.

Surgiu a hipótese de realizar ensaios de estanqueidade em escala de produção manualmente, e para avaliar essa possibilidade foram realizadas simulações dentro da caixa de contenção.

Nesta simulação de produção, tomando-se como limite a área interna da caixa de contenção e do equipamento de lavagem por ultrassom disponíveis, foram posicionados 30 tubos plásticos em um suporte no interior do banho de ultrassom. Ao redor do banho de ultrassom foram dispostos os demais utensílios necessários ao ensaio. Para realizar todas as etapas do ensaio nos 30 tubos foram necessárias 6 horas de manuseio de pipetas e tubos, além do período de imersão de 24 horas quando os tubos contendo as sementes com a água de imersão permaneceram em repouso. Resultou em 350 operações de colocação e retirada de água dos tubos, utilizando-se pipeta manual. Essas operações foram realizadas sem material radioativo, utilizando-se as luvas de borracha plumbífera para acesso ao interior da caixa de contenção (*glove-box*) onde serão realizados os ensaios. Na FIG. 9 são mostrados o posicionamento do operador junto à caixa de contenção durante as simulações operacionais (a) e a vista superior do ambiente operacional (b).



(a)

(b)

FIGURA 9: Posicionamento do operador junto à caixa de contenção (a) e vista superior do ambiente operacional (b).

Na FIG. 10 é mostrada a operação manual em andamento, destacando o manuseio de pipeta com as luvas plumbíferas (a) e a colocação de água nos tubos plásticos (b).



(a)

(b)

FIGURA 10: Manuseio de pipeta com as luvas plumbíferas (a) e a colocação de água nos tubos plásticos (b).

Foi então comprovado que esse processo, quando realizado manualmente, apresenta muitas dificuldades devido à grande quantidade de operações repetitivas, provocando fadiga excessiva e possíveis lesões no operador. Além disso, ficam comprometidas a confiabilidade e a repetitividade das operações,

devido ao esgotamento físico resultante. Para viabilizar a realização desses ensaios nas sementes foi necessário projetar, montar e adequar um sistema automático, diminuindo drasticamente as operações manuais no interior da caixa de contenção.

4.5.4 Ensaio de estanqueidade em lotes de sementes

Durante o processo produtivo a quantidade de sementes a serem submetidas ao teste é muito grande para que sejam ensaiadas individualmente, como realizado nestes estudos. Para que se obtenha uma produtividade adequada podem-se juntar várias sementes em um tubo, formando um lote a ser ensaiado de uma só vez. Na FIG. 11 é mostrado, como exemplo, um tubo plástico contendo um lote de 50 sementes inativas (sem material radioativo).



FIGURA 11: Tubo plástico contendo lote de 50 sementes inativas.

Pequenos lotes de sementes diminuem a produtividade do ensaio, porém em caso de reprovação do lote, um número menor de sementes será segregado. Por outro lado, o aumento do tamanho dos lotes aumentará a produtividade, mas pode resultar em número significativo de sementes segregadas.

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica buscando encontrar referências sobre ensaios de estanqueidade aplicados a lotes de sementes de iodo-125 e suas implicações na produtividade e não foi encontrada literatura que contivesse essas informações.

Devido à ausência dessas informações não foi possível estabelecer o tamanho ideal dos lotes de sementes para realização do ensaio neste estágio do desenvolvimento do projeto. Entretanto, durante o processo de soldagem é realizada uma minuciosa inspeção visual em cada solda realizada, sendo descartadas as sementes que apresentarem soldas com defeitos visualmente detectáveis, diminuindo a probabilidade de ocorrer vazamento em sementes durante o ensaio de estanqueidade. Essa estratégia permite um aumento das quantidades de sementes nos lotes para ensaio, podendo-se chegar até a quantidade máxima, limitada apenas pela capacidade dos dispositivos utilizados.

Determinou-se a máxima capacidade de processamento em cada tubo plástico e para que sejam viabilizadas futuras adequações, o sistema desenvolvido apresenta flexibilidade quanto ao tamanho do lote de sementes, respeitando-se a capacidade máxima determinada.

Durante o processo de soldagem, as sementes prontas são colocadas em tubos formando os lotes de sementes. O projeto do sistema inclui um contador ajustável no programa de automação, permitindo escolher o número de sementes desejado em cada lote. Uma vez que o número de sementes programado foi colocado em um tubo, o sistema emite um alerta para que um novo tubo comece a ser preenchido. Posteriormente, em rotina produtiva, os dados estatísticos de rejeição serão analisados e o número de sementes do lote poderá ser alterado.

Utilizando-se um tubo do modelo escolhido para os ensaios, descrito adiante neste trabalho, foi possível a colocação de até 70 sementes por lote. Esse limite está relacionado ao nível resultante no interior de um tubo após a colocação de água para as operações de lavagem e imersão das sementes.

Nos ensaios iniciais em produção, como medida de segurança, os lotes de sementes deverão ser limitados a 10 sementes ou menos, avaliando-se o comportamento geral dos processos de soldagem em conjunto com os resultados do ensaio de estanqueidade. Posteriormente esse número poderá ser aumentado gradativamente, de acordo com o desempenho do processo produtivo.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Dispositivos desenvolvidos e operações planejadas

Para realizar devidamente todas as etapas necessárias ao ensaio de estanqueidade das sementes de iodo-125 com a mínima intervenção do operador, foram planejadas as operações e realizados os desenvolvimentos que estão descritos a seguir.

5.1.1 Tubo de poliestireno para processamento de sementes

Para realização do ensaio de estanqueidade utilizam-se tubos de poliestireno por apresentarem boa resistência mecânica e pequena fragilidade. O modelo de tubo escolhido tem altura de 75 mm e diâmetro externo de 12 mm. A altura do tubo é suficiente para a sua manipulação e inserção no suporte para tubos, além de possibilitar a retirada do conteúdo líquido pela introdução de uma ponteira de sucção. A borda superior do tubo apresenta uma região com parede reforçada, o que garante maior segurança no fechamento com rolha e facilita operações de transporte e manipulação do tubo utilizando dispositivos automatizados. O tubo apresenta uma pequena conicidade entre a borda superior e o fundo, sendo que o diâmetro no fundo é 0,5 mm menor. Essa característica permite que o tubo seja encaixado e retirado do suporte com maior facilidade. O volume interno do tubo (aproximadamente 5 mL) permite a colocação de até 70 sementes e a quantidade de água utilizada para a lavagem e imersão das sementes (2 mL), com sobra de capacidade. O tubo é fabricado em poliestireno e as dimensões deste modelo de tubo coincidem com as dimensões do tubo utilizado nos estudos anteriores, os quais definiram os parâmetros para a limpeza superficial e a imersão das sementes⁴⁸. Foram utilizadas as características deste modelo de tubo para o projeto e desenvolvimento dos diversos dispositivos automáticos que atuam nos ensaios de estanqueidade. Na FIG. 12 é mostrada uma imagem do tubo de poliestireno utilizado.

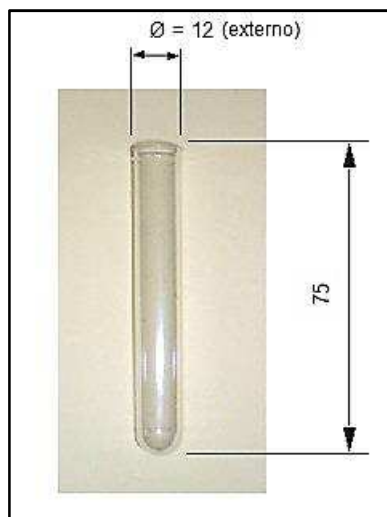


FIGURA 12: Tubo de poliestireno utilizado. Dimensões em milímetros.

5.1.2 Dispositivo automático de fornecimento dos tubos

No início do ensaio de estanqueidade, os tubos contendo as sementes devem ser colocados manualmente em um dispositivo automático. Este dispositivo, após ser energizado e inicializado, deve fornecer os tubos, um a um, para um transportador que os coloca exatamente nas posições de inserção em um suporte no banho de ultrassom. O dispositivo automático de fornecimento dos tubos deve realizar movimentos giratórios, avançando sempre que um dos tubos for retirado, e levando o próximo tubo para a posição de retirada. Na FIG. 13 é mostrado um esboço do dispositivo automático de fornecimento de tubos.

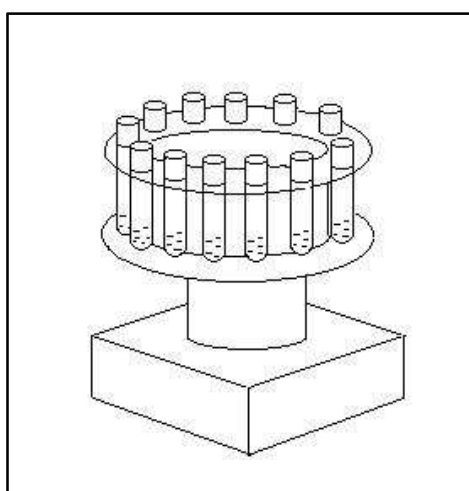


FIGURA 13: Esboço do dispositivo automático de fornecimento de tubos.

5.1.3 Suporte dos tubos no banho de ultrassom

Durante a lavagem e a imersão das sementes, os tubos que as contém devem estar posicionados no banho de ultrassom a uma determinada profundidade e diversas operações de colocação e retirada de água devem ser realizadas em todos os tubos posicionados em um suporte. Esse suporte deve possibilitar a inserção dos tubos mantendo-os firmemente fixados e deve permitir sua retirada ao final das operações. Além disso, deve proporcionar o acesso dos dispositivos de colocação e retirada de água a cada um dos tubos. Na FIG. 14 é mostrado esquematicamente o banho de ultrassom com os tubos plásticos posicionados em um suporte.

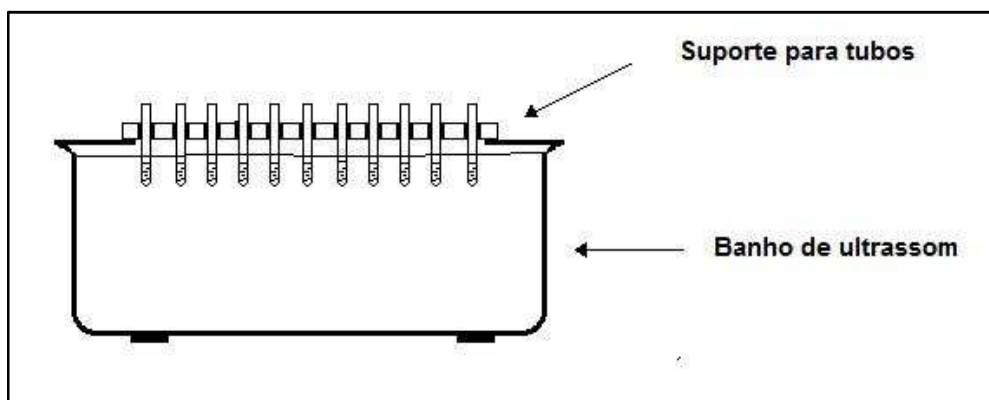


FIGURA 14: Banho de ultrassom com os tubos plásticos posicionados em um suporte.

5.1.4 Dispositivo transportador de tubos

Para fazer o posicionamento adequado dos tubos no suporte do banho de ultrassom foi necessário desenvolver um transportador que retira o tubo com as sementes do dispositivo automático de fornecimento de tubos, transportando-o e encaixando-o no suporte de tubos, no banho de ultrassom. Com o posicionamento mecanizado, o objetivo é garantir a altura dos tubos em relação ao banho, que seria mais difícil caso essa operação fosse feita manualmente. O transportador utiliza motor de passo para realizar os movimentos horizontais e cilindro pneumático para realizar os movimentos verticais. Na FIG. 15 é mostrada

esquemáticamente a operação de transporte e posicionamento dos tubos no suporte do banho de ultrassom.

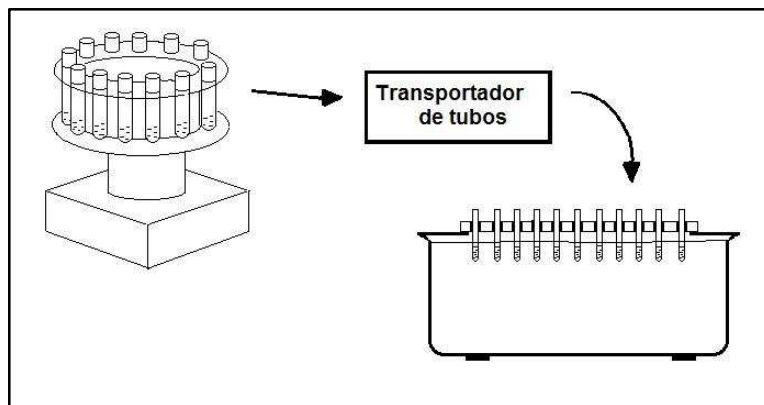


FIGURA 15: Representação esquemática da operação de transporte e posicionamento dos tubos no suporte do banho de ultrassom.

Uma vez que os três dispositivos envolvidos (transportador de tubos, fornecedor de tubos e suporte de tubos do banho) funcionaram de modo sincronizado, foi verificada a uniformidade do posicionamento dos tubos, realizando-se uma série de 10 ensaios, consistindo cada um deles em realizar o preenchimento completo do suporte de tubos do banho de ultrassom (18 tubos) e medindo-se a altura de cada tubo em relação ao suporte.

5.1.5 Dispositivo para colocação de água nos tubos plásticos

Para colocação de água nos tubos foi necessário desenvolver um mecanismo que utiliza um dispensador de água com volume ajustável e um sistema de acionamento automático. Está acoplado a um tanque de alimentação de água a ser abastecido manualmente, com capacidade de fornecimento de água para todas as etapas do ensaio de estanqueidade (lavagens e imersão).

O dispositivo está posicionado junto ao suporte de tubos, com acesso a todos os tubos posicionados no suporte para colocação de água nos mesmos. A FIG. 16 mostra uma representação do dispositivo para colocação de água nos tubos.

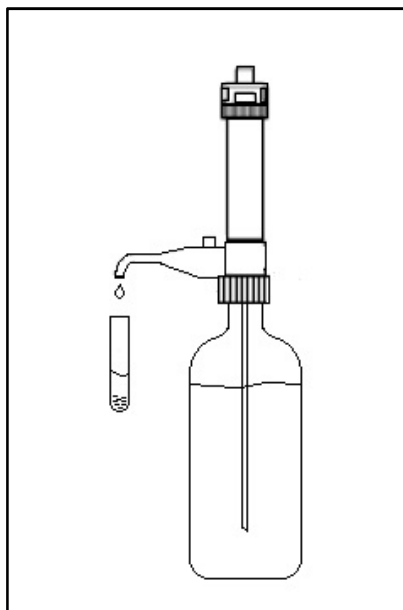


FIGURA 16: Representação do dispositivo para colocação de água nos tubos.

5.1.6 Dispositivo de retirada de água dos tubos

Durante a lavagem das sementes, após o período de aplicação de ultrassom, a água deve ser retirada dos tubos e drenada para um recipiente de armazenamento. Para tanto foi desenvolvido um dispositivo acionado automaticamente, conectado por mangueiras ao recipiente de armazenamento e a uma bomba de sucção, que é inserido nos tubos para a retirada da água. A FIG. 17 mostra uma representação da operação de retirada de água dos tubos.

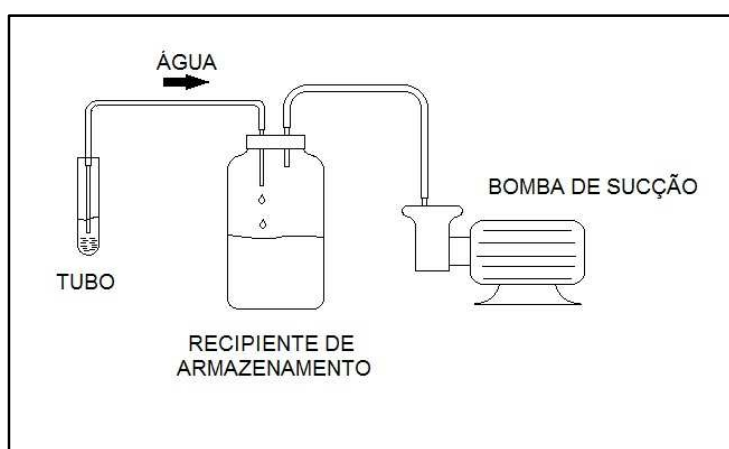


FIGURA 17: Representação da operação de retirada de água dos tubos.

Para definir esse projeto, inicialmente foram avaliadas três alternativas para as ponteiros que entram em contato com a água, quanto à possibilidade do arraste de sementes para fora dos tubos durante essa operação. Após essa definição, o dispositivo foi construído e foi submetido a dois outros ensaios:

- Avaliação da eficiência na retirada de água dos tubos;
- Avaliação da possibilidade de contaminação entre tubos causada pelo dispositivo.

5.1.7 Transferência da água de imersão das sementes para a medida de atividade

Após a lavagem das sementes e a imersão por 24 horas, a água de imersão é transferida para um tubo limpo, para que seja feita a medida de sua atividade. A transferência de água entre os tubos será feita manualmente utilizando-se uma pipeta com ponteira descartável, devido a complexidade dessa operação, que exige a troca de ponteira após cada transferência de água. Esta operação é realizada poucas vezes durante o ensaio de estanqueidade (uma única vez para cada lote de sementes) não ocasionando fadiga no operador. A operação de transferência manual de água entre tubos está representada esquematicamente na FIG. 18.

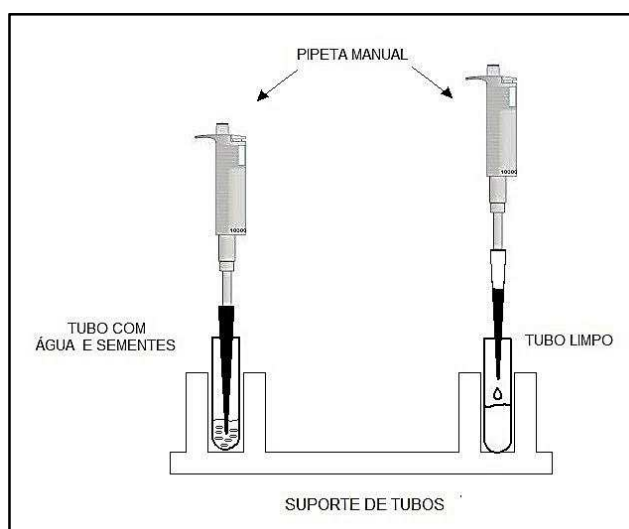


FIGURA 18: Transferência manual de água entre tubos.

5.1.8 Dispositivo de posicionamento automático do tubo no detector de radiação

Após a operação de transferência de água de imersão, o tubo contendo a água recebe uma rolha de borracha e é colocado manualmente em um suporte, sendo retirado, transportado e posicionado automaticamente no detector de radiação por um dispositivo automático desenvolvido para essa finalidade. A FIG. 19 representa esquematicamente o posicionamento do tubo no detector.

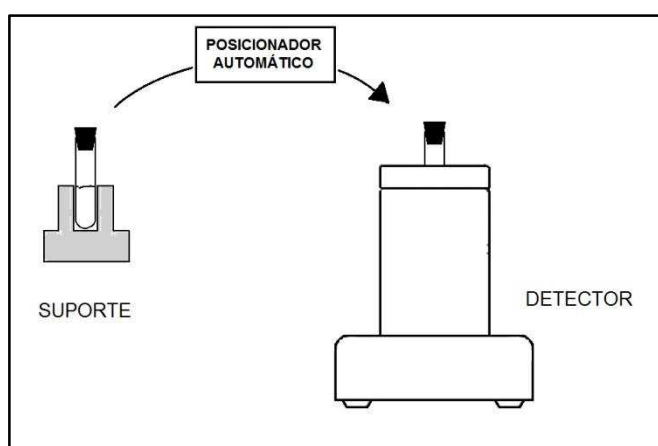


FIGURA 19: Representação esquemática do posicionamento do tubo no detector.

O dispositivo de posicionamento automático é construído com componentes eletromecânicos e apresenta uma variação no seu posicionamento que é inerente aos seus componentes, transmitindo essa variação para os tubos e sua posição no detector de radiação, podendo influenciar na medida de atividade da água. Foi realizado um estudo avaliando a influencia do dispositivo de posicionamento automático nas medidas de atividade da água.

5.1.9 Tratamento das sementes aprovadas e reprovadas

Após a medida de atividade da água de imersão, as sementes aprovadas serão acondicionadas em blindagem apropriada e retiradas da caixa de contenção para a próxima etapa de produção. As sementes reprovadas serão segregadas para posterior reprocessamento, após o término da campanha de produção em curso. Os tubos contendo os lotes de sementes reprovados

receberão uma rolha de borracha para evitar qualquer derramamento acidental, serão colocados em uma blindagem apropriada e retirados da caixa de contenção sendo armazenados em local seguro, planejado para esta finalidade.

Essa diretriz tem por objetivo minimizar a possibilidade de contaminações superficiais no interior da caixa de contenção, uma vez que o conteúdo dos tubos estará contaminado, não devendo ser manipulado no mesmo ambiente da produção rotineira.

Neste momento não é possível prever a incidência de lotes reprovados durante as rotinas de produção de sementes. Cada ocorrência em particular deverá ser analisada para determinação das possíveis causas, bem como as possíveis ações para correção do processo de produção das sementes.

A decisão de realizar novos ensaios para detectar precisamente as sementes defeituosas e aproveitar todas as sementes boas em um determinado lote dependerá de infraestrutura adicional, incluindo uma caixa de contenção específica para o reprocessamento desses lotes de sementes e disponibilidade de mão de obra operacional. Devido a esses fatores, essa decisão passa a ser administrativa.

5.1.10 Fluxograma representativo do processo de ensaio de estanqueidade

Considerando as etapas descritas anteriormente foi desenhado um fluxograma de processo que representa a execução do ensaio de estanqueidade em um lote de sementes. O fluxograma é mostrado na FIG. 20

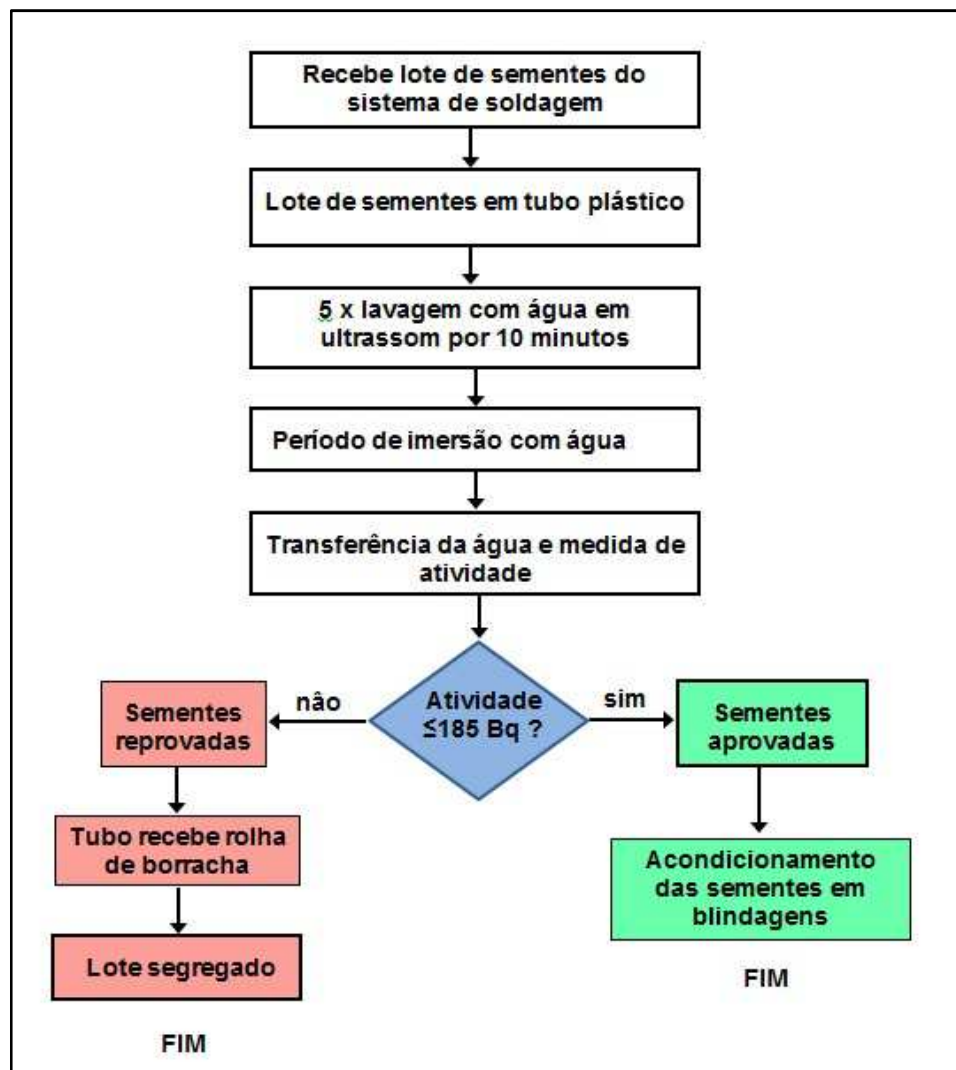


FIGURA 20: Fluxograma do processo de ensaio de estanqueidade.

5.2 Materiais e equipamentos utilizados na construção do sistema automatizado

5.2.1 Caixa de contenção (*glove-box*)

O processo de ensaio de estanqueidade deve ser realizado em ambiente fechado, dentro de uma caixa de contenção (*glove box*), construída em chapa de aço inoxidável com espessura de 3/16 polegadas (4,76 mm), que já estava disponível no início deste projeto. Essa caixa de contenção possui portas para entrada e saída de materiais e insumos, janelas transparentes, luvas em borracha plumbífera para intervenções manuais no seu interior e espaço interno para montagem do sistema para a realização dos ensaios. Em funcionamento, a caixa

possui sistemas de exaustão com filtros e entrada de ar controlada, isolando o ambiente interno da caixa e evitando a saída de contaminantes, prevenindo assim os riscos para as pessoas e meio ambiente. Na FIG. 21 é mostrada a vista externa da caixa de contenção (a) e um desenho da área interna, disponível para a instalação dos equipamentos (b)

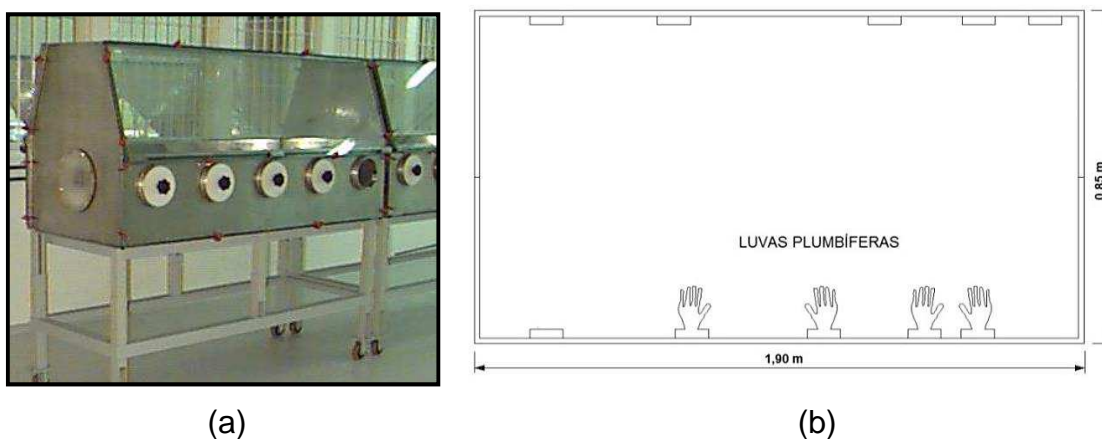


FIGURA 21: Vista externa da caixa de contenção (a) e desenho da área interna (b)

5.2.2 Banho de ultrassom

O modelo do banho de ultrassom, a ser utilizado nos ensaios de estanqueidade, foi escolhido considerando os seguintes fatores:

- Área interna disponível na caixa de contenção para montagens dos diversos equipamentos e dispositivos, o que limita o tamanho dos mesmos;
- Abertura da cuba do banho de ultrassom com área de grandes dimensões, possibilitando o posicionamento de um grande número de tubos plásticos no seu interior;
- Aquecimento da cuba permitindo controle de temperatura do banho;
- Facilidade de obtenção no mercado nacional para minimizar o custo de aquisição e facilidade para obtenção de peças e a realização de reparos.

Além desses fatores foi avaliada a possibilidade de desmembramento das partes mecânicas (cuba do banho) e da parte eletroeletrônica do equipamento. Essa divisão é necessária para permitir que os controles eletrônicos sejam

instalados fora da caixa de contenção, possibilitando fácil integração ao sistema computadorizado de automação e também futuras manutenções. Após avaliar diversos modelos de equipamentos, o escolhido foi o banho de ultrassom modelo LS-12DA da empresa EMBRASOL, mostrado na FIG. 22⁵⁰. Esse equipamento opera com frequência de 40 kHz, potência de 210 W e alimentação elétrica de 220 VAC, 60 Hz.



FIGURA 22: Banho de ultrassom modelo LS-12DA⁵⁰.

Após ser adquirido, o equipamento foi desmontado e desmembrado, com a adequação de sua carenagem em aço inox. Os circuitos eletroeletrônicos foram alojados em um gabinete a ser instalado na parte externa da caixa de contenção.

5.2.3 Controlador digital de temperatura

Para controlar a temperatura do banho de ultrassom, foi utilizado um controlador de temperatura de fabricação NOVUS modelo N1200⁵¹, conectado a um sensor termo resistivo tipo PT-100 Ohms e à resistência de aquecimento posicionada no interior da cuba do banho de ultrassom. A FIG. 23 mostra uma imagem do controlador de temperatura modelo N1200.



FIGURA 23: Controlador de temperatura modelo N1200.

5.2.4 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. Foi escolhido um único modelo de motor que atende a todas as aplicações deste desenvolvimento, fabricado pela empresa Applied Motion Products, representada no Brasil pela empresa Kalatec – Automação. Esse motor utiliza alimentação elétrica de 13,2 VDC, 0,6 A e fornece um torque de 0,80 Nm, As 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. A FIG. 24 mostra uma imagem do motor de passo utilizado.

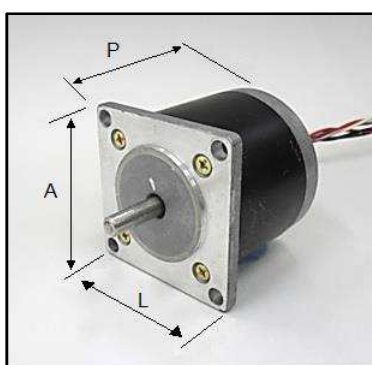


FIGURA 24: Motor de passo utilizado.

Para realizar o controle de deslocamento dos motores de passo foram utilizados módulos eletrônicos programáveis, de fabricação da empresa Applied Motion Products, modelo 1240i. Foram utilizados 4 motores de passo com seus

respectivos módulos eletrônicos, todos interligados ao controle central. A FIG. 25 ilustra o módulo de controle do motor de passo.

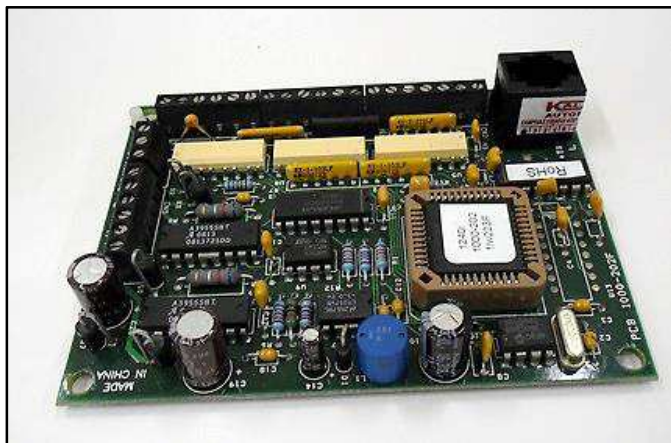


FIGURA 25: Módulo eletrônico de controle do motor de passo.

Cada módulo eletrônico controla um motor de passo e permite que seja realizada uma programação de movimentos, de acordo com a necessidade de cada aplicação⁵². Além disso, esse módulo pode ser integrado a outros equipamentos, recebendo e enviando comandos e informações sobre o posicionamento do motor que está sendo controlado por ele. Neste projeto, cada módulo de controle de motor foi interligado ao Controlador Lógico Programável (CLP), que realiza o controle centralizado de toda a automação do sistema.

5.2.5 Cilindros e válvulas pneumáticas

Para realizar os movimentos verticais dos dispositivos foram utilizados cilindros pneumáticos controlados por válvulas eletropneumáticas. O comando dos movimentos é transmitido às válvulas eletropneumáticas pelo Controlador Lógico Programável (CLP) que realiza o controle centralizado da automação do sistema. Os cilindros pneumáticos utilizados são de fabricação da empresa FESTO e possuem êmbolo com diâmetro de 8 mm e haste com comprimento de 100 mm. A FIG. 26 mostra o cilindro pneumático utilizado.

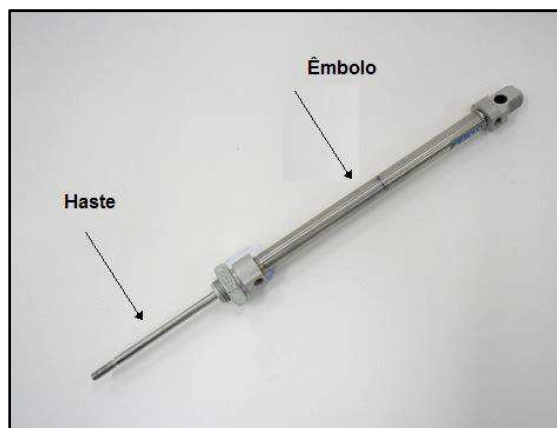


FIGURA 26: Cilindro pneumático utilizado.

Para acionamento dos cilindros pneumáticos foram utilizados blocos de válvulas eletropneumáticas de fabricação da empresa FESTO, que recebem alimentação elétrica de 24 VDC e fazem a comutação do ar comprimido para o êmbolo do cilindro pneumático, promovendo a sua movimentação. A FIG. 27 mostra o bloco de válvulas pneumáticas.

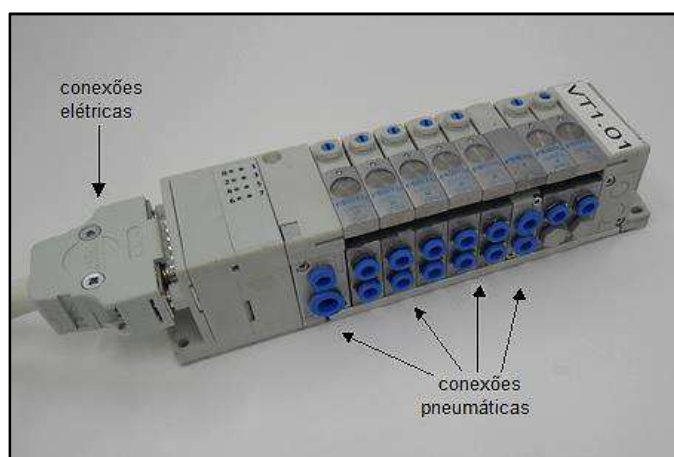


FIGURA 27: Bloco de válvulas eletropneumáticas.

5.2.6 Controlador Lógico Programável

Para realizar a função de controle central da automação de todo o sistema foi utilizado um Controlador Lógico Programável (CLP) de fabricação Siemens, da família de controladores S7-200. Esse equipamento é composto de uma Unidade Central de Processamento (CPU) do modelo 224, que se conecta a diversos outros módulos, chamados módulos de extensão, onde é feita a captação de

diversos tipos de sinais elétricos (entradas de sinais), 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), tais como lâmpadas de sinalização, placas eletrônicas para controle de motores, válvulas eletropneumáticas, entre outros⁵³. A alimentação elétrica da CPU e dos módulos de extensão é feita em 24 VDC.

A CPU executa a programação desenvolvida para esta aplicação e o tempo de execução dessa programação (tempo de ciclo) é de aproximadamente 0,001 segundo (1ms). Esse tempo de ciclo é adequado para este projeto, uma vez que os sinais de entrada e de saída relativos aos eventos do processo acontecem com a duração mínima da ordem de 0,2 segundo (200 ms), como por exemplo sinais de sensores e módulos eletrônicos de controle de motores. Dessa forma nunca ocorrerá qualquer evento tão rápido que não seja registrado e devidamente processado pela CPU do Controlador Lógico Programável. A FIG. 28 mostra uma imagem da CPU modelo 224 e a FIG. 29 mostra uma imagem de módulo de extensão conectado à CPU modelo 224.



FIGURA 28: CPU modelo 224 utilizada na automação do sistema.

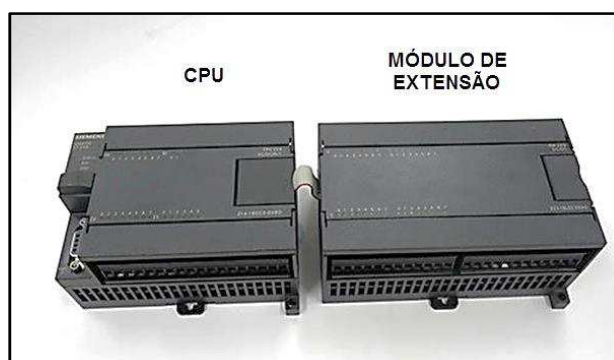


FIGURA 29: Módulo de extensão conectado à CPU modelo 224.

5.2.7 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 (Cloroeto de Polivinila), mantas de borracha, elementos de fixação (porcas, parafusos e arruelas) e adesivos, correias e polias, entre outros materiais. Para a confecção dos circuitos elétricos foram utilizados diversos componentes, tais como disjuntores, interruptores, cabos elétricos, fontes de alimentação elétrica, gabinete e painel elétrico, entre outros.

5.2.8 Computador utilizado como terminal de programação e estação de operação

Para realizar as funções de terminal de programação e estação de operação do sistema de ensaios de estanqueidade foi utilizado um computador portátil *Notebook*. Este computador é conectado por meio de interface serial aos outros equipamentos eletrônicos durante a sua utilização.

O computador utilizado é de fabricação da empresa ITAUTEC, modelo Infoway Note W7650, que utiliza frequência de *clock* de 533 MHz, tela de cristal líquido de 15,4 polegadas e resolução máxima de 1280 x 800 *pixels* com 16 milhões de cores. Possui quatro portas de conexão USB (*Universal Serial Bus*) e suas dimensões são 357 mm de largura, 271 mm de profundidade e 39 mm de altura. A FIG. 30 mostra uma imagem do computador utilizado.

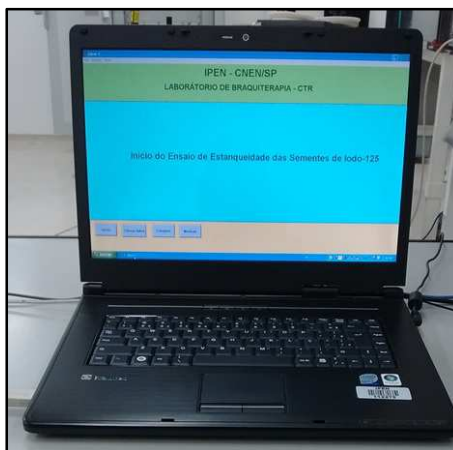


FIGURA 30: Computador utilizado como estação de operação.

5.2.9 Medidor de radiação

Para as medidas de atividade foi utilizado um medidor de radiação de marca CAPINTEC, modelo CRC-15W acoplado a um detector tipo poço de cristal de iodeto de sódio – NaI (TI), cujas dimensões são 3,8 cm (1,5 polegadas) x 4,4 cm (1,75 polegadas) ⁵⁴, com sensibilidade de 3,3 Bq (0,1 nCi) para o radioisótopo iodo-125. O detector tipo poço possui uma blindagem em chumbo de 1,3 cm de espessura para diminuir a influencia das radiações externas nas medidas efetuadas.

O medidor CRC-15W mostra os valores de radiação em um display de cristal líquido (LCD) e também permite a impressão dos resultados em uma impressora serial, acionando-se a tecla de comando “*PRINTER*”. Esse recurso permite o registro documental dos valores de atividade obtidos durante os ensaios de estanqueidade, fornecendo uma contraprova aos resultados mostrados pelo sistema automatizado e aumentando a segurança contra erros na classificação das sementes. A FIG. 31 mostra a imagem do medidor CRC-15W conectado ao detector tipo poço de iodeto de sódio e à impressora (a) e o detalhe da instalação do medidor CRC-15W do lado externo da caixa de contenção (b).

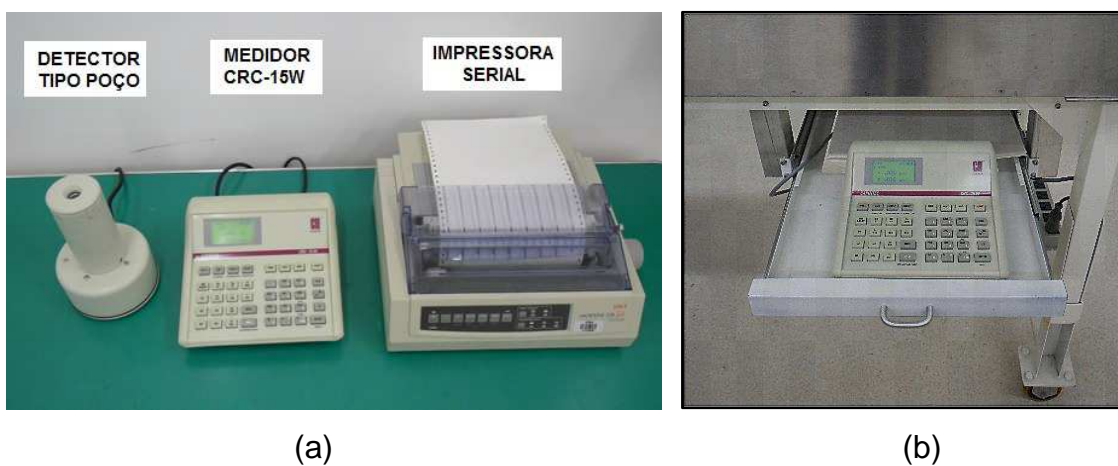


FIGURA 31: Medidor CRC-15W conectado ao detector tipo poço de iodeto de sódio e à impressora (a) e detalhe da instalação do medidor CRC-15W do lado externo da caixa de contenção (b).

5.2.10 Dispensador de água

Na construção do dispositivo para colocação de água nos tubos foi utilizado um dispensador de marca Eppendorf, modelo Varispenser plus, que permite ajuste de volume dispensado entre 2 mL e 10 mL. Esse equipamento apresenta uma acurácia de 0,5% e imprecisão de 0,1%. A FIG. 32 mostra uma imagem do dispensador Eppendorf modelo Varispenser plus.



FIGURA 32: Dispensador Eppendorf modelo Varispenser plus.

5.3 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 computador, utilizado como terminal de programação e como estação de operação, juntamente com o sistema operacional Windows XP Professional⁵⁵.

5.3.1 Aplicativo para a programação do Controlador Lógico Programável

Para realizar a programação do Controlador Lógico Programável (CLP) foi utilizado o aplicativo Microwin SP4 Step 7 V4.0⁵⁶, de fornecimento da empresa Siemens, direcionado para os Controladores Lógicos Programáveis da série S7-200, utilizada neste projeto. A programação do CLP é a responsável pelo controle

de todas as operações automatizadas, sendo armazenada e executada na CPU do sistema (CPU modelo 224)⁵⁷. Neste projeto o modo de edição que foi utilizado no aplicativo Microwin SP4 Step 7 V4.0 foi a representação *Ladder Logic*, por utilizar simbologia simples e de fácil aplicação. A FIG. 33 mostra uma imagem da tela gráfica do aplicativo Microwin SP4 Step 7 V4.0.

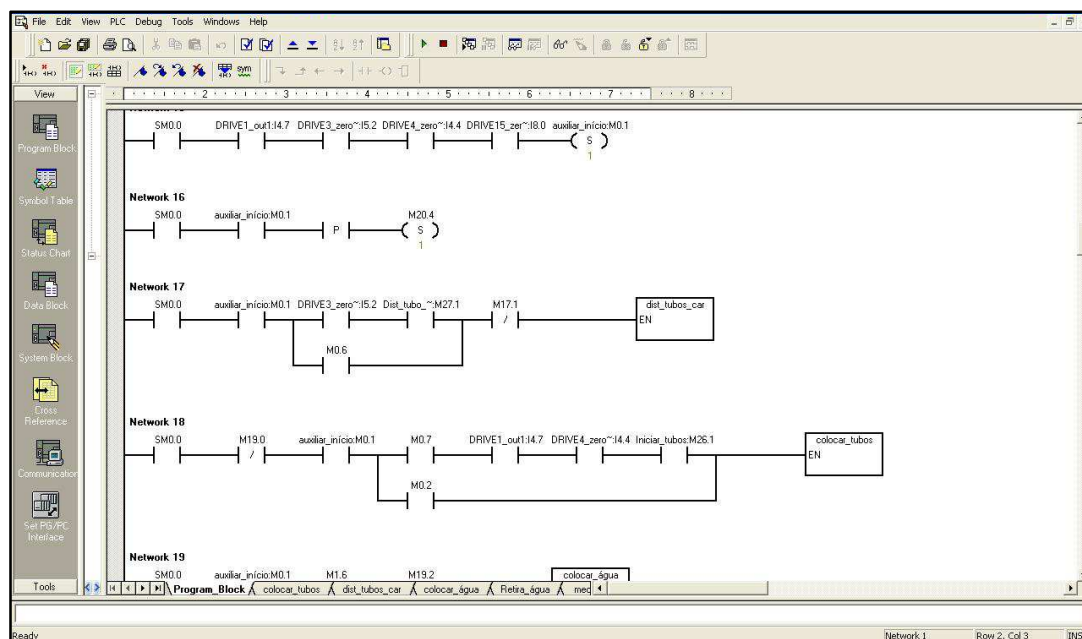


FIGURA 33: Tela gráfica do aplicativo Microwin SP4 Step 7 V4.0.

5.3.2 Aplicativo para a programação dos módulos de controle de motores de passo

O aplicativo que foi utilizado para programação dos módulos eletrônicos de controle dos motores de passo é o programa Si Programmer V2.5.7⁵⁸, fornecido pela empresa Applied Motion Products, juntamente com os módulo eletrônicos e motores de passo utilizados. Este aplicativo foi utilizado no computador *Notebook*, também utilizado como estação de operação. Por meio deste aplicativo é possível ajustar diversos parâmetros do funcionamento do motor, por exemplo, velocidade, sentido de giro, distancia a ser percorrida, corrente máxima, entre outros⁵⁹. A FIG. 34 mostra a tela gráfica desse programa.

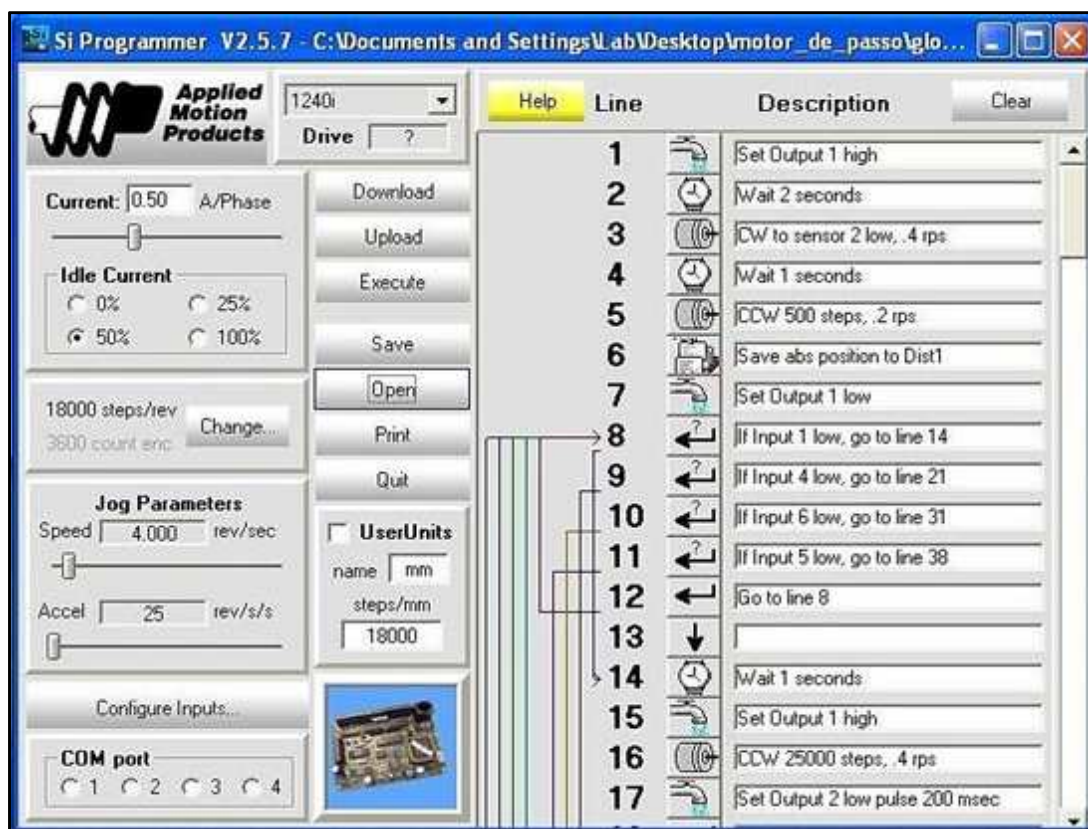


FIGURA 34: Tela gráfica do aplicativo Si Programmer V2.5.7.

5.3.3 Aplicativo para a programação da interface gráfica da estação de operação

Para desenvolver a interface gráfica de interação entre o operador e o controle computadorizado, foi utilizado 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 V6.1⁶⁰.

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 (Interface Homem Máquina) para a Indústria de Automação⁶¹. A FIG. 35 mostra a tela de programação do aplicativo Indusoft Web Studio V6.1.

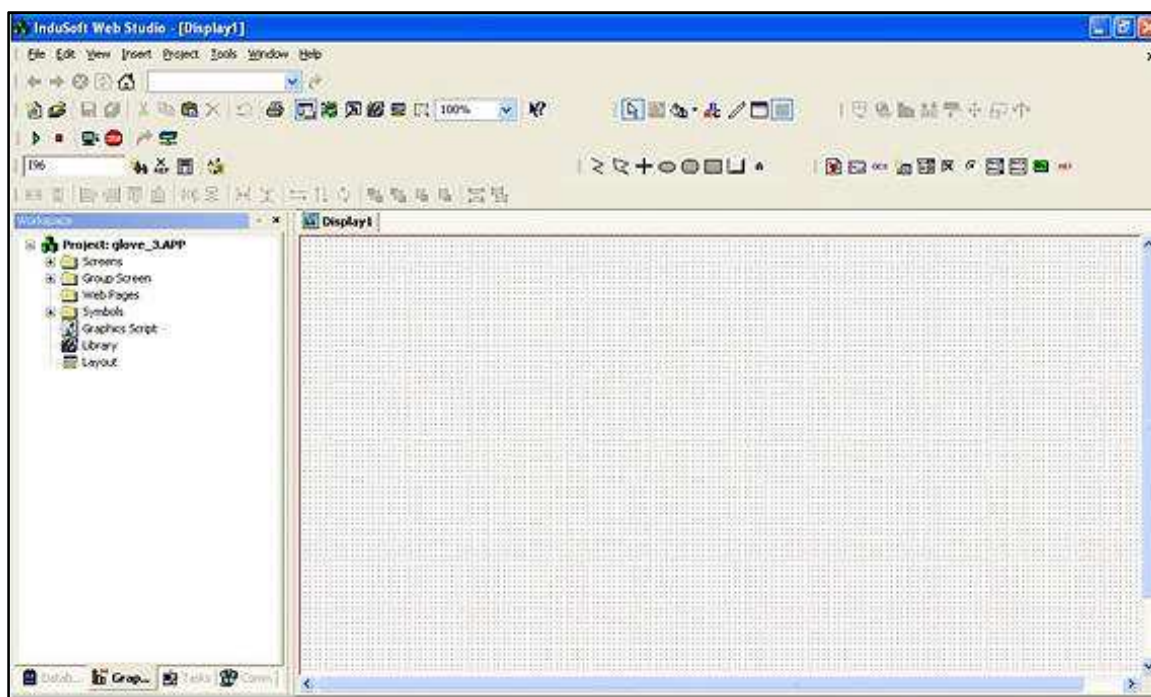


FIGURA 35: Tela de programação do aplicativo Indusoft Web Studio V6.1.

5.4 Simulação operacional do sistema

Após a integração de todos os seus dispositivos e dos testes de funcionamento, o sistema automatizado foi submetido a simulação operacional. Foram realizadas 80 simulações do ensaio de estanqueidade, número este equivalente a um ano de operação e em cada simulação foram utilizados 18 lotes de 60 sementes inativas (sem material radioativo no núcleo) do modelo desenvolvido no IPEN¹⁹, perfazendo um total de 1080 sementes. Nessas simulações o objetivo foi avaliar o comportamento do sistema de controle automático, dos componentes eletromecânicos e do programa desenvolvido. Foram registrados os valores de tempo necessários para cada etapa do processo, sendo que inicialmente os movimentos foram ajustados para velocidades baixas, permitindo a visualização e o acompanhamento minuciosos. Essa baixas velocidades foram mantidas até completar as primeiras 50 simulações e durante essa fase inicial foram avaliados os conjuntos eletromecânicos e o programa de controle. Durante as últimas 30 simulações os tempos foram diminuídos gradativamente, buscando atingir o menor tempo possível para execução do ensaio. Para todas as simulações operacionais realizadas, adotou-se a quantidade de 18 tubos, a fim de visualizar o desempenho do sistema com a máxima capacidade dos dispositivos. Cada uma

das simulações avaliou o processo inteiro de ensaio, desde a inicialização do sistema até as medições de atividade.

5.5 Estimativa de incerteza das medições

Foram avaliadas as incertezas nas medidas realizadas durante os diversos experimentos, e para tanto foram analisadas individualmente cada uma das grandezas medidas.

- **Medidas de radioatividade**

Para as medidas de radioatividade, onde se utilizou detector de cristal de iodeto de sódio tipo poço, foi considerada a maior incerteza estatística determinada pelo aparelho, igual a $\pm 2\%$, para valores de atividade compreendidos entre 37 Bq (1nCi) e 370 Bq (10nCi), que foi a faixa utilizada.

- **Medidas de dimensões em milímetros**

Para essas medidas foi utilizado um paquímetro com incerteza declarada pelo fabricante de 0,1 mm.

- **Medidas de Pressão**

Foi utilizado um vacuômetro com classe de incerteza de $\pm 4\%$, na faixa de medida compreendida entre -100 mmHg e -300 mmHg.

- **Medidas de massa**

Para as medidas de massa foi utilizada uma balança digital com incerteza declarada pelo fabricante de 0,01g.

5.6 Estratégias de segurança e tratamento das possíveis falhas

Foram analisadas as possíveis falhas durante o funcionamento do sistema e foram estabelecidas estratégias para minimizar o impacto das mesmas no processo de ensaios de estanqueidade. As falhas foram divididas em categorias, conforme listado abaixo:

- Falhas do equipamento;
- Falhas operacionais;
- Falhas no suprimento de energia elétrica;
- Falhas nos suprimentos de ar comprimido, sucção e de vácuo.

6 RESULTADOS

Foi planejada uma distribuição para os equipamentos a serem utilizados dentro da caixa de contenção, mostrada esquematicamente na FIGURA 36.

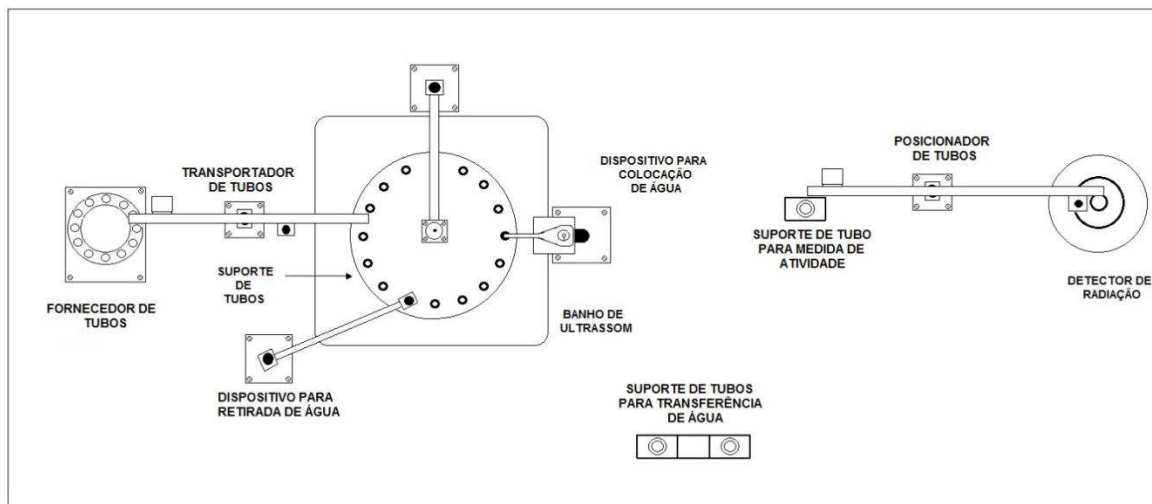


FIGURA 36: Distribuição dos equipamentos dentro da caixa de contenção.

Foram projetados, construídos e ensaiados os diversos dispositivos e acessórios eletromecânicos necessários. Foram desenvolvidos também os blocos de software para controlar cada um dos dispositivos. Para permitir a integração entre os movimentos e o perfeito posicionamento dos tubos plásticos durante as operações, foi estabelecido como equipamento central o banho de ultrassom. No seu interior foi montado o suporte para tubos.

6.1 Banho de ultrassom

O equipamento foi dividido em duas partes. A cuba do banho teve sua carenagem modificada com a inclusão de quatro pés metálicos. A carenagem foi modificada para permitir o ajuste de altura do equipamento, possibilitando a integração com os demais dispositivos do sistema. A FIG. 37 mostra a cuba do banho de ultrassom após as modificações.



FIGURA 37: Cuba do banho de ultrassom após as modificações.

O circuito eletrônico foi retirado e colocado em um gabinete metálico externo à caixa de contenção e teve suas funções integradas ao sistema de automação. As interligações elétricas entre o circuito eletrônico e a cuba do banho foram mantidas, e foi criada uma interface do circuito eletrônico do banho com o sistema de controle computadorizado, possibilitando ligar e desligar o ultrassom automaticamente. Foi incluído também controle de temperatura no banho de ultrassom com aquecimento elétrico. A FIG. 38 mostra o gabinete elétrico do banho de ultrassom montado na parte externa da caixa de contenção.



FIGURA 38: Gabinete elétrico do banho de ultrassom montado na parte externa da caixa de contenção.

6.2 Dispositivo automático de fornecimento dos tubos

Este dispositivo armazena até 18 tubos contendo sementes, para que sejam transportados e colocados no suporte dentro do banho de ultrassom. Seu abastecimento é feito manualmente com o dispositivo desligado e possui uma marcação gráfica referente à posição do tubo nº 1 para orientar o operador. O

dispositivo faz movimento giratório proporcionado por motor de passo, localizado na parte inferior do dispositivo. A imagem do dispositivo automático de fornecimento de tubos é mostrada na FIG. 39.

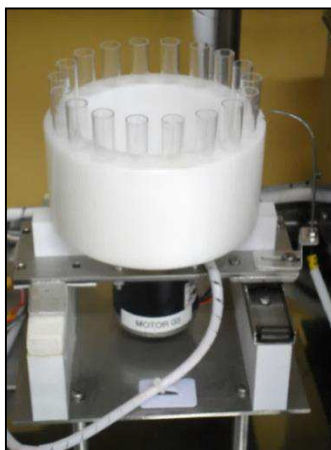


FIGURA 39: Dispositivo automático de fornecimento de tubos.

Ao ser energizado, o dispositivo gira no sentido anti-horário até atingir um sensor eletromecânico (*microswitch*) instalado na sua parte inferior, localizando sua posição “zero”. Em seguida gira novamente no sentido anti-horário posicionando o tubo nº 1 na posição de retirada dos tubos. Quando da retirada do tubo, um sensor óptico detecta a ausência de tubo e essa informação é enviada ao sistema de controle, que comanda o avanço do dispositivo levando o próximo tubo para a posição de retirada. Esses avanços se repetirão até a retirada do último tubo e o dispositivo permanecerá em sua última posição. Para reiniciar sua operação, o dispositivo deve ser desligado e recarregado manualmente. A FIG. 40 mostra um esquema do dispositivo automático de fornecimento de tubos

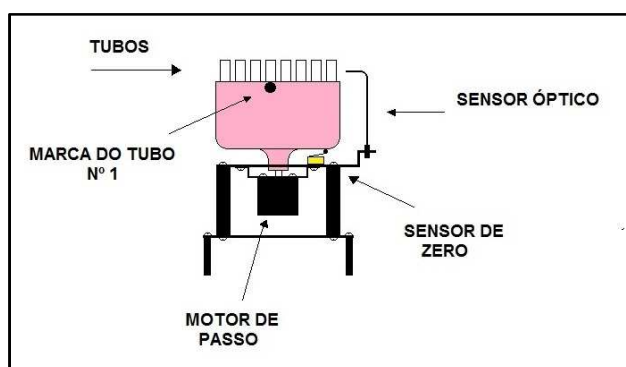


FIGURA 40: Esquema do dispositivo automático de fornecimento de tubos.

A sequencia de movimentos realizada pelo dispositivo automático de fornecimento de tubos está representada na FIG. 41.

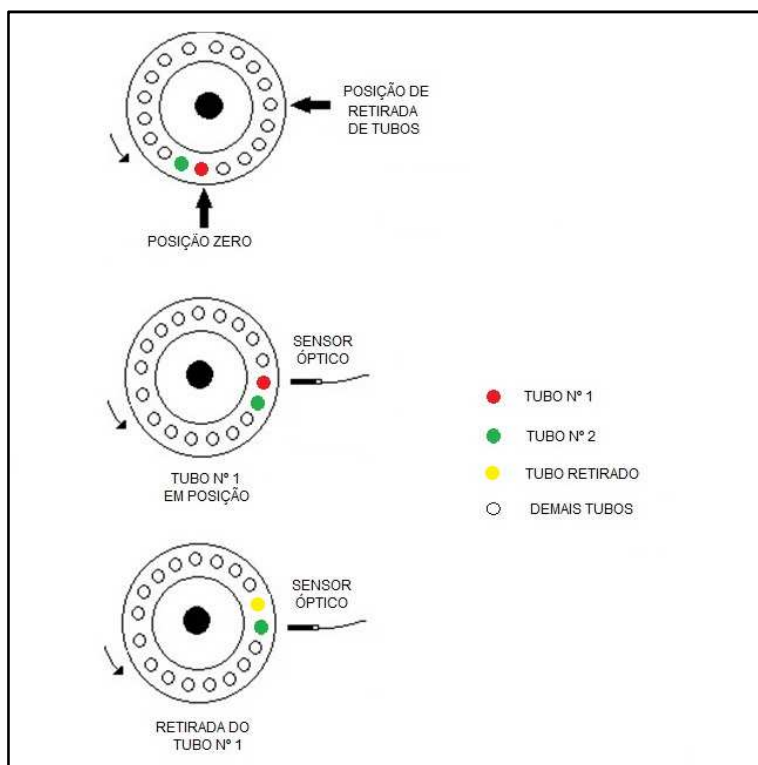


FIGURA 41: Sequencia de movimentos do dispositivo de fornecimento de tubos.

6.3 Suporte para tubos no banho de ultrassom

Dois modelos de suporte para tubos no banho de ultrassom foram desenvolvidos e ambos foram construídos em PVC, por apresentar boa resistência mecânica, ser leve e de fácil usinagem.

No primeiro modelo de suporte, os tubos são encaixados em furos que possuem mecanismo de mola. Quando o tubo é encaixado no furo, o mecanismo de mola comprime o tubo mantendo-o na posição em que foi colocado. A FIG. 42 mostra um desenho esquemático do suporte de tubos com mecanismo de fixação por mola.

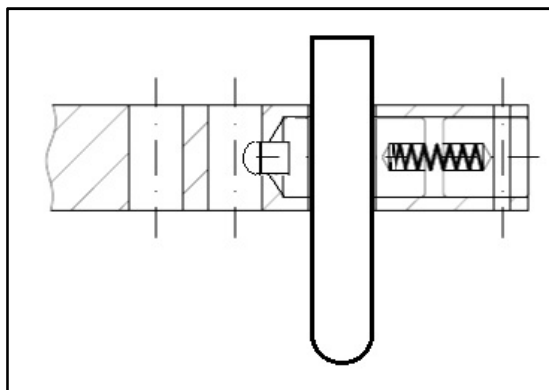


FIGURA 42: Suporte de tubos com mecanismo de fixação por mola.

O segundo modelo de suporte possui insertos de borracha de silicone para fixação dos tubos. Quando os tubos são encaixados no suporte, o inserto de borracha comprime o tubo mantendo-o na posição em que foi colocado. A FIG. 43 mostra um desenho do suporte com inserto de borracha.

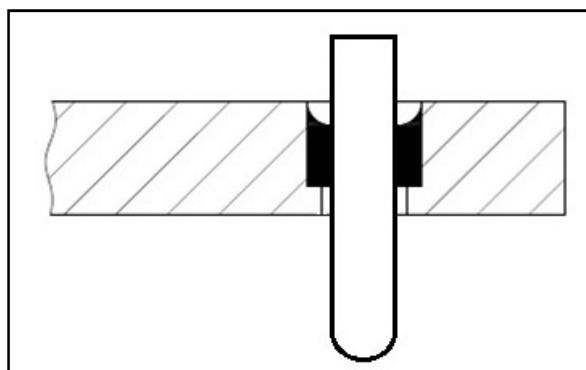


FIGURA 43: Suporte de tubos com inserto de borracha.

Os dois modelos de suporte para tubos foram submetidos a testes de funcionamento realizando todas as operações com os tubos e ambos apresentaram comportamento satisfatório. Entretanto o suporte com insertos de borracha apresenta maior facilidade de construção e é mecanicamente mais simples, sem peças moveis para fixação do tubo e apresenta menor necessidade de manutenção, quando comparado ao suporte com mola. Devido a essas características esse modelo foi escolhido para a utilização no sistema de ensaios de estanqueidade. O suporte acomoda 18 tubos ao longo de sua circunferência, proporcionando distancia suficiente entre os tubos para o acesso de outros dispositivos automáticos durante as operações e permitindo também a retirada

dos tubos manualmente. A FIG. 44 mostra uma imagem do suporte montado no banho de ultrassom (a) uma imagem dos tubos inseridos no suporte (b).



(a)

(b)

FIGURA 44: Imagem do suporte montado no banho de ultrassom (a) e imagem dos tubos inseridos no suporte (b).

O suporte de tubos tem funcionamento similar ao dispositivo de fornecimento de tubos descrito anteriormente, realizando movimento giratório somente no sentido horário, proporcionado por um motor de passo ligado ao seu eixo central. Na face superior, próximo à extremidade externa, possui uma marcação referente à posição “zero” que é detectada por um sensor óptico. O posicionamento em “zero” é realizado sempre que o dispositivo é ligado e também antes de iniciar qualquer das operações (colocação de tubos no suporte, colocação de água, retirada de água e retirada dos tubos), para garantir o posicionamento preciso do dispositivo. A partir dessa posição inicial em “zero”, o dispositivo se movimentará posicionando o tubo n^o 1, em seguida o tubo n^o 2 e assim sucessivamente. A FIG. 45 mostra esquematicamente o suporte de tubos com a marcação de “zero”, o sensor óptico que identifica essa marcação de “zero” e a marcação da posição do tubo n^o 1, que é utilizada apenas como referencia para o operador.

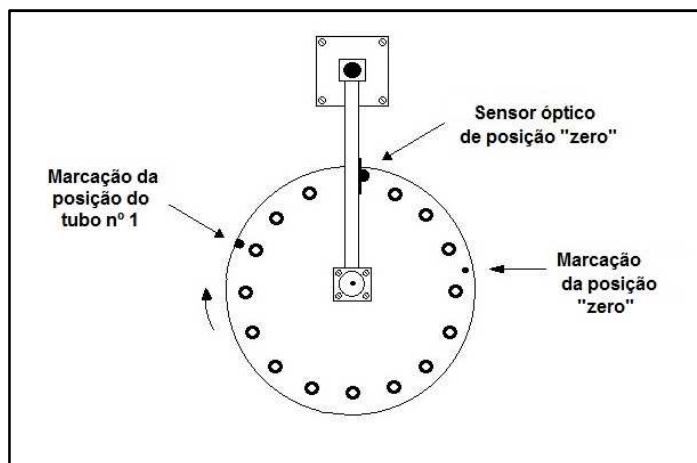


FIGURA 45: Suporte de tubos com sensor óptico e as marcações de posição "zero" e posição do tubo nº 1.

Foram instalados outros três sensores ópticos que detectam a presença dos tubos nas posições onde se realizam operações automatizadas. Durante a colocação dos tubos no suporte, o sensor (S1) confirma que o inserto de borracha está vazio, permitindo a inserção do tubo, e após sua colocação libera o giro do suporte para colocação do próximo tubo. Durante a colocação de água no tubo e durante a retirada de água dos tubos, os sensores (S2) e (S3) detectam a presença do tubo nas posições correspondentes e liberam essas operações. A FIG. 46 mostra o posicionamento dos três sensores ópticos que detectam a presença de tubos.

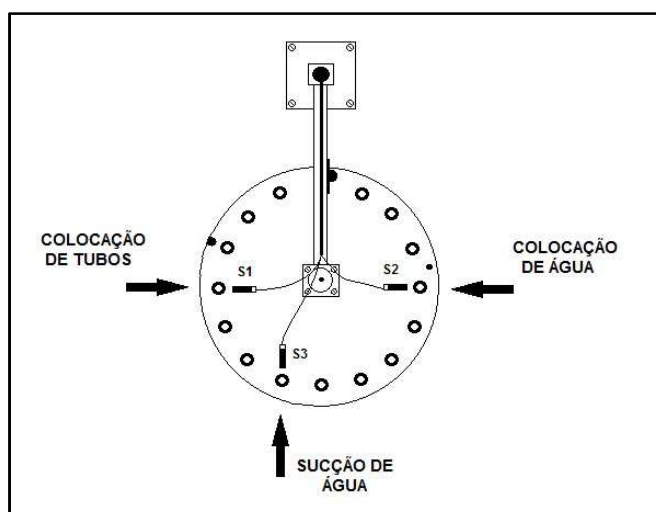


FIGURA 46: Posicionamento dos três sensores ópticos que detectam a presença de tubos.

Quando o suporte de tubos está parado em uma determinada posição, para execução de qualquer das operações, é acionada uma trava mecânica para garantir que o suporte não se mova. Após o término da operação a trava é recolhida permitindo o giro do suporte. Essa trava é acionada por um cilindro pneumático comandado pelo sistema de controle. A FIG. 47 mostra esquematicamente as duas condições da trava mecânica, acionada (a) e recolhida (b). A FIG. 48 mostra uma imagem da trava mecânica.

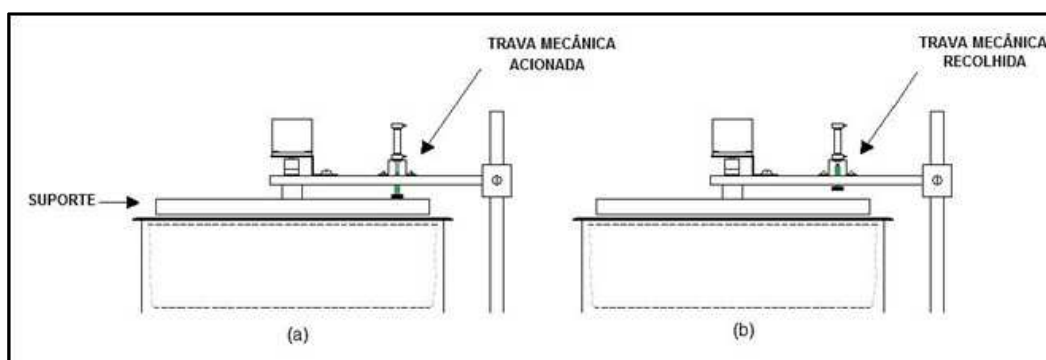


FIGURA 47: Trava mecânica do suporte de tubos acionada (a) e recolhida (b).

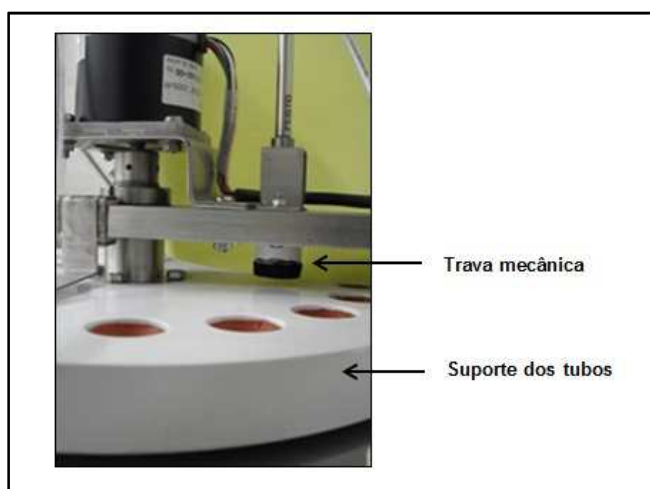


FIGURA 48: Imagem da trava mecânica do suporte de tubos.

6.4 Controle do nível de água do banho de ultrassom

O nível da água do banho de ultrassom necessita ser mantido para atender a especificação do fabricante do equipamento, sendo esse nível indicado com uma marcação de nível mínimo gravada no interior da cuba do banho de ultrassom. Para controlar esse nível foi instalado um indicador visual do nível da água, externamente ao banho, com uma marcação que reproduz o nível indicado

na cuba do banho. O indicador de nível é um tubo flexível conectado à parte inferior da cuba do banho de ultrassom, sendo preenchido pela água. Este tubo flexível é preso a uma estrutura de suporte sendo posicionado verticalmente, junto ao banho. A FIG. 49 mostra um esquema do indicador de nível (a) e uma imagem do indicador de nível (b).

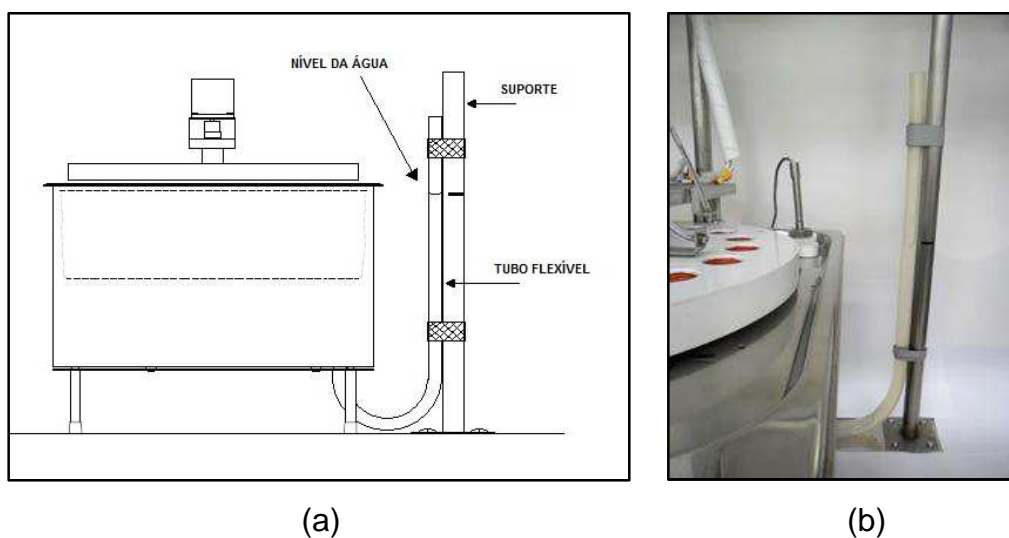


FIGURA 49: Esquema do indicador de nível (a) e imagem do indicador de nível (b).

Na tampa metálica superior do banho de ultrassom foi instalado um bocal de abastecimento, que é realizado manualmente antes do início de cada rotina de ensaio, utilizando-se um recipiente plástico de uso laboratorial (pisseta) conectado ao bocal de abastecimento. A FIG. 50 mostra uma imagem do bocal de abastecimento, na parte superior do banho de ultrassom.

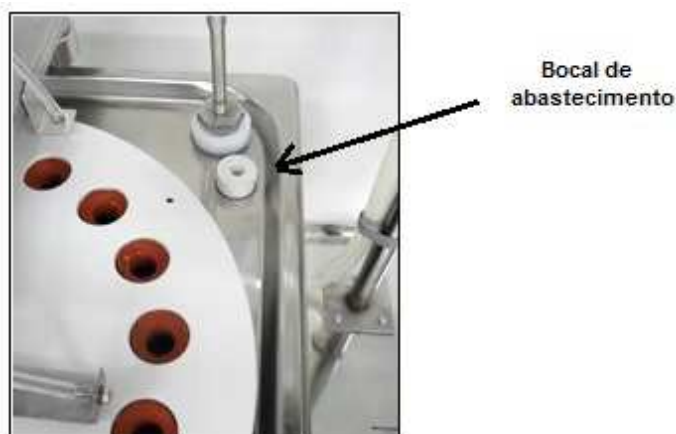


FIGURA 50: Imagem do bocal de abastecimento do banho de ultrassom.

6.5 Dispositivo transportador de tubos

O transportador de tubos realiza a integração entre o dispositivo automático de fornecimento de tubos e o suporte de tubos no banho de ultrassom, por meio de movimentos horizontais e verticais. Para a movimentação horizontal utiliza um motor de passo, guia linear e correia sincronizada. A movimentação vertical é realizada por um cilindro pneumático. O dispositivo possui uma pinça com sistema de vácuo que agarra e suspende o tubo contendo as sementes durante o seu transporte e posicionamento no suporte do banho de ultrassom. Para determinar a posição “zero” inicial, o dispositivo possui um sensor eletromecânico (*microswitch*) na extremidade do curso horizontal.

A FIG. 51 mostra uma representação do dispositivo transportador, posicionado entre o dispositivo automático de fornecimento de tubos e o suporte de tubos.

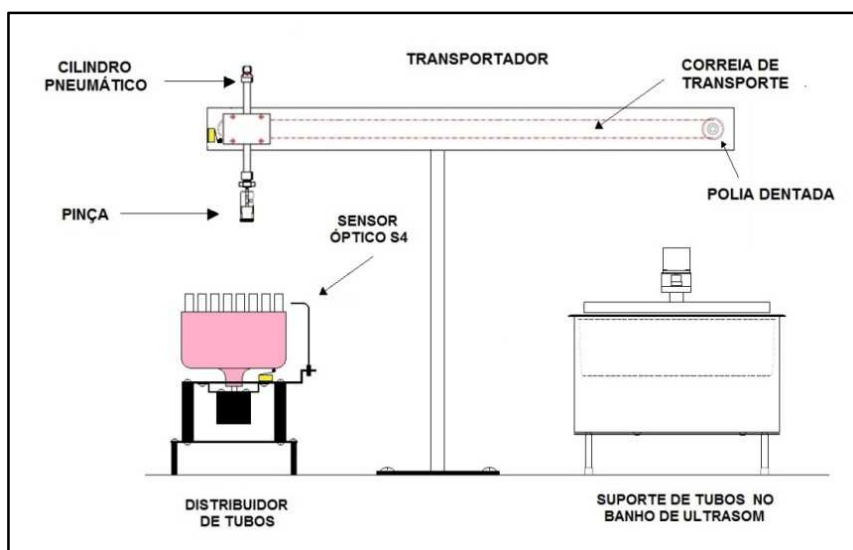


FIGURA 51: Representação do dispositivo transportador.

Ao ser energizado, o motor de passo movimenta o conjunto até atingir o sensor eletromecânico (*microswitch*), parando nesta posição e aguardando comando do sistema de controle para realizar as operações de transporte. A FIG. 52 mostra esquematicamente a sequencia dos movimentos do transportador de tubos.

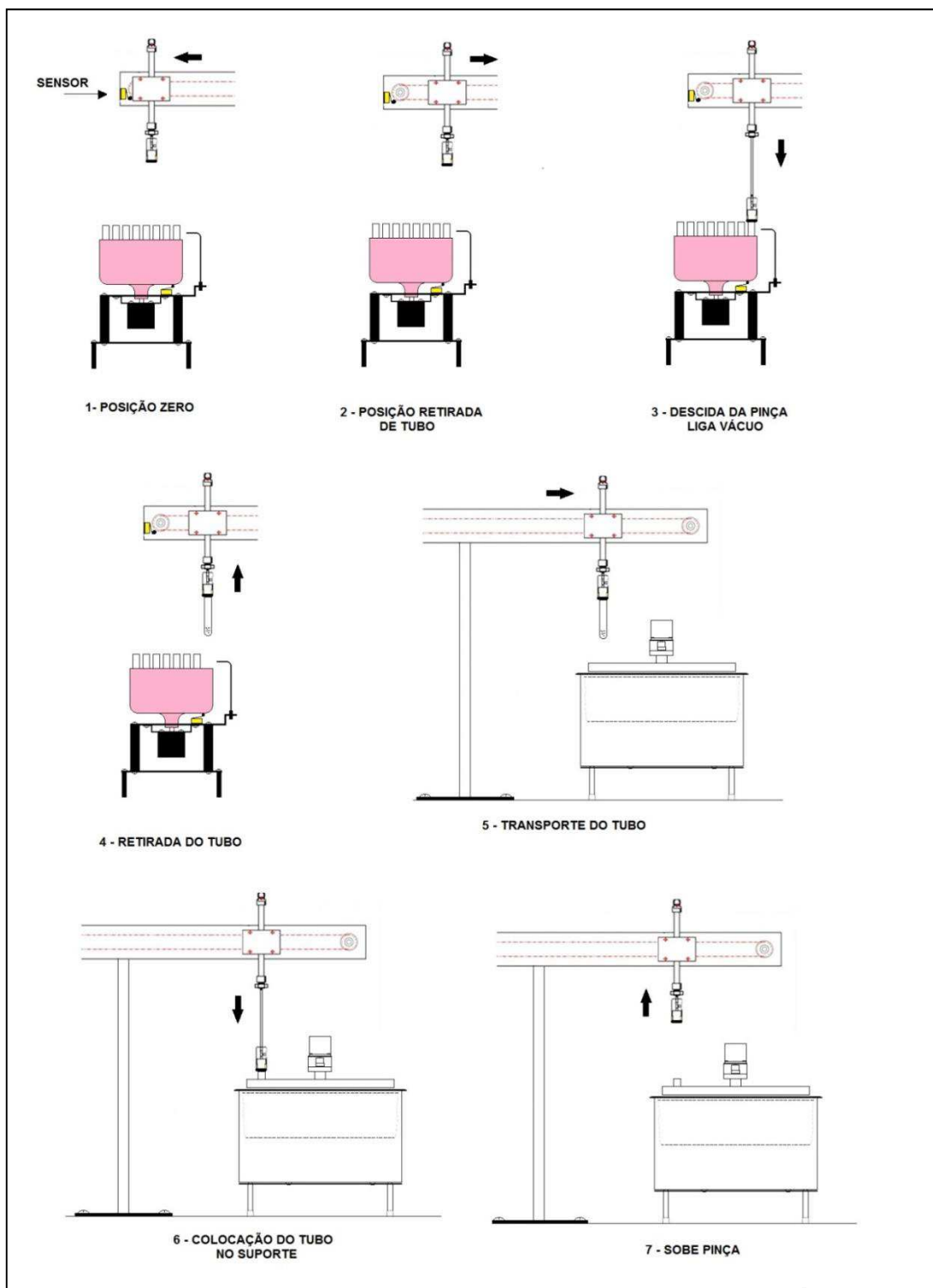


FIGURA 52: Sequencia de movimentos do transportador de tubos.

Após terminar a colocação do tubo, o transportador retorna à posição de retirada sobre o distribuidor de tubos e aguarda o comando para transportar o próximo tubo.

A FIG. 53 mostra a imagem do transportador em funcionamento, com a descida da pinça para agarrar o tubo (a), a subida da pinça com o tubo (b) e a inserção do tubo no suporte de tubos do banho de ultrassom (c).

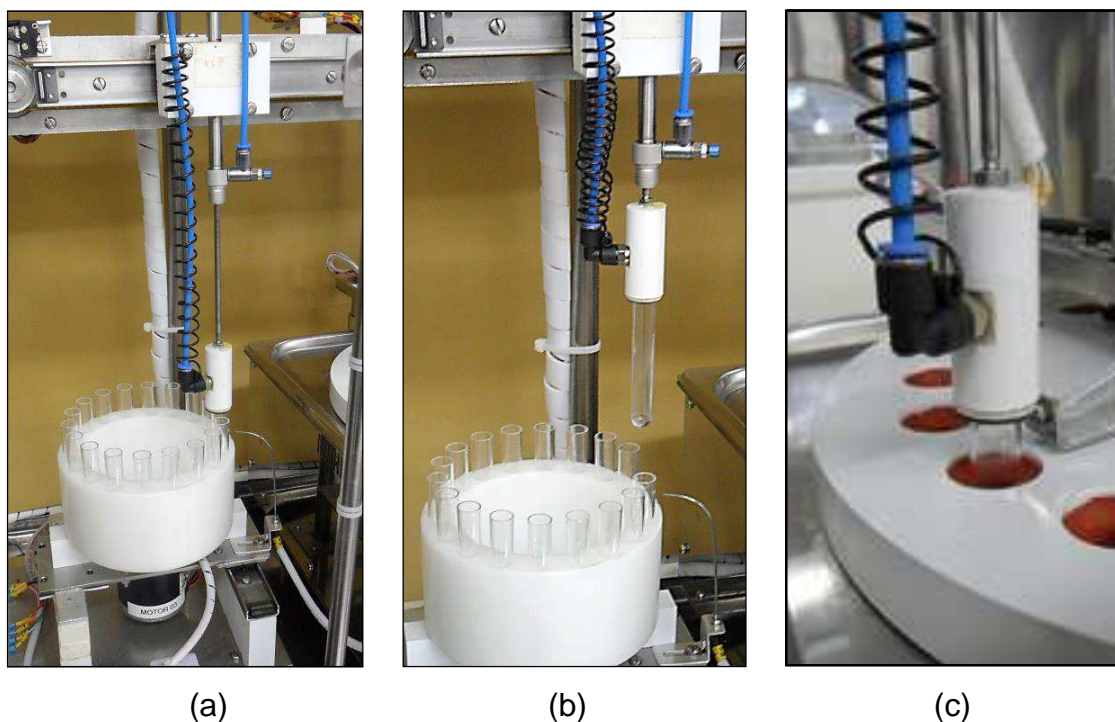


FIGURA 53: Descida da pinça para agarrar o tubo (a), subida da pinça com o tubo (b) e inserção do tubo no suporte de tubos do banho de ultrassom (c).

6.5.1 Verificação da uniformidade no posicionamento dos tubos

Após os testes funcionais e a integração dos três dispositivos envolvidos na colocação dos tubos no banho de ultrassom (dispositivo transportador de tubos, dispositivo fornecedor de tubos e suporte de tubos do banho de ultrassom) foi realizado um ensaio para determinar a uniformidade de altura dos tubos após o posicionamento feito pelo transportador de tubos, uma vez que essa altura é importante para as operações de lavagem das sementes, imersão das sementes e posterior retirada do tubo, feita manualmente. Para tanto, a altura nominal dos tubos foi ajustada em 15 mm acima da superfície do suporte, que é um valor adequado para o manuseio dos tubos. Foram realizados 10 ensaios, consistindo cada um deles em colocar automaticamente os 18 tubos no suporte de tubos do

banho de ultrassom e medir a altura de cada tubo. A medida da altura (h) está representada na FIG. 54.

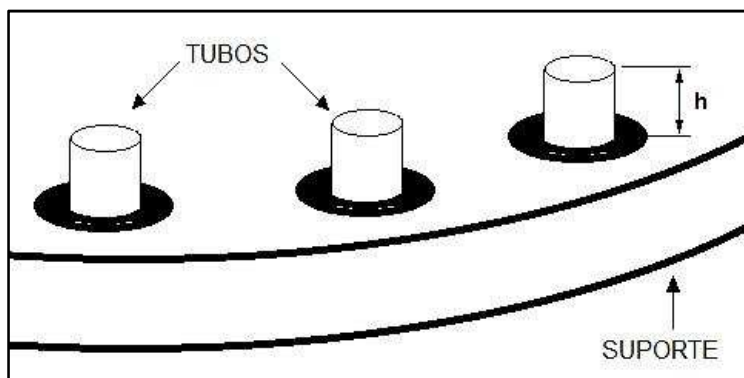


FIGURA 54: Representação da altura (h) do tubo em relação à superfície do suporte no banho de ultrassom.

Os resultados das medidas de altura (h) em relação ao nível do suporte de tubos estão mostrados graficamente na FIG. 55.

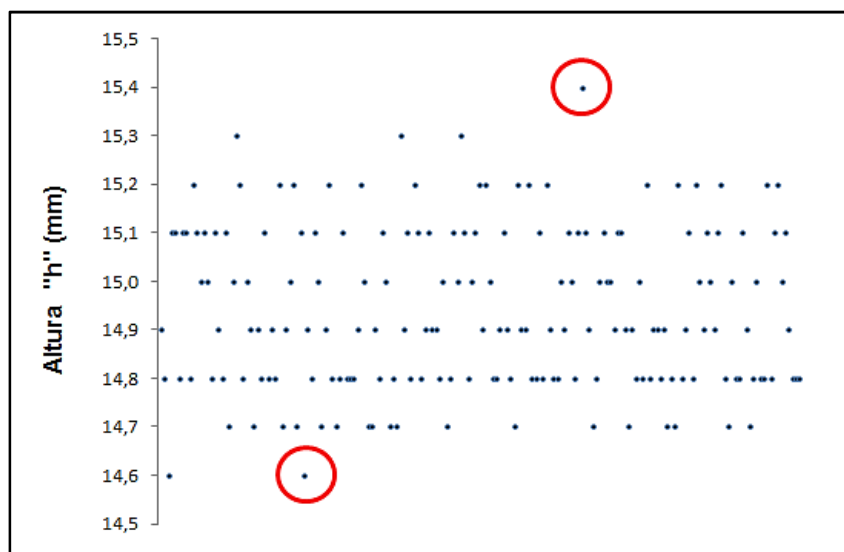


FIGURA 55: Resultados das medidas de altura (h), com destaque para o valor máximo e valor mínimo.

Os resultados obtidos foram satisfatórios, sendo o valor máximo de 15,4 mm e valor mínimo de 14,6 mm, apresentando uma variação máxima de $\pm 0,4$ mm em torno do valor nominal de 15 mm.

Com o posicionamento do tubo na altura nominal de 15 mm, o nível da água no banho de ultrassom fica 2 mm acima do nível no interior do tubo considerando-se o maior lote de sementes (70 sementes) e o volume de 2 mL de água no

interior do tubo, sendo esta folga suficiente para garantir a completa imersão do conteúdo do tubo apesar da máxima variação no seu posicionamento ($\pm 0,4$ mm).

6.6 Dispositivo para colocação de água no tubo

Para realizar o enchimento dos tubos com água destilada foi construído um dispositivo composto por um dispensador de líquido (êmbolo) com volume ajustável, um tanque de alimentação de água e um cilindro pneumático para acionamento. Esse conjunto está posicionado junto ao suporte de tubos no banho de ultrassom.

Na condição de repouso a haste do cilindro pneumático se encontra estendida. Ao ser acionado, o cilindro inicialmente recolhe a haste preenchendo o êmbolo com água destilada. Em seguida o cilindro estende a haste, colocando a água no interior do tubo. O acionamento do cilindro se dá por meio de válvulas eletro- pneumáticas comandadas pelo sistema de controle. A FIG. 56 mostra esquematicamente o funcionamento do dispositivo. A FIG. 57 mostra uma imagem do dispositivo executando o enchimento de um tubo.

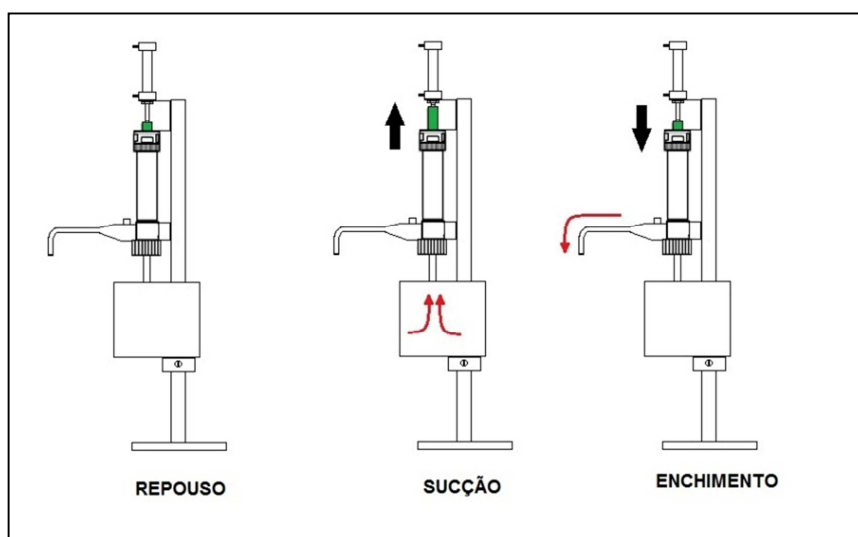


FIGURA 56: Esquema de funcionamento do dispositivo para colocação de água no tubo.



FIGURA 57: Imagem do dispositivo executando o enchimento de um tubo.

6.7 Dispositivo para retirada de água dos tubos

6.7.1 Escolha da ponteira do dispositivo para retirada de água

Antes de projetar este dispositivo foi necessário definir um tipo de ponteira a ser introduzido no tubo para a retirada de água, uma vez que pode ocorrer o arraste de sementes para fora do tubo devido à sucção.

A primeira versão analisada foi uma ponteira de pipeta convencional de material plástico e ponta cônica e a segunda foi um tubo metálico de pequeno diâmetro. Ambas possuem orifícios de diâmetro menor que 0,8 mm (que corresponde ao diâmetro externo das sementes) para evitar que estas sejam sugadas para o interior da ponteira. A terceira versão foi uma ponteira porosa de material plástico. A FIG. 58 mostra esquematicamente as diferentes ponteiros avaliadas.

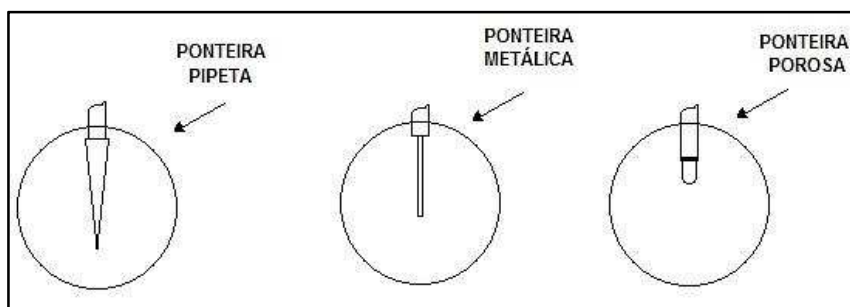


FIGURA 58: Tipos de ponteiros avaliadas quanto ao arraste de sementes.

Cada versão de ponteira foi testada em 50 operações, simulando-se as condições operacionais com o auxílio de um conjunto móvel onde o tubo com as sementes foi posicionado alternadamente para a colocação de água e para a retirada de água. A imagem deste conjunto é mostrada na FIG. 59 e o resultado do arraste de sementes é mostrado na TAB. 2.

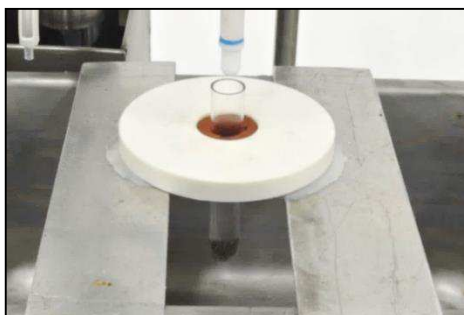


FIGURA 59: Conjunto para avaliação das ponteiras de sucção de água.

TABELA 2: Resultado do arraste de sementes.

Tipo de ponteira	Ponteira Pipeta	Ponteira Metálica	Ponteira Porosa
Quantidade de arrastes	2	5	0

Um exemplo de arraste de semente ocasionado pela ponteira de pipeta está mostrado na imagem da FIG. 60.

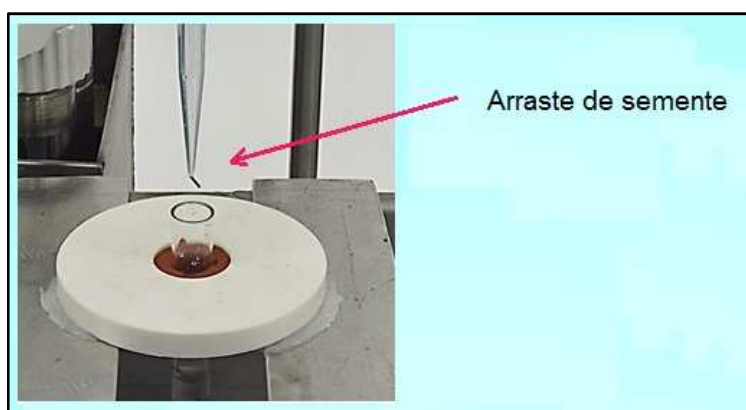


FIGURA 60: Arraste de semente ocasionado pela ponteira de pipeta.

A ponteira porosa foi a escolhida para utilização no dispositivo de retirada de água, por ser a única que não ocasionou arraste de sementes. O elemento poroso

é conectado ao corpo do dispositivo por uma rosca, permitindo sua fácil substituição. A FIG. 61 mostra um desenho do dispositivo.

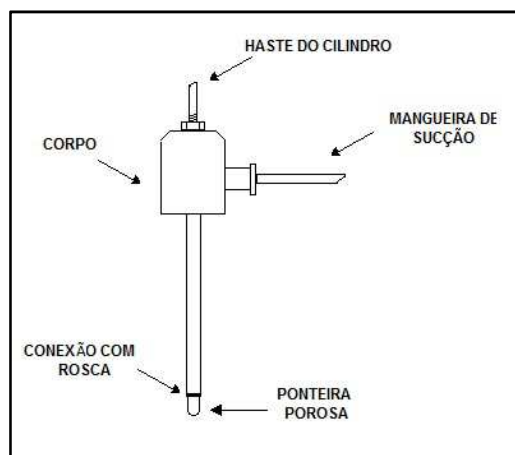


FIGURA 61: Desenho do dispositivo para retirada de água.

Durante a operação de retirada de água, o tubo é posicionado exatamente abaixo do dispositivo, a sucção é ligada e o cilindro pneumático é acionado, estendendo sua haste e abaixando o dispositivo de sucção precisamente dentro do tubo. A FIG. 62 mostra o dispositivo de retirada de água sobre o tubo (a) e no interior do tubo (b), durante seu funcionamento.



(a)



(b)

FIGURA 62: Dispositivo de retirada de água sobre o tubo (a) e no interior do tubo (b).

6.7.2 Avaliação da eficiência na retirada de água dos tubos

Após os testes funcionais desse dispositivo foi avaliada a sua eficiência na retirada de água de um tubo contendo água e sementes, comparando com a operação de retirada manual da água. O experimento foi dividido em duas partes, a primeira utilizando o dispositivo automatizado de retirada de água e a segunda manualmente utilizando uma pipeta automática. Para a realização da primeira parte do experimento foi montado o arranjo esquematizado na FIG. 63.

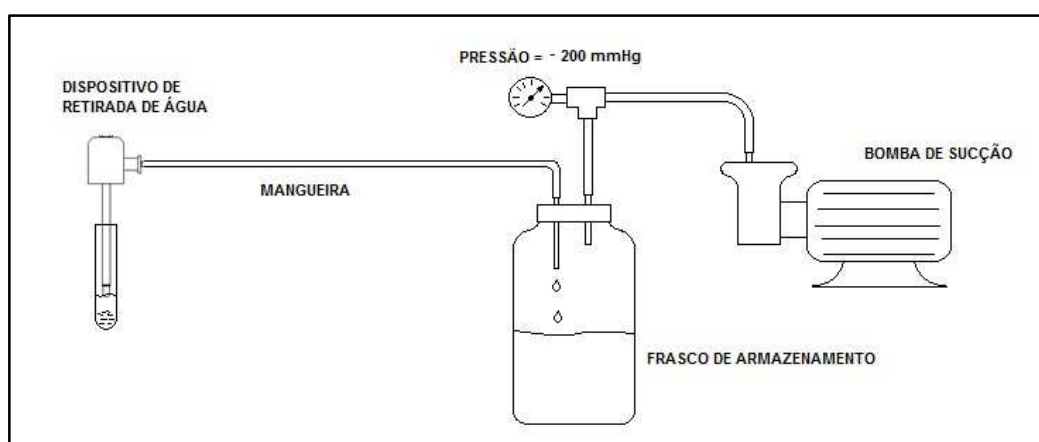


FIGURA 63: Arranjo para experimento de retirada de água.

O frasco de armazenamento utilizado tem capacidade para 5 litros, possui tampa com vedação de borracha permitindo manter a pressão interna menor do que a pressão atmosférica. A mangueira de sucção possui um diâmetro interno de 4 mm e comprimento de 1,5 m e a bomba de sucção foi ajustada para manter uma pressão de -200 mmHg no interior do frasco durante o experimento, por meio de uma válvula de ajuste e de um vacuômetro cuja incerteza é de $\pm 4\%$. Esse valor de pressão produziu bom resultado na retirada de água dos tubos, com tempo de sucção de aproximadamente 4 segundos para cada tubo. Valores de depressão maiores (-300 mmHg) não produziram melhor resultado na retirada de água, aumentando a velocidade de sucção porém causando turbulência na tubulação e a formação de gotas residuais na parede interna do tubo de poliestireno. Valores de depressão menores (-100 mmHg) não produziram melhores resultados na retirada de água, aumentando o tempo de retirada de água para aproximadamente 7 segundos. Devido a esses resultados adotou-se a

pressão de (- 200 mmHg), com tempo de sucção de aproximadamente 4 segundos, para a retirada de água dos tubos.

Inicialmente um tubo plástico contendo um lote de 50 sementes completamente secas foi pesado em uma balança, obtendo-se o valor de 2,64 gramas. Foram então realizadas 50 operações sempre utilizando o mesmo tubo e as mesmas sementes, preenchendo-se o tubo com 2 mL de água e em seguida retirando-se a água com o dispositivo automatizado. Após cada operação de retirada de água, o tubo com as sementes e a água remanescente foi pesado novamente.

Na segunda parte do experimento o procedimento foi repetido, porém a retirada de água foi realizada manualmente utilizando-se uma pipeta automática KACIL, modelo monocanal, com volume fixo de 1 mL.

Para as medidas de massa foi utilizada uma balança digital modelo AD 2000 de fabricação MARTE⁶². Os valores obtidos no experimento de retirada de água, bem como os valores de desvio padrão calculados estão resumidos na TAB. 3.

TABELA 3: Valores de massa e desvio padrão obtidos no experimento de retirada de água (gramas).

	Dispositivo automatizado	Pipeta manual
Valor máximo	2,74	2,76
Valor mínimo	2,66	2,66
Valor médio	2,68	2,70
Desvio Padrão	0,0186	0,0207
Massa do tubo com as sementes secas = 2,64		

Os valores obtidos mostram que a eficiência do dispositivo automatizado é similar à operação manual utilizando pipeta, na retirada de água dos tubos contendo água e sementes.

6.7.3 Avaliação da possibilidade de transferência de contaminação entre tubos causada pelo dispositivo de retirada de água

Durante o ensaio de estanqueidade, nas operações de lavagem das sementes, uma vez iniciada a operação de retirada de água dos tubos até o seu término a bomba de sucção permanece ligada, para garantir que não haja retorno de água do dispositivo para o interior dos tubos e evitando uma eventual contaminação cruzada entre quaisquer dos tubos. Para avaliar a possibilidade de transferência de contaminação entre tubos causada pelo dispositivo de retirada de água foi realizado um estudo simulando uma contaminação por vazamento de iodo-125 do interior de uma semente.

Foram preparados 3 tubos contendo lotes de sementes inativas (sem material radioativo no núcleo) e 2mL de água. O tubo nº1 foi contaminado com $1,48 \times 10^6$ Bq (40 μ Ci) de iodo-125 na forma de iodeto de sódio e foi realizada a sucção sequencial do conteúdo dos três tubos. Esse valor de contaminação foi estimado tomando-se como base experimento realizado anteriormente onde uma semente recém-soldada apresentou vazamento durante o ensaio de estanqueidade³⁰. O valor de contaminação relatado nesse experimento, de 5160 Bq (140 nCi) foi aumentado mais de 200 vezes neste experimento, para superestimar o vazamento de uma semente durante o ensaio. A FIG. 64 mostra esquematicamente a sucção sequencial feita nos três tubos durante o experimento.

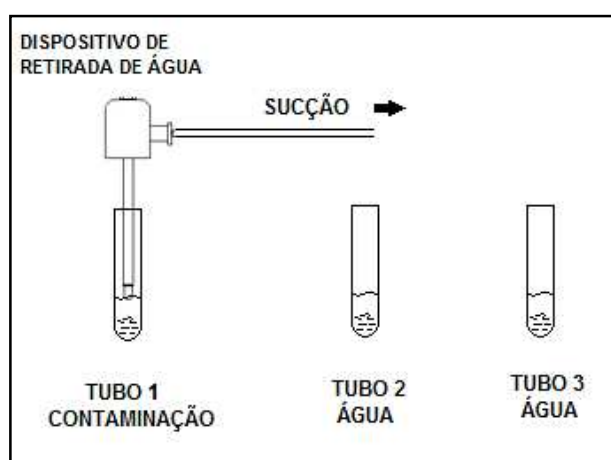


FIGURA 64: Sucção sequencial realizada nos três tubos.

A sucção e o armazenamento da água foram realizados utilizando-se o mesmo conjunto utilizado no experimento anterior para avaliação da eficiência de retirada de água pelo dispositivo de ponta porosa. Esse conjunto é composto do dispositivo de retirada de água acoplado a um frasco de armazenamento e a uma bomba de sucção. O valor de depressão no frasco foi mantido igual ao experimento anterior (- 200 mmHg).

Após a sucção do conteúdo dos três tubos, os tubos de nº 2 e nº 3 foram preenchidos com água limpa e colocados em banho de ultrassom por 10 minutos. Em seguida foi feita a medida de atividade da água desses tubos no detector de radiação. Os valores obtidos estão contidos na TAB. 4.

TABELA 4: Valores de atividade da água nos tubos nº 2 e nº 3

Atividade na água (Bequerel)	
Tubo nº 2	1,32 ± 0,40
Tubo nº 3	1,92 ± 0,48

Os valores de atividade na água estão muito abaixo do valor limite de 185 Bq (5 nCi) estabelecido pela norma ISO 9978 para fontes seladas, valor este que poderia caracterizar a contaminação entre tubos. Além disso, os valores obtidos são menores do que a sensibilidade do equipamento detector utilizado, que é de 3,3 Bq (0,1 nCi). Devido a esses resultados pode-se afirmar que o dispositivo de retirada de água com ponteira porosa não causa a transferência de contaminação entre os tubos.

Apesar dos bons resultados obtidos neste experimento, é prudente adotar como procedimento operacional após cada rotina de ensaio, a troca do elemento poroso utilizado, garantido que se inicie um novo ensaio de estanqueidade com o dispositivo limpo. A troca desse elemento poroso é de fácil execução, sendo o mesmo rosqueado ao corpo do dispositivo.

6.8 Dispositivo posicionador de tubos no detector de radiação

Após a etapa de imersão das sementes por 24 horas, a água de imersão é transferida manualmente para um tubo limpo. Este tubo recebe uma rolha de borracha e é colocado em um suporte, para que seja posicionado automaticamente no detector de radiação por um dispositivo posicionador automático. Esse dispositivo é de construção similar ao dispositivo transportador de tubos, descrito anteriormente, utilizando um sensor eletromecânico para determinar sua posição “zero”. Possui também um sensor óptico que detecta a presença e a ausência de tubo no suporte. O dispositivo posicionador faz movimentos horizontais utilizando motor de passo, guia linear e correia sincronizada, e faz movimentos verticais utilizando um cilindro pneumático.

Para prender o tubo durante sua movimentação, o dispositivo possui uma pinça ativada por vácuo. Após a medida da atividade, o dispositivo retira do detector o tubo com a água e o leva para um recipiente de rejeito. A FIG. 65 mostra esquematicamente esse dispositivo.

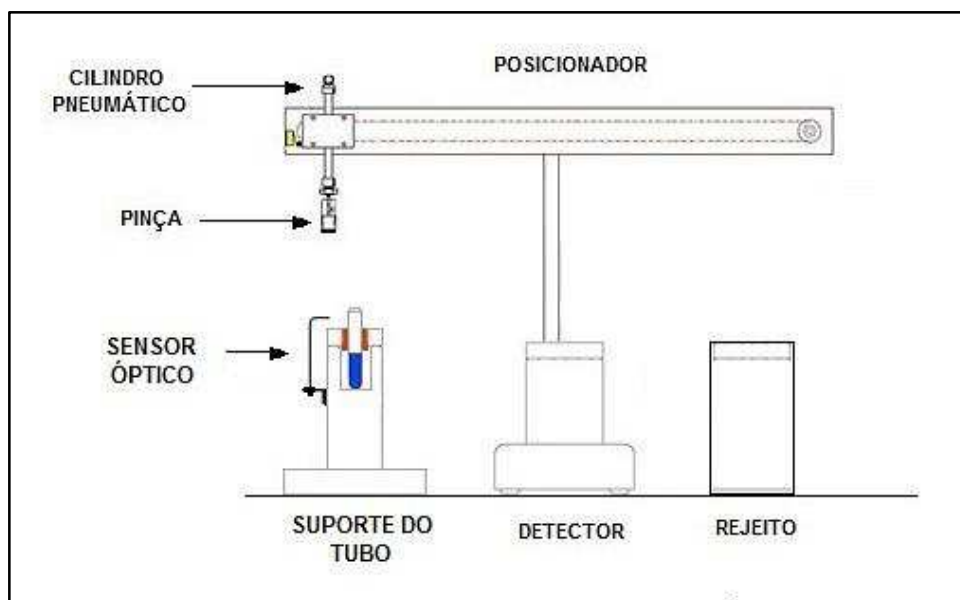


FIGURA 65: Dispositivo posicionador do tubo no detector de radiação.

Após terminar essa operação, o dispositivo aguarda o comando para posicionar o próximo tubo. A FIG. 66 mostra esquematicamente a sequência dos movimentos.

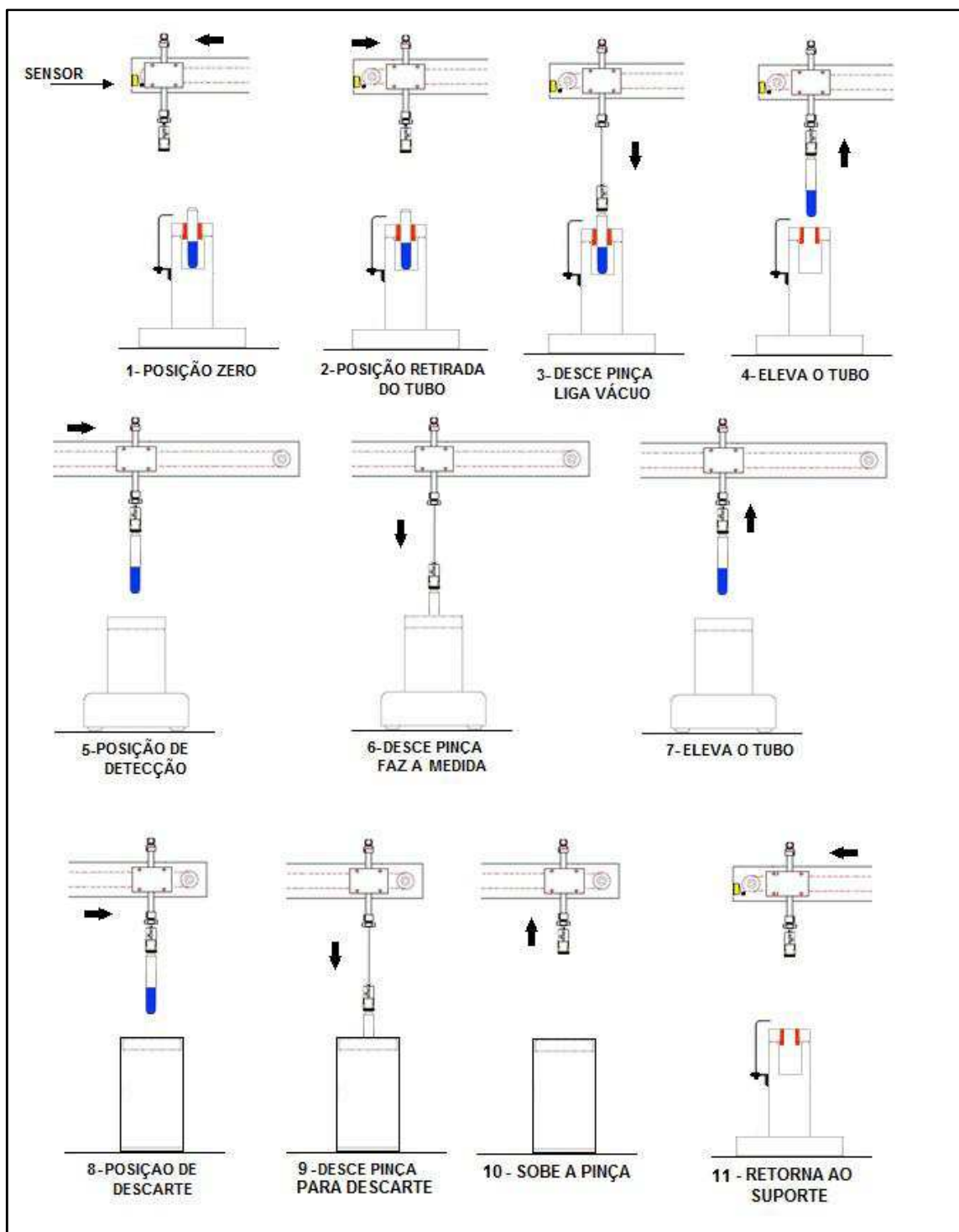


FIGURA 66: Sequencia de movimentos do posicionador de tubos.

A FIG. 67 mostra as imagens de retirada do tubo com água do seu suporte (a), transporte do tubo (b) e colocação do tubo com água no detector de radiação (c).

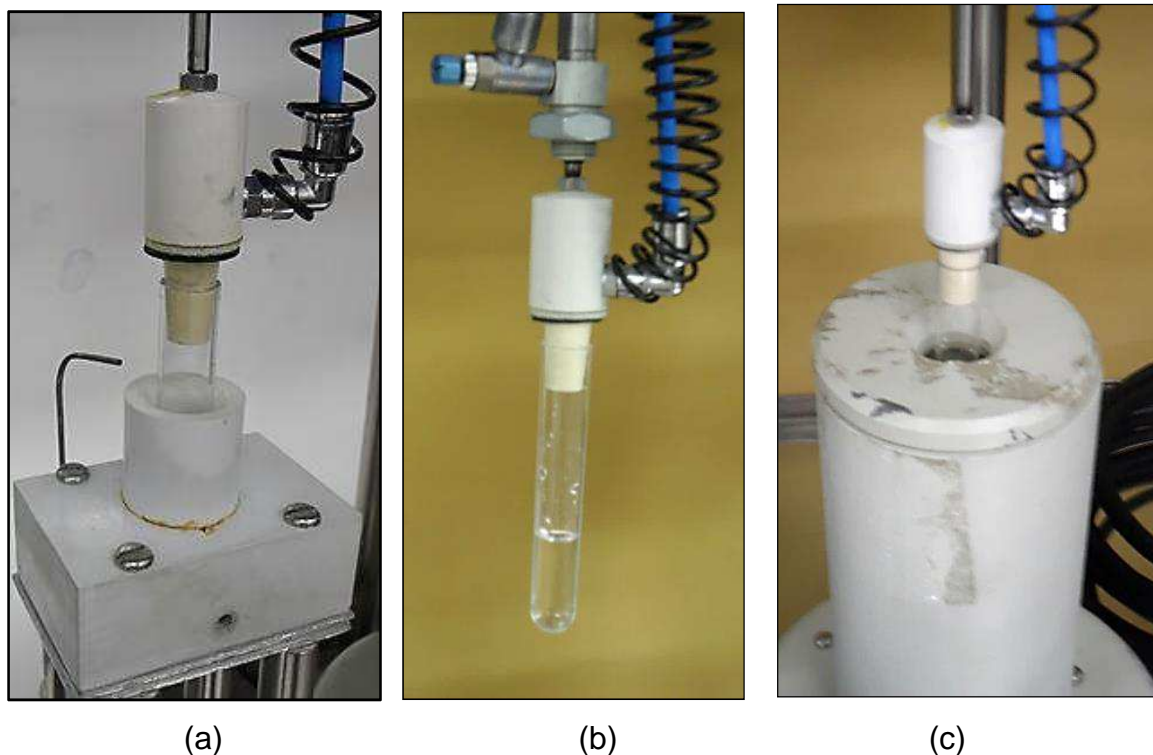


FIGURA 67: Retirada do tubo com água do seu suporte (a), transporte do tubo (b) e colocação do tubo com água no detector de radiação (c).

6.8.1 Estudo da influencia do posicionamento do tubo na medida de atividade

O Dispositivo de posicionamento automático apresenta uma variação no seu posicionamento que é inerente aos seus componentes mecânicos, podendo influenciar na medida de atividade da água. Inicialmente foi avaliada a interferência do posicionamento vertical do tubo no detector sobre as medidas de atividade e posteriormente a influencia do dispositivo e seus movimentos sobre essas medidas⁶³.

Na análise do posicionamento vertical, um tubo contendo 2 mL de solução com 185 Bq (5 nCi) de iodo-125 foi colocado no detector de radiação tipo poço de iodeto de sódio. Sua posição vertical em relação ao fundo do detector foi gradativamente elevada desde 0 até 10 mm, em passos de 1 mm. A FIG. 68 mostra esquematicamente o arranjo para variar a posição vertical do tubo no detector.

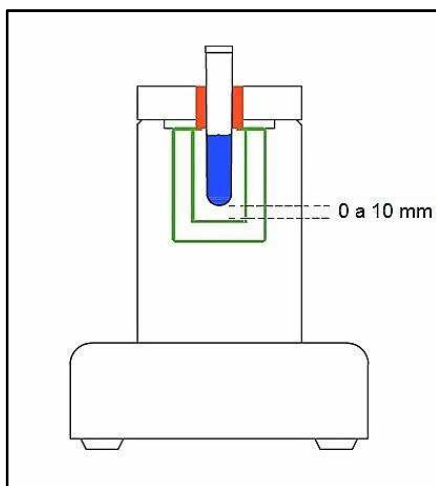


FIGURA 68: Arranjo para variação do posicionamento vertical do tubo no detector de radiação.

Uma serie de dez medidas foi realizada em cada posição e a média obtida em cada uma das posições foi representada no gráfico da FIG. 69.

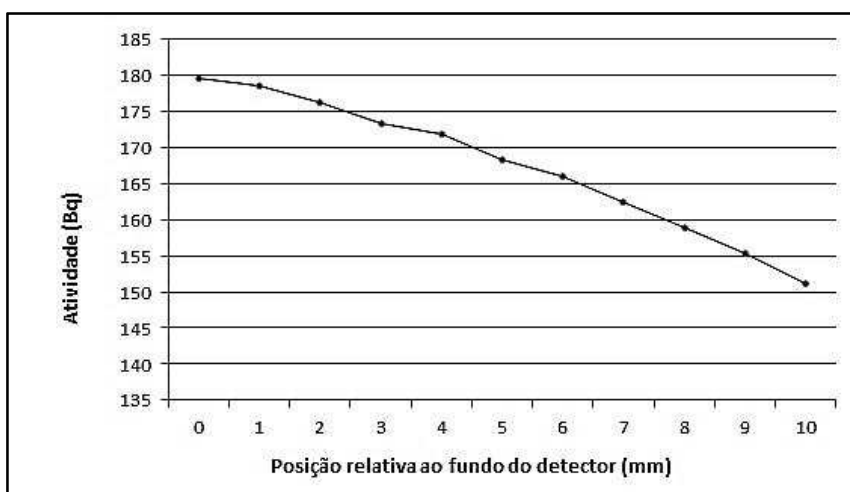


FIGURA 69: Valores da atividade obtidos variando-se a posição vertical do tubo em relação ao fundo do detector.

Nota-se que o valor diminui à medida que o tubo é suspenso, pois o poço de medição é constituído de um cristal sensível à radiação e tanto as paredes quanto o fundo do poço de medição contribuem para a o valor medido. Quando ocorre o distanciamento entre o tubo contendo o líquido radioativo e o fundo do poço de medição, diminui o valor detectado pelo equipamento.

Devido aos resultados obtidos com a variação de posicionamento vertical do tubo no detector, o dispositivo de posicionamento automático foi ajustado para que a posição vertical do tubo durante a medida de atividade fosse tão próximo do fundo do poço quanto possível, sendo fixada em 1 mm acima do fundo do detector. Essa folga mínima é necessária para garantir que não ocorram choques mecânicos com o fundo do detector e possíveis danos ao mesmo, durante as operações de posicionamento do tubo no detector.

Uma vez ajustada essa folga de 1 mm no dispositivo de posicionamento automático, a próxima etapa do estudo foi realizada em duas condições distintas, a primeira de forma estática e a segunda de forma dinâmica. No ensaio estático, o tubo foi colocado no detector pelo sistema automático e foram realizadas 20 medidas de atividade consecutivamente, sem movimentar o tubo.

No ensaio dinâmico, o sistema automático realizou 20 operações distintas de posicionamento do tubo no detector e em cada uma delas foi medida a atividade. A FIG. 70 mostra esquematicamente o posicionamento do tubo no detector de radiação realizado pelo dispositivo automatizado.

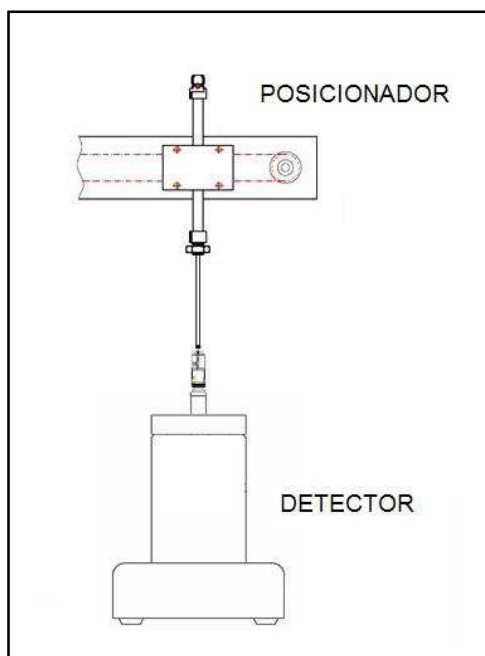


FIGURA 70: Posicionamento automático do tubo no detector de radioatividade.

A TAB. 5 mostra os resultados obtidos no ensaio estático e dinâmico e os valores de média, desvio padrão (σ) e intervalo de 95% de confiança ($1,96 \times \sigma$).

TABELA 5: Resultados de medida de atividade nos ensaios estático e dinâmico. Valores em Bq.

Medida Nº	Ensaio Estático	Ensaio Dinâmico
1	124,7	121,2
2	121,3	119,3
3	122,9	122,3
4	121,3	119,3
5	122,7	124,2
6	124,9	123,2
7	122,4	125,7
8	122,2	121,6
9	119,4	124,2
10	119,5	124,9
11	123,4	122,8
12	120,2	124,0
13	124,2	120,7
14	123,2	122,3
15	121,5	124,9
16	124,0	122,0
17	120,3	122,1
18	125,0	123,1
19	119,1	124,0
20	122,0	122,4
MÉDIA	122,2	122,7
DESVIO PADRÃO (σ)	1,8	1,7
1,96 x σ	3,52	3,33

Considerando-se o intervalo de confiança de 95% ($1,96 \times \sigma$) os resultados obtidos na condição estática e na condição dinâmica podem ser considerados iguais uma vez que todos os valores obtidos estão contidos no mesmo intervalo. Devido aos resultados obtidos foi considerada irrelevante a influencia das variações devido ao posicionador automático, nas medidas de atividade da água.

A folga de 1 mm entre o fundo do tubo e o fundo do detector no posicionamento do tubo deverá ser verificada periodicamente, durante as revisões

do sistema, reproduzindo as condições deste estudo e evitando choques mecânicos.

6.9 Estrutura de automação do sistema

A estrutura de automação é composta de diversos blocos que interligados realizam o controle do sistema automatizado. Esses blocos são: Controlador Lógico Programável (CLP) composto de uma unidade central de processamento (CPU) e módulos de entradas e saídas de sinais, módulos eletrônicos de controle dos motores de passo, motores de passo, bloco de válvulas pneumáticas, cilindros pneumáticos, estação de operação remota, computador de interface gráfica operacional do sistema (estação de operação), sensores e gabinete eletrônico do banho de ultrassom. A estrutura de automação do sistema está esquematizada na FIG. 71.

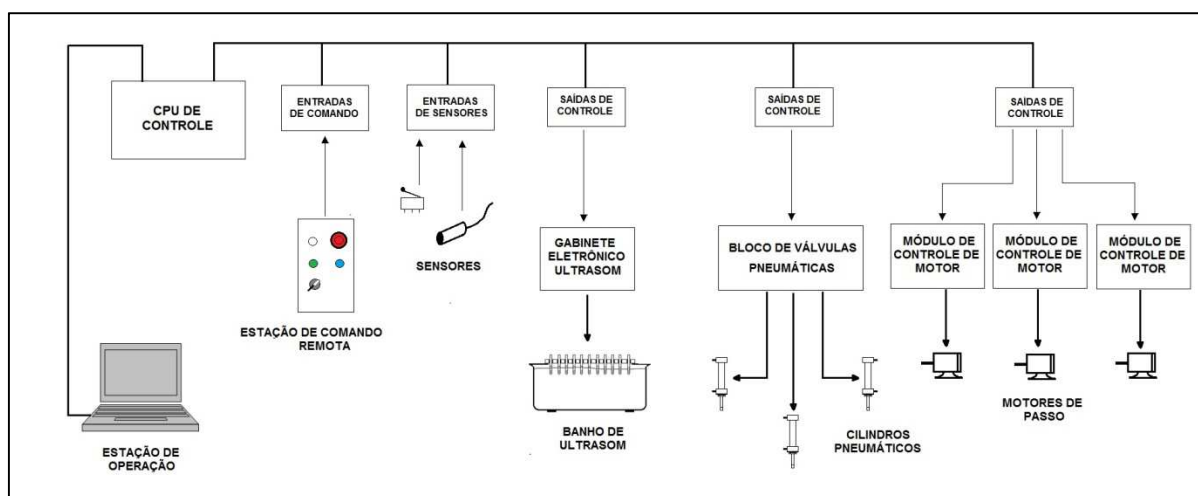


FIGURA 71: Estrutura de automação do sistema.

A distribuição física dos componentes da automação foi feita em cinco locais diferentes, quais sejam o painel eletroeletrônico, a caixa de contenção (*glove-box*), o gabinete do banho de ultrassom, a estação de operação e a estação remota de operação. A FIG. 72 mostra esquematicamente essa distribuição.

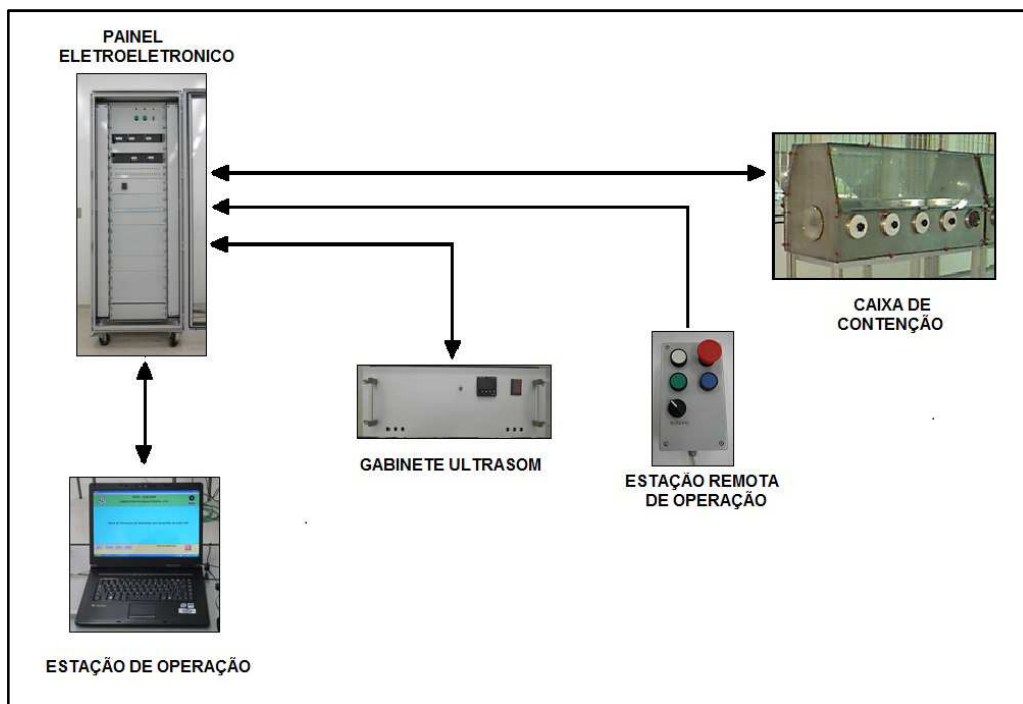


FIGURA 72: Distribuição física dos componentes da automação.

A primeira parte é um painel eletroeletrônico onde foram montados o controle computadorizado do sistema (CLP), as fontes de alimentação elétrica, os módulos de controle dos motores de passo e os demais componentes elétricos. A FIG. 73 mostra as vistas frontal (a) e traseira (b) do painel eletroeletrônico.



(a)



(b)

FIGURA 73: Vistas frontal (a) e traseira (b) do painel eletroeletrônico.

A segunda parte é a estação de operação (*Notebook*) que executa o programa de interface gráfica operacional para a operação do sistema. Essa estação de operação possui telas de operação para cada fase do ensaio de estanqueidade. A FIG. 74 mostra a estação de operação.

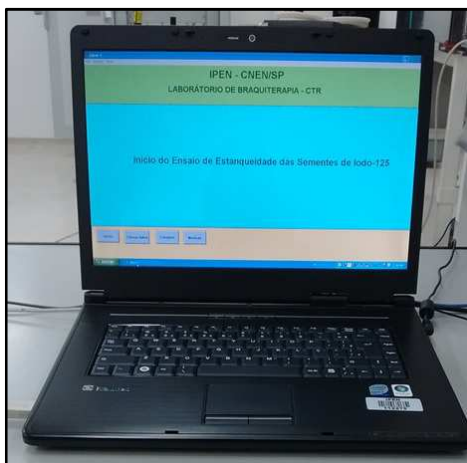


FIGURA 74: Estação de operação.

A terceira parte é uma estação remota de operação com funções resumidas, conectada ao painel eletroeletrônico por um cabo elétrico. Essa estação remota permite ao operador interferir estrategicamente em determinadas etapas do processo estando em qualquer posição ao redor da caixa de contenção e observando os dispositivos e sua movimentação. A estação de operação remota dispõe das funções de “BLOQUEIO” (chave preta) e “EMERGENCIA” (chave vermelha), além de outras três chaves de comando de reserva. A FIG. 75 mostra a estação remota de operação.

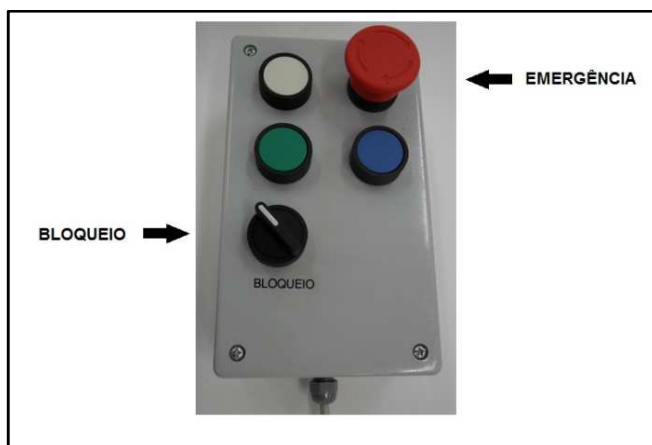


FIGURA 75: Estação remota de operação.

A quarta parte é o gabinete eletrônico do ultrassom, que agrega as placas eletrônicas de acionamento do banho de ultrassom e o controle de temperatura do banho de ultrassom. A quinta parte é a caixa de contenção onde estão montados todos os dispositivos utilizados no processo de ensaio de estanqueidade, além das válvulas pneumáticas, sensores eletromecânicos (*microswitch*) e ópticos.

A alimentação elétrica do sistema foi planejada para que, futuramente, possa receber alimentação ininterrupta com a instalação de equipamento *no-break* com banco de baterias. Esse recurso é necessário uma vez que a queda no fornecimento de energia resultaria em parada dos dispositivos e perda da sequência das operações em execução. O projeto prevê que durante uma queda de energia da rede os dispositivos sejam paralisados em pontos determinados da sequência de operações em execução. O processo fica então temporariamente paralisado até que a alimentação principal de energia seja restabelecida, retornando ao funcionamento normal a partir do ponto de paralisação.

6.10 Interface gráfica operacional

A interface gráfica operacional utilizada na estação de operação foi organizada em telas gráficas, sendo quatro telas para a operação em modo automático e uma tela para execução de comandos manuais direcionados à verificação e manutenção do sistema. Em modo automático a primeira tela é a de “Início do Processo de Ensaio de estanqueidade das Sementes de Iodo-125”. Sempre que a estação de operação é energizada, esta é a tela inicial que se apresenta. A FIG. 76 mostra a tela inicial da interface operacional.

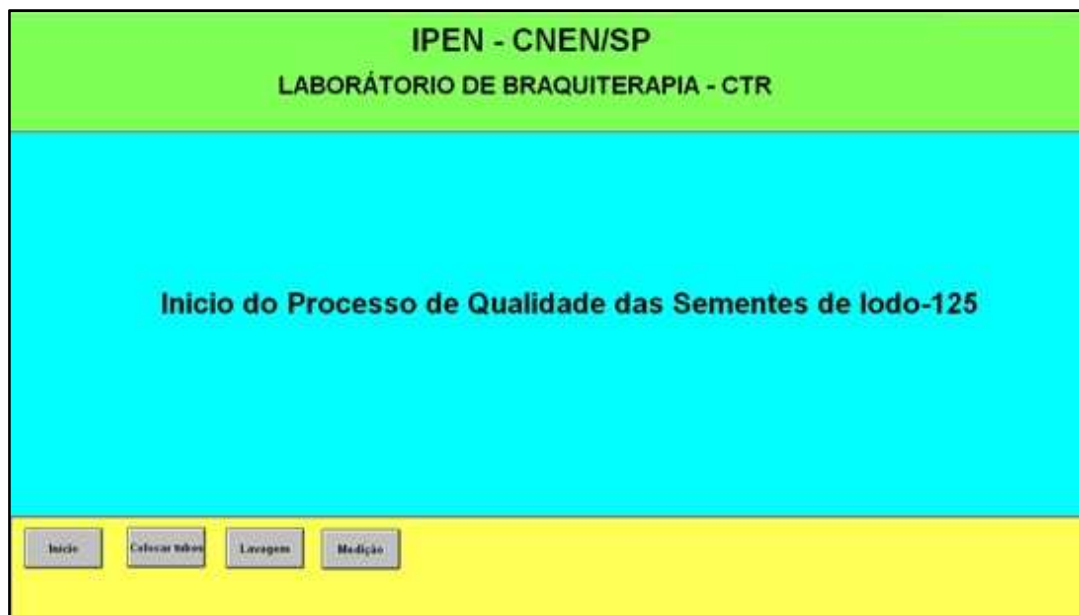


FIGURA 76: Tela inicial da interface operacional.

A primeira etapa a ser executada é sempre a colocação dos tubos contendo as sementes no suporte de tubos no banho de ultrassom, acessada por meio da tela correspondente. A FIG. 77 mostra a tela de operação referente à colocação dos tubos no suporte do banho de ultrassom.

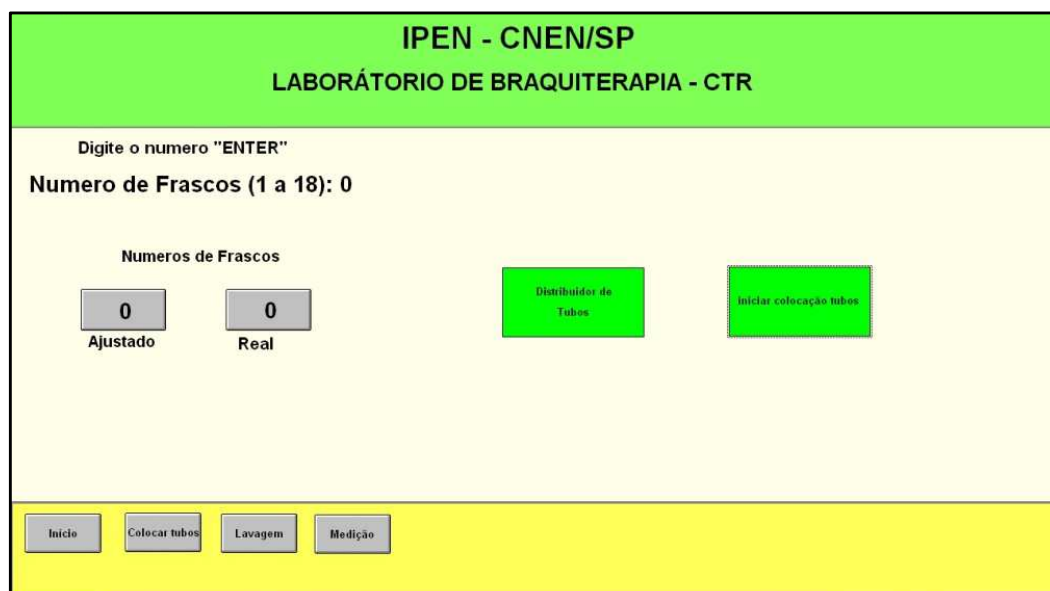


FIGURA 77: Tela de colocação dos tubos no suporte do banho de ultrassom.

Após o término da colocação dos tubos no suporte, o sistema libera a execução da etapa de lavagem e imersão das sementes, que poderá ser iniciada

por meio da tela correspondente. A FIG. 78 mostra a tela de lavagem e imersão das sementes.

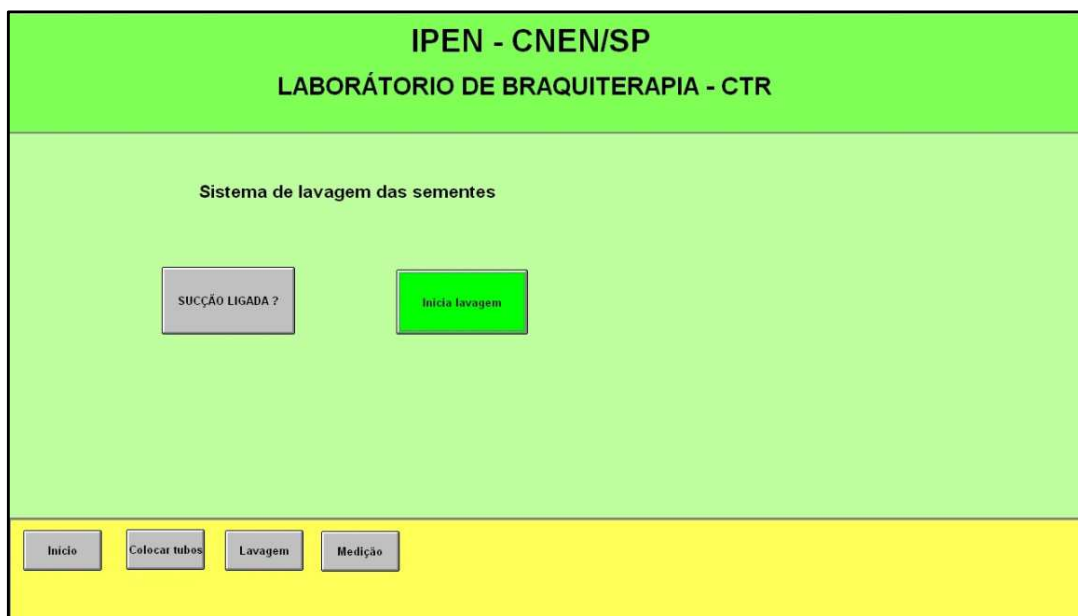


FIGURA 78: Tela de lavagem e imersão das sementes.

Após o término da lavagem do período de imersão o sistema libera a execução da medição da atividade, que poderá ser iniciada por meio da tela correspondente. A FIG. 79 mostra a tela de medição de atividade.

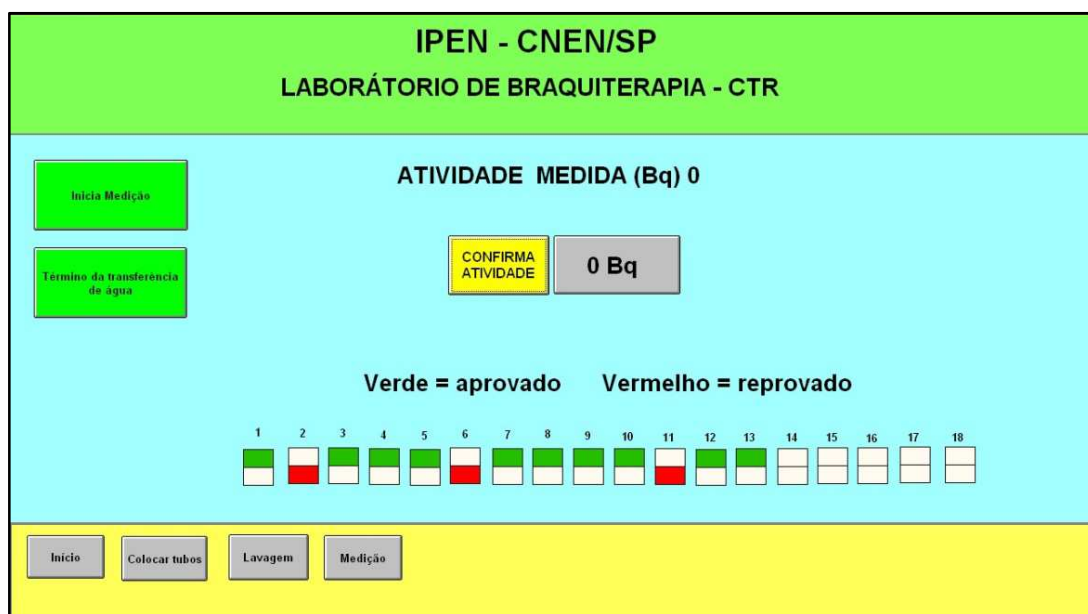


FIGURA 79: Tela de medição de atividade.

Nesta tela, os lotes de sementes estão representados por pequenos retângulos brancos. Ao iniciar esta etapa, o sistema posiciona o primeiro tubo, fixado no suporte de tubos no banho de ultrassom, para a transferência manual da água de imersão. Esse tubo será retirado manualmente do banho e encaixado no suporte para transferência da água. Após o término da transferência o operador posiciona o tubo contendo a água e fechado com rolha em outro suporte, para que seja retirado pelo dispositivo de posicionamento automático. Neste momento o operador informa ao sistema o término da transferência da água por meio de um comando na tela, e o tubo será posicionado automaticamente no detector de radiação, habilitando a digitação da “Atividade Medida”. Após a digitação do valor indicado no medidor, o sistema aguarda o comando “CONFIRMA ATIVIDADE”. Após a confirmação, o sistema analisa o valor digitado e caso seja igual ou menor que 185 Bq (5 nCi), o lote é aprovado e o retângulo relativo ao primeiro lote é sinalizado em verde, caso contrário será sinalizado em vermelho. O operador deverá realizar a impressão do valor medido por meio do comando “*PRINTER*” no medidor de radiação, registrando em papel esse resultado para posterior conferência com os resultados mostrados no sistema automatizado, aumentando a confiabilidade da classificação dos lotes.

Após a medida da água do primeiro lote, o sistema posiciona automaticamente o tubo contendo o segundo lote para a transferência manual da água. O procedimento será repetido até o último tubo.

Ao final, o resultado do ensaio dos lotes de sementes ficará armazenado na memória do Controlador Lógico Programável (CLP) até que este seja desligado e inicializado novamente para a realização de uma nova rotina de ensaios. A tela gráfica da medição de atividade mostrando esses resultados pode ser impressa utilizando-se os comandos usuais disponíveis no sistema operacional Windows XP do *Notebook* da estação de operação. Embora todas as quatro telas de operação possam ser acessadas a qualquer momento, a execução dos respectivos comandos só é liberada pelo sistema na sequência correta das operações, evitando assim erros relacionados a sequência de operações.

As telas gráficas possuem em comum um rodapé onde se encontram os botões de acesso a todas as telas. O sistema sinaliza com a cor verde o botão correspondente à tela liberada para utilização em cada fase da sequência dos

ensaios, orientando o operador para a realização das várias etapas. A FIG. 80 mostra um exemplo da sinalização correspondente à etapa de lavagem das sementes, no rodapé da tela.



FIGURA 80: Sinalização correspondente à etapa de lavagem das sementes.

Além das telas voltadas a operação rotineira do sistema, foi desenvolvida uma tela específica para atividades de manutenção, que necessita de senha de acesso para que possa ser utilizada. Essa tela permite ao pessoal técnico realizar comandos nos diversos dispositivos independentemente do programa de automação instalado. Para que esse recurso seja utilizado, é necessário que o executante seja treinado e conheça profundamente o funcionamento de cada componente do sistema para se evitar acidentes, uma vez que nesse modo de operação, todas as condições de seguranças previstas no programa de automação deixam de atuar. O objetivo desse recurso é permitir ajustes e verificações durante as manutenções preventivas rotineiras ou mesmo para corrigir alguma ocorrência durante a execução do processo. A FIG. 81 mostra a tela de manutenção da estação de operação.

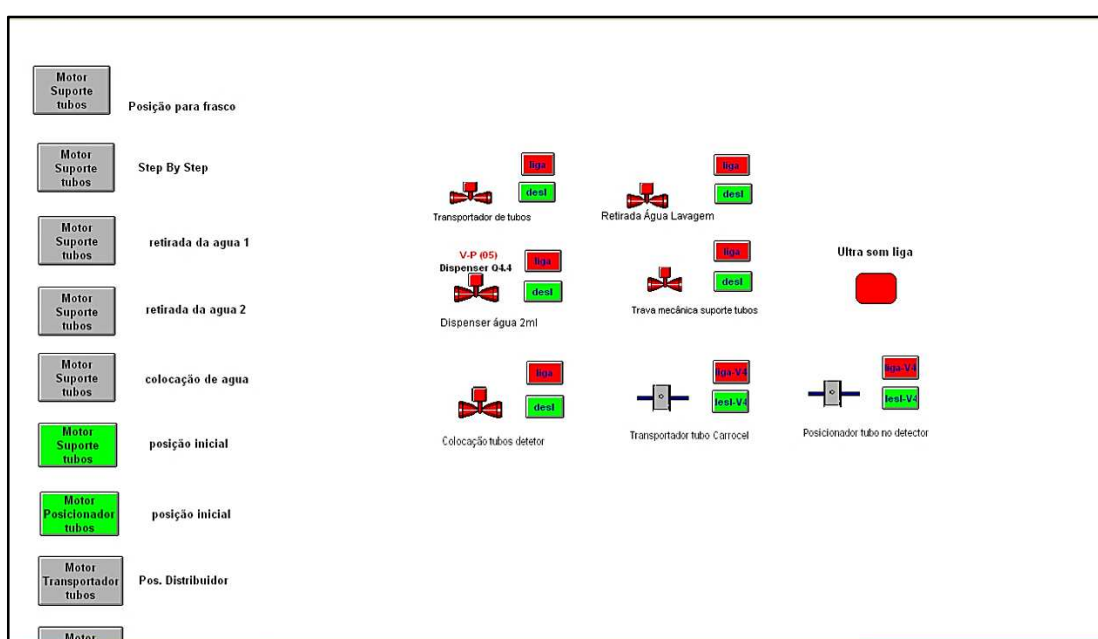


FIGURA 81: Tela de manutenção da estação de operação.

6.11 Programa de automação do sistema

A programação para controle das operações (automação) do sistema foi dividida em quatro blocos, coincidindo com as etapas que são realizadas no ensaio de estanqueidade. Esse programa de automação é executado pela CPU do Controlador Lógico Programável (CLP). Os blocos do programa de automação estão descritos a seguir:

6.11.1 Bloco de programa principal

No bloco principal é executada a inicialização do sistema, toda vez que o sistema é energizado. Neste momento todas as válvulas pneumáticas são desligadas levando os cilindros pneumáticos para sua posição de descanso e todos os dispositivos motorizados recebem um comando para movimentarem-se até suas respectivas posições “zero”. Quando todos os dispositivos se posicionaram em “zero”, ocorre a liberação para executar o próximo passo do programa. Esse procedimento equivale a um auto teste completo na inicialização do sistema, garantindo que todos os sensores, motores e outros componentes estejam funcionando corretamente antes de iniciar a rotina do ensaio. No bloco de programa principal também são executadas as trocas de informação com a estação de operação, recebendo comandos vindos da estação e enviando informações para ela. Além disso, é a partir do bloco de programa principal que são ativados os outros blocos de programa, chamados de sub-rotinas, referentes a cada uma das etapas do ensaio de estanqueidade. Após a inicialização do sistema, poderão ser executadas as operações do ensaio de estanqueidade, na sequencia pré-determinada.

6.11.2 Bloco de programa de colocação dos tubos no suporte do banho de ultrassom.

Ao comando do operador serão acionados três dispositivos simultaneamente: dispositivo de fornecimento de tubos, transportador de tubos e suporte de tubos do banho de ultrassom. Os tubos são retirados um a um do

dispositivo de fornecimento de tubos e são posicionados no suporte de tubos do banho de ultrassom. Ao término dessa operação será liberada a execução do terceiro bloco, que realiza a lavagem das sementes.

6.11.3 Bloco de programa de lavagem e imersão das sementes

Ao comando do operador, a operação de lavagem das sementes é iniciada e serão executadas sequencialmente três operações:

- colocação de água nos tubos contendo as sementes;
- aplicação de ultrassom;
- retirada de água dos tubos.

Esse ciclo de colocação de água, aplicação de ultrassom e retirada de água é realizado cinco vezes e ao final dos cinco ciclos de lavagem, o programa realiza novamente a colocação de água nos tubos, aplica o ultrassom por 10 minutos e entra em condição de espera, pois se inicia o período de 24 horas de imersão das sementes, sendo este período controlado pelo operador.

O número de lavagens e o tempo de aplicação de ultrassom permitem grande faixa de ajuste neste bloco de programa, sendo possível ajustar até 20 lavagens e aplicação de até 120 minutos de ultrassom. O próximo bloco a ser executado é o bloco referente à medida de atividade, que se inicia ao comando do operador, após o término do período de imersão.

6.11.4 Bloco de programa de medida de atividade

Após a transferência de água de imersão das sementes para o tubo limpo, que é realizada manualmente, o tubo contendo a água será posicionado pelo operador no suporte para que seja retirado pelo dispositivo de posicionamento automático. Ao comando do operador, o tubo contendo a água de imersão é retirado de seu suporte e posicionado no detector de radiação. Após o término da medida de atividade o operador digita na estação de operação o valor de atividade indicado no detector e o programa classifica o lote de sementes com a cor verde ou a cor vermelha (aprovado ou reprovado) na tela de medida de atividade. Após a classificação do lote o programa comanda a retirada do tubo do detector e o descarta em um recipiente de rejeito. Além disso, o operador deverá acionar o comando “*PRINTER*” no medidor de radiação, para documentar o

resultado do ensaio do lote. Esse procedimento se repetirá para todos os lotes de sementes.

Após o término das medições de atividade, a execução do programa se encerra e todos os dispositivos permanecem parados em suas últimas posições. Para execução de uma nova rotina de ensaios, o sistema deverá ser inicialmente desligado. Nessa condição, os dispositivos ficam desativados permitindo a intervenção do operador. Ao ser energizado novamente, o sistema inicia uma nova sequência de ensaio.

Após o término de uma rotina de ensaio de estanqueidade, os resultados de classificação dos respectivos lotes de sementes ficam armazenados na memória do sistema, podendo ser acessados pela tela de medida de atividade, na estação de operação. Ao se desligar o sistema para iniciar uma nova rotina de ensaios, essas informações são apagadas da memória, dando lugar aos resultados dos próximos lotes de sementes.

6.12 Simulação operacional do sistema

Durante a simulação operacional do sistema o processo de ensaio de estanqueidade foi realizado 80 vezes, correspondendo a aproximadamente um ano de operação. As operações foram realizadas seguindo a sequência determinada pela interface operacional e o controle computadorizado.

No início de cada simulação, após a energização do sistema, ocorreu a inicialização automática do mesmo. Em todas as simulações a inicialização se realizou de maneira satisfatória, com os dispositivos atingindo as suas respectivas posições de “zero”, e em seguida possibilitando a realização da sequência de operações dos ensaios. Nenhuma ocorrência foi registrada nessa primeira fase das simulações.

A primeira operação a ser realizada em cada simulação foi a colocação dos tubos no suporte do banho de ultrassom. Durante as primeiras 22 simulações, esta operação ocorreu satisfatoriamente. Porém na simulação de número 23 o dispositivo de transporte do tubo apresentou um desajuste mecânico, ocasionando um pequeno desvio na posição de colocação do tubo no suporte. A FIG. 82 mostra o desajuste no posicionamento do tubo.



FIGURA 82: Desajuste no posicionamento do tubo.

Esse desvio ocorreu devido ao afrouxamento da fixação da polia sincronizada que faz o tracionamento da correia de transporte do tubo. O desvio não foi suficientemente grande para impedir a continuidade da operação, porém assim que foi notado, a execução da rotina foi suspensa e o desvio foi sanado corrigindo-se a posição de colocação do tubo no suporte do banho de ultrassom. Essa correção foi feita no módulo de controle eletrônico do motor de passo. Além disso, foram reapertadas as fixações das polias que tracionam a correia de transporte do tubo, evitando a repetição do problema.

Após esse ajuste a simulação em curso continuou sem que houvesse perda da sequência de operações. Até o final das simulações não ocorreu novamente o mesmo problema.

Outra ocorrência foi registrada na simulação de número 62, referente à operação de colocação dos tubos no suporte do banho de ultrassom. O sensor óptico que supervisiona a retirada de tubos do dispositivo de fornecimento de tubos necessitou ser reposicionado devido à falha na detecção de retirada do

tubo. O ajuste foi realizado interrompendo-se as operações em andamento e foi realizado também um reaperto dos elementos de fixação do sensor óptico. A FIG. 83 mostra o sensor óptico e o ajuste de posição.

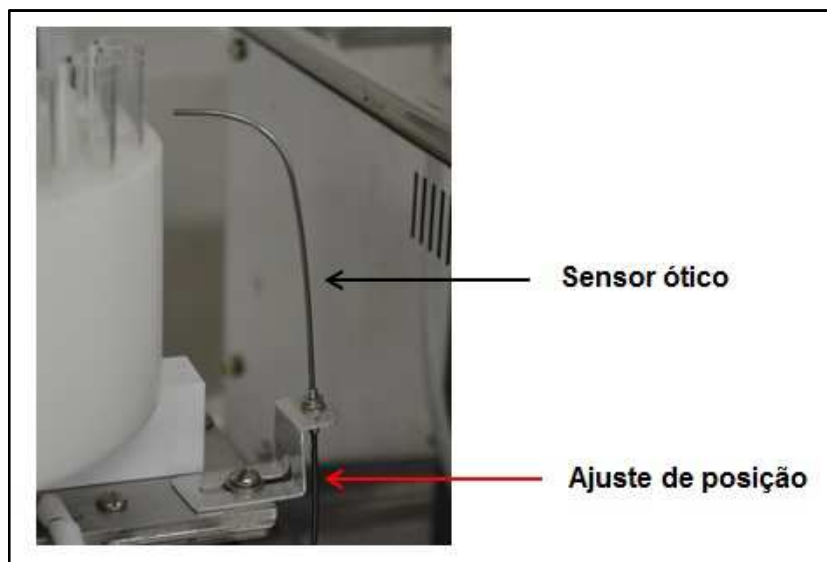


FIGURA 83: Sensor óptico e ajuste de posição.

Após a colocação dos tubos no suporte, tem início a lavagem das sementes. Inicialmente ocorre a operação de colocação de água nos tubos, em seguida o ultrassom é ligado por 10 minutos e logo após a água é retirada dos tubos pelo dispositivo de retirada de água dos tubos. Esse ciclo é repetido por cinco vezes e então se inicia o período de imersão das sementes em água.

Durante a simulação de número 38, houve a ocorrência de pequenos respingos de água para fora dos tubos, devido ao excesso de velocidade do dispositivo durante a colocação de água. Foi realizado o ajuste da velocidade durante a operação, sem a necessidade de interrupção da mesma. Até o final das simulações esse problema não ocorreu novamente. O ajuste de velocidade do dispositivo de colocação de água é realizado nas válvulas de controle de vazão de ar, conectadas ao cilindro pneumático que aciona o dispositivo. A FIG. 84 mostra uma imagem das válvulas ajustadas.

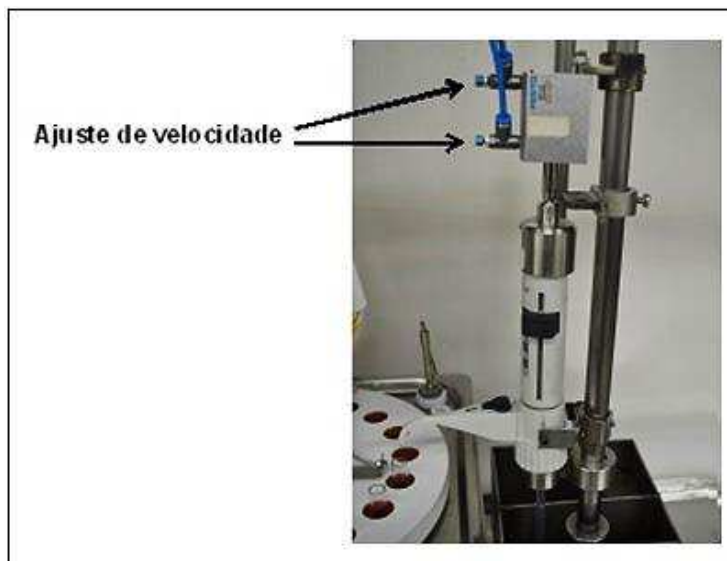


FIGURA 84: Válvulas de ajuste de velocidade.

A operação de transferência da água de imersão foi realizada manualmente utilizando-se pipeta automática e ponteiros descartáveis. A operação manual é simples, não tendo sido registrada nenhuma ocorrência na realização desta operação, nem mesmo fadiga no operador decorrente dessa operação. As operações de transferência de água não são feitas de modo contínuo, mas intercaladas com outras tarefas, permitindo o descanso na atividade manual do operador no período compreendido entre duas operações de transferência de água.

Após a transferência manual da água de imersão das sementes o tubo contendo a água é encaixado manualmente em um suporte de tubo, de onde o dispositivo automático o retira para posicioná-lo no detector de radiação. Após o posicionamento será feita a medida da atividade e classificação do lote de sementes. Durante as simulações não foram registradas ocorrências relativas aos dispositivos que realizam essa etapa do processo.

Durante as primeiras 50 simulações operacionais o tempo de execução de cada uma das operações foi propositalmente estendido, de modo a permitir o acompanhamento detalhado dos movimentos executados. Durante as últimas 30 simulações o tempo foi gradativamente reduzido até um valor mínimo, necessário para garantir a segurança e a precisão de movimentos. A redução se deu em grande parte pelo aumento da velocidade dos movimentos, tanto nos motores de passo como nos cilindros pneumáticos. Em ambos os casos o limite máximo da

velocidade dos movimentos foi estabelecido para evitar acelerações e desacelerações bruscas e solavancos, que podem ocasionar quedas e espalhamento dos materiais transportados, além de aumentar o risco de posicionamentos imprecisos. Além disso, foram suprimidas algumas pausas entre as operações, incluídas no programa para facilitar a supervisão dos movimentos durante os primeiros testes funcionais. Para se determinar o tempo de execução da etapa de medida de atividade, foi feita a somatória dos tempos parciais para a medida de atividade da água de cada um dos tubos. Isto porque cada medida de atividade é intercalada com a correspondente transferência de água de imersão, realizada manualmente. A TAB.6 mostra os tempos de execução parciais e totais obtidos durante as simulações.

TABELA 6: Tempos de execução parciais e totais nas simulações operacionais (minutos:segundos).

	Simulações nº 1 a 50	Simulações nº 71 a 80
Inicialização do sistema	00:33	00:30
Colocação dos tubos no banho	06:30	05:20
Lavagem das sementes	36:10	32:35
Medida de atividade	22:30	21:05
TOTAL	65:43	59:30

O período de 24 horas para imersão das sementes não foi considerado, uma vez que é definido pela norma ISO 9978. Também foram excluídos os períodos de aplicação de ultrassom, que se mantiveram fixos. Ao excluirmos esses períodos e analisarmos o restante das operações, nota-se uma redução de 10,5% no tempo de execução do ensaio para as dez últimas simulações, em relação às 50 simulações iniciais.

Os componentes mecânicos, eletromecânicos, pneumáticos e eletrônicos que foram utilizados na construção deste sistema automatizado sofrem desgaste

ao longo do tempo e tem como uma de suas características a necessidade de revisões periódicas para prevenir possíveis ocorrências, além das que foram relatadas nas simulações operacionais. Devido a essa característica deverão ser realizadas paradas de produção rotineiras para as atividades de manutenção preventiva e revisão de todo o sistema, com a realização de simulações operacionais ao final das revisões, garantindo o perfeito funcionamento do sistema. Durante essas manutenções, todos os dispositivos do sistema deverão passar por verificação, com reaperto de porcas e parafusos, bem como das conexões elétricas.

Deverá ser dispensada especial atenção aos componentes mecânicos, destacadamente elementos de fixação, elementos sujeitos a atrito e componentes pneumáticos, uma vez que estes elementos foram os que provocaram as ocorrências durante a simulação operacional.

Além disso, deverá ser realizada periodicamente uma verificação no programa de automação utilizado, bem como nos demais programas e aplicativos utilizados no sistema, garantindo sua fidelidade à versão original aprovada nas simulações operacionais e prevenindo falhas de processamento devidas a programas corrompidos por qualquer tipo de anomalia.

Foi estabelecido um intervalo de 45 dias (6 semanas) entre as manutenções preventivas periódicas do sistema, após este entrar em regime produtivo. Esse intervalo é menor do que o menor intervalo entre as intervenções ocorridas durante a simulação operacional, de 10,5 semanas, e é também inferior ao tempo médio entre as falhas ocorridas (MTBF) igual a 28 semanas.

Após o sistema entrar em ritmo produtivo, todas as ocorrências que aconteçam deverão ser analisadas, podendo alterar-se o intervalo entre revisões periódicas e a lista de verificações, em função dessa análise.

6.13 Tratamento dos rejeitos sólidos e líquidos

Durante a realização dos ensaios de estanqueidade por meio do sistema automatizado, são gerados resíduos líquidos que podem apresentar contaminação pelo radioisótopo iodo-125. Toda a água utilizada nas lavagens das sementes estará contida ao final do ensaio, no frasco de armazenamento que

se conecta ao dispositivo de retirada de água dos tubos. Esse frasco tem a capacidade de 5 litros, sendo o volume de água utilizado em cada ensaio de estanqueidade de aproximadamente 200 mL, o que permite a realização de 25 ensaios até que o frasco esteja completamente cheio.

O frasco de armazenamento possui tampa com vedação em borracha garantindo a segurança com relação a derramamentos e possui conexões de engate rápido, permitindo sua substituição por outro frasco vazio com muita facilidade. Após o seu completo preenchimento, o frasco deverá ser substituído e receberá destinação, conforme as diretrizes a serem estabelecidas em estudos de gerenciamento de rejeitos.

Os rejeitos sólidos gerados nos ensaios de estanqueidade são os tubos utilizados para as lavagens e imersão das sementes, as ponteiros de pipeta utilizadas na transferência da água de imersão e os tubos contendo a água de imersão fechados com rolhas de borracha. Estes materiais serão acondicionados em sacos plásticos para essa finalidade e retirados do interior da caixa de contenção para destinação conforme as diretrizes a serem estabelecidas em estudos de gerenciamento de rejeitos. Os lotes de sementes reprovados permanecerão nos tubos correspondentes onde foram efetuadas a lavagem e imersão das sementes e receberão tratamento diferenciado, não se misturando aos rejeitos aqui descritos.

6.14 Estratégias de segurança e tratamento das possíveis falhas

Foram analisadas as possíveis falhas que possam interromper o funcionamento do sistema e os possíveis erros de operação, que podem ser corrigidos com a paralisação temporária do ensaio. Após avaliar essas possíveis ocorrências foram estabelecidas estratégias para minimizar suas consequências.

6.14.1 Falhas de equipamento

Esse tipo de falha diz respeito a todos os elementos elétricos, mecânicos e eletrônicos que fazem parte do sistema automatizado. As falhas elétricas que causam sobrecargas ocasionarão o desligamento automático da alimentação

elétrica correspondente, efetuado por componentes de proteção no circuito elétrico. O Controlador Lógico Programável (CLP) executa automaticamente uma rotina de supervisão de todos os seus 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. Caso contrário, estas deverão ser detectadas pelo operador, pois as falhas mecânicas alteram o comportamento dinâmico dos dispositivos, interrompendo movimentos, provocando ruídos anormais, vibrações, e outros efeitos que destoam do funcionamento normal do equipamento e podem ser percebidos visualmente ou auditivamente. Para detectar esse tipo de falha, o operador deve ser treinado, possuir experiência na execução do processo e acompanhar passo a passo cada operação durante a sua execução.

No caso de qualquer falha detectada pelo operador, que não tenha causado o desligamento automático, este deverá utilizar o botão de comando “EMERGENCIA”, posicionado na estação de operação remota, descrita anteriormente. O comando “EMERGENCIA” 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. Esse comando causa a interrupção do ensaio e a perda da sequência das operações já executadas.

6.14.2 Falhas de operação

O operador interage fisicamente com os dispositivos automatizados em três situações:

- a) No abastecimento manual do dispositivo automático de fornecimento de tubos, no início do ensaio de estanqueidade;
- b) Na retirada dos tubos do banho de ultrassom, após o período de lavagem e imersão das sementes;

c) Na colocação do tubo com a água de imersão no suporte de onde será retirado pelo posicionador automático, para medida de atividade.

No primeiro caso (a) existe um sensor óptico que detecta a presença de tubo na posição de retirada do mesmo. Caso o operador não tenha colocado a quantidade de tubos programada ou deixe uma posição intermediária sem tubo, o sensor detecta essa condição no momento da retirada dos tubos e o programa de automação interrompe a operação em andamento e aciona uma sinalização visual na tela de operação. Nesse caso o operador pode colocar o tubo faltante, e assim que o sensor detecta a presença do tubo o sistema permite seguir com a operação. Em caso de colocação de tubos em número maior que o programado, o sistema utilizará a quantidade programada e os tubos colocados em excesso não serão processados.

No segundo caso (b) o operador é obrigado a retirar cada um dos tubos do banho, iniciando pelo tubo nº 1, cuja posição no suporte de tubos é identificada com uma marca gráfica. Este tubo será posicionado automaticamente para sua retirada através do giro do suporte de tubos do banho de ultrassom, de modo a permitir a sua retirada manual, enquanto os outros tubos não estarão em posições de acesso para retirada. Após a retirada do tubo nº 1, o sistema posicionará o tubo nº 2 e assim sucessivamente.

No terceiro caso (c) o suporte onde o tubo deve ser colocado manualmente possui um sensor óptico que detecta a presença e a ausência de tubo e interrompe a operação automatizada acionando uma sinalização visual na tela de operação. O operador poderá colocar o tubo em posição e assim que o sensor detecta a presença do tubo o sistema permite prosseguir com a operação.

Além das situações descritas, onde o sistema atua automaticamente, foi instalado outro recurso, este de atuação manual, que permite a interrupção do processo em qualquer das operações, e o retorno ao funcionamento no mesmo ponto. Este recurso é uma chave de comando elétrico chamado “BLOQUEIO”, instalado na estação de operação remota, descrita anteriormente. Ao acionar o comando “BLOQUEIO” o operador interrompe a sequência de operações que está sendo realizada automaticamente e pode atuar junto aos dispositivos para solução de problemas, para fazer uma verificação visual com os dispositivos parados, para correções de erros operacionais não detectados automaticamente

e outros que possam vir a ocorrer. Após a intervenção a chave de “BLOQUEIO” é desligada e a operação automática é retomada.

6.14.3 Falha no fornecimento de energia elétrica

Durante uma queda de energia da rede, o sistema será suprido através de um equipamento *no-break* com banco de baterias. Enquanto perdurar a falta de energia da rede, o sistema mantém ativada automaticamente a função “BLOQUEIO”, interrompendo as operações. Após o retorno da energia da rede, o sistema habilita o comando do operador para o reinício da operação, a partir do ponto onde foi interrompida.

6.14.4 Falha no suprimento de ar comprimido, vácuo e sucção

Através de pressostatos ligados às linhas de ar comprimido, de vácuo e de sucção, o sistema monitora possíveis interrupções nessas linhas, quer seja por desligamento dos equipamentos ou por vazamentos ou rompimentos nas tubulações correspondentes. No caso dessas falhas o sistema ativará a função “BLOQUEIO”, com procedimento similar ao utilizado para queda de energia elétrica, liberando a reativação das operações após a normalização do suprimento correspondente.

Nas linhas de ar comprimido e de vácuo, deverão são instaladas válvulas anti-retorno nas conexões de entrada da caixa de contenção, isolando os vazamentos que acontecerem no lado externo da caixa. Dessa maneira consegue-se manter os dispositivos nas suas últimas condições de operação ainda por um determinado período de tempo após o ocorrido. Nos ensaios efetuados, conseguiu-se manter os dispositivos ativados por cerca de dois minutos no caso de falta de vácuo e ar comprimido.

No desenvolvimento do sistema automatizado de ensaios de estanqueidade e durante as extensas simulações operacionais, diversas condições inseguras ou errôneas foram corrigidas, além de terem sido estabelecidas as estratégias de tratamento de falhas descritas.

Os sistemas de automação e os dispositivos de segurança, por mais elaborados que sejam apresentam limitações e por sua vez também podem falhar, não sendo possível desenvolver sistema completamente seguro e isento de falhas.

Para aumentar a segurança e a confiabilidade deste sistema automatizado, essas estratégias devem ser periodicamente revisadas e atualizadas, considerando-se a experiência que será acumulada durante a utilização do sistema.

7. CONCLUSÃO

O sistema desenvolvido realizou satisfatoriamente a rotina de ensaios de estanqueidade, com pequena intervenção do operador, conforme planejado.

Os dispositivos desenvolvidos funcionaram cada qual individualmente e também em conjunto, com movimentos sincronizados e controlados por uma central computadorizada. As intervenções do operador no sistema automatizado foram efetuadas por meio de uma estação de operação que permite a realização dos diversos comandos, na correta sequência de operação do ensaio de estanqueidade, e também por meio de uma estação remota de operação que permite comandos para a interrupção das operações do ensaio de estanqueidade.

No início do processo o dispositivo de fornecimento de tubos foi abastecido manualmente com tubos plásticos preenchidos com lotes de sementes. Em seguida o sistema foi energizado e todos os dispositivos se posicionam em “zero”. Na sequência o operador executou comandos orientados pela interface gráfica de operação, na estação de operação, e todos os lotes de sementes foram submetidos ao ensaio de estanqueidade. Finalmente os lotes aprovados ficaram sinalizados em verde enquanto os lotes reprovados foram sinalizados em vermelho, na tela gráfica correspondente.

O sistema automático foi testado perfazendo um total de 80 simulações do processo de ensaios de estanqueidade. O tempo total necessário para a execução do ensaio, excetuando-se o período de imersão das sementes e as intervenções realizadas manualmente, foi reduzido em 10,5% desde o início até o final das simulações. Nas últimas dez simulações realizadas o tempo para realização do ensaio foi de 59 minutos e 43 segundos.

Durante as simulações operacionais houve algumas ocorrências que necessitaram intervenção para corrigir pequenos desajustes de alguns dos dispositivos. Devido a essas ocorrências e a necessidade característica dos equipamentos eletromecânicos de passar por revisões periódicas, foi estabelecida a realização de manutenções preventivas periódicas do sistema e para atender essa necessidade, deverão ser feitas paradas de produção programadas.

Foi estabelecido um intervalo de 45 dias entre as manutenções preventivas periódicas do sistema, após este entrar em regime produtivo. Esse intervalo é

menor do que o menor intervalo entre as intervenções ocorridas durante a simulação operacional e aconteceria a cada 12 campanhas de produção.

Durante as paradas programadas deverá ser feita uma revisão completa do sistema, incluindo todos os equipamentos eletromecânicos, eletrônicos e pneumáticos com seus ajustes, além da realização de uma nova simulação operacional, para garantir o perfeito funcionamento de todo o sistema.

TRABALHOS FUTUROS

- Integração do sistema de controle computadorizado dos ensaios de estanqueidade com outros computadores utilizados para atividades gerenciais;
- Desenvolvimento de controle automático de nível da água no banho de ultrassom;
- Integração do medidor de radioatividade CRC-15W com o sistema de controle computadorizado dos ensaios de estanqueidade, preservando a participação do operador na classificação dos lotes de sementes
- Realização de ensaios de estanqueidade em diversos lotes de sementes com núcleo radioativo, recém-soldadas, avaliando o procedimento de limpeza superficial nessas condições e as possíveis falhas de estanqueidade nas sementes;
- Planejamento e realização de experimentos integrando os processos de adsorção, soldagem das sementes e ensaio de estanqueidade, avaliando as possíveis interferências entre os processos;
- Realização de ensaios de estanqueidade nos lotes de sementes produzidos em escala de produção piloto, fazendo levantamento de dados estatísticos sobre todas as etapas da produção de sementes de iodo-125 no CTR.
- Preparação dos processos de pedidos de patente dos dispositivos desenvolvidos;
- Publicação de artigos relacionados aos vários desenvolvimentos realizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

-
- 1 - ONCOGUIA 2014. **Estimativas de câncer no mundo**. Disponível em :
<<http://www.oncoguia.org.br/conteudo/estimativas-no-mundo/1706/1/>>. Acesso em 21/01/2015.
 - 2 - BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. DATASUS. **Informações de Saúde (TABNET). Estatísticas Vitais**. Disponível em:
<<http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/tabcgi.exe?sim/cnv/obt10uf.def>>. Acesso em 21/01/2015.
 - 3 - BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER. **Estimativa 2014: Incidência de câncer no Brasil**. Rio de Janeiro: 2013. Disponível em <www.inca.gov.br>, acessado em 06/01/2014.
 - 4 - SPENCE, A. P. **Anatomia humana básica**. São Paulo. Manole. 1991.
 - 5 - SROUGI, M. **A próstata como ela é**. Folha de São Paulo, São Paulo, 03 de nov. 2002. Caderno Cotidiano, p. 8.
 - 6 - DAVIS, B. J. ; HORWITZ, E. M. ; LEE, W. R. ; CROOK, J. M. ; STOCK, R. G. ; MERRICK, G. S. ; BUTLER, W. M. ; GRIMM, P. D. ; STONE, N. N. ; POTTERS, L. ; ZIETMAN, A. L. ; ZELEFSKY, M. J. **American Brachytherapy Society consensus guidelines for transrectal ultrasound-guided permanent prostate brachytherapy**. Brachytherapy Vol. 11. Pag. 6~19. 2012.
 - 7 - NATIONAL COMPREHENSIVE CANCER NETWORK. **NCCN Guidelines for patients-Prostate câncer**. Version 1.2015. Disponível em:
<<http://www.nccn.org/patients/guidelines/prostate/files/assets/common/downloads/files/prostate.pdf>>. Acesso em 27/06/2015.

-
- 8 -- AMERICAN CANCER SOCIETY, NCCS-ACS. **Prostate cancer treatment. Guidelines for patients.** 1999.
- 9 - OKUNO, E. ; CALDAS, I. L. ; CHOW, C. **Física para ciências biológicas e biomédicas.** São Paulo: Harper & Row do Brasil. 1982.
- 10 - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. PODGORSK, E.B. **Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students.** Vienna: 2005.
- 11 - ROSTELATO, M. E. C. M.; RELA, P. R.; GASIGLIA, H. T.; LEPKI, V.; FEHER, A.; **Iodine-125 seeds production for brachytherapy use.** In: WORLD CONGRESS ON MEDICAL PHYSICS AND BIOMEDICAL ENGINEERING, July 23-28, 2000, Chicago. **Proceedings...** Chicago, 2000.
- 12 - ABOUT CANCER. **Cancer information and treatment.** Disponível em <<http://www.aboutcancer.com/seed.htm>>. Acesso em 17/10/2015.
- 13 - COSTA, O. L. **Estudo e desenvolvimento de uma nova metodologia de produção de iodo-125 a partir de xenônio-124 pelo método de ativação neutrônica.** 2015. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas energéticas e Nucleares. São Paulo.
- 14 - MUGHABGHAB, S. F. **Thermal Neutron Capture Cross Sections, Resonance Integrals and g-Factors.** INDC(NDS)- 440, IAEA, Vienna, 2003. Disponível em: <<http://www-nds.iaea.org/publications/indc/indc-nds-0440.pdf>>. Acesso em: 12 jun. 2015.
- 15 - REUS, U.; WESTMWER, W. **Atomic Data and Nuclear Tables.** 29: 193-406, 1983.
- 16 - FIRESTONE, R. B.; SHIRLEY, V.S. (Editor) **Table of Isotopes – 8th Edition –** Volume I: A = 150 – 150. John Wiley & Sons Inc. New York. 1996

-
- 17 - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. 2007. **Update of X ray and gamma ray decay data standards for detector calibration and other application.** Vienna. Disponível em: <<http://www.iaea.com>>. Acesso em 20/08/2015.
- 18 - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Vienna, January 2003. **Manual for reactor produced radioisotopes.** IAEA-TECDOC-1340.
- 19 - ROSTELATO, M. E. C. M. **Estudo e desenvolvimento de uma metodologia para confecção de sementes de iodo-125 para aplicação em braquiterapia.** 2005. Tese (Doutorado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo.
- 20 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Implantes para cirurgia – materiais metálicos parte 2: titânio puro,** Maio 2001. (NBR ISO 5832-2).
- 21 - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Unalloyed titanium for surgical implant applications.** 1977. (F67 - F77).
- 22 - ONCURA ONCOSEED TM IMC6711. **Instructions for the use of Iodine-125 Seeds for Medical Brachytherapy Treatments.** Arlington Heights, Illinois, 2005.
- 23 - INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **Radiological protection – Sealed radioactive sources – General requirements and classification.** Feb. 15, 2012. (ISO-2919).
- 24 - MOURA, E. S. **Estudo e levantamentos de parâmetros para dosimetria de fontes de iodo-125 aplicadas em braquiterapia.** 2011. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

-
- 25 - MEIGOONI, A. S.; YOE-SEIN, M. M.; AL-OTOOM, A. Y.; SOWARDS, K. T. **Determination of the dosimetric characteristics of Inter Source 125 iodine brachytherapy source.** *Appl. Radiat. Isot.*, v. 56, n. 4, p. 589-599, 2002.
- 26 - ZEITUNI, C. A. **Dosimetria de fontes de iodo-125 aplicadas em Braquiterapia.** 2008. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas energéticas e Nucleares. São Paulo.
- 27 - SOUZA, C. D. **Comparação entre métodos de fixação do iodo radioativo em substrato de prata para confecção de fontes utilizadas em Braquiterapia.** 2012. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas energéticas e Nucleares. São Paulo.
- 28 - FEHER, A. **Desenvolvimento de procedimento utilizando processo de soldagem plasma para confecção de sementes de 125I.** 2006. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas energéticas e Nucleares. São Paulo.
- 29 - FEHER, A.; CALVO, W. A. P.; ROSTELATO, M. E. C. M.; ZEITUNI, C. A.; SOMESSARI, S. L.; COSTA, O. L.; MOURA, J. A. MOURA, E. S.; SOUZA, C. D.; RELA, P. R. **Development of an encapsulation method using plasma arc welding to produce iodine-125 seeds for brachytherapy.** In 2011 International Nuclear Atlantic Conference – INAC 2011, October 24-28, 2011, Belo Horizonte, MG. **Proceedings...** Belo Horizonte, ABEN, 2011 DVD-ROM.
- 30 - FEHER, A. **Estudo e desenvolvimento de um sistema de soldagem a laser nd:yag para produção de sementes de iodo-125 utilizadas em braquiterapia.** 2014. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas energéticas e Nucleares. São Paulo.
- 31 - SUZUKI, F. F.; MITAKE, M. B.; KODAMA, Y.; LIMA, R. S. **Considerations in the Leakage Test on Sealed Radioactive Sources.** International Congress of

the International Radiation Protection Association, 12th, October 19-24, 2008, Buenos Aires, Argentina.

- 32 - INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **Radiation protection – sealed radioactive sources – leakage test methods**. Feb. 15. 1992. (ISO 9978).
- 33 - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANISATION, OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, WORLD HEALTH ORGANIZATION. **International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources**, Safety Series No. 115, IAEA, Vienna (1996).
- 34 - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards**. IAEA safety standards series no. Gsr part 3 (interim). Viena. 2011.
- 35 - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR – CNEN. Norma CNEN NN 3.01. **Diretrizes básicas de proteção radiológica**. Março de 2014.
- 36 - HILARIS, B. S. ; MASTORAS, D. A. ; SHIH, L. L. ; BODNES, W. R. **History of brachytherapy: the years after the Discovery of radium and radioactivity**. In: Nag, s. Principles and practice of brachytherapy. N. Y.: Futura Publishing Company Inc, 1997.
- 37 - SOCIEDADE BENEFICENTE ISRAELITA BRASILEIRA- ALBERT EINSTEIN. **Tratamento oncológico**. Disponível em:< www.einstein.br/hospital>. Acesso em 12/10/2015.

-
- 38 - FERNANDES, M. A. R.; ***Utilização de moldes radioativos especiais de folha de Ouro-198 para braquiterapia em tumores de pele.*** 2000. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo.
- 39 - HAZLETON – NUCLEAR SCIENCE CORPORATION. Donald C. Lawrence. ***Therapeutic metal seed containing within a radioactive isotope disposed on a carrier and method of manufacture.*** US Pat. n. 3,351,049, nov. 7, 1967.
- 40 - WHITMORE, W. F.; HILLARIS, B.; GRABSTALD, H. ***Retropubic implantation of iodine-125 in the treatment of prostatic cancer.*** J. Urol., v. 108, p. 918, 1972.
- 41 - HOLM, H. H. ***The history of interstitial brachytherapy of prostatic cancer.*** Semin. Surg. Oncol., v. 13, n. 6, p. 432-437, 1997.
- 42 - FAN, H.; JIN, X.; BAI, H. ***Preparation of ¹²⁵I seed sources for implantation therapy of prostate cancer.*** Final report of a coordinated research project. IAEA -TECDOC-1512. 2001–2005.
- 43 - SON, K.J.; LEE, J.S.; PARK, U.J.; HONG, S.B.; SEO, K.S.; HAN, H.S. ***Development of miniature radiation sources for medical and non-destructive test applications.*** Final report of a coordinated research project. IAEA -TECDOC-1512. 2001–2005.
- 44 - BENITES, M.; MIRANDA, J.; CONDOR, R.; CAVERO, L.; MARTÍNEZ, R. ***Production of ¹²⁵I seed sources for brachytherapy uses.*** Final report of a coordinated research project. IAEA -TECDOC-1512. 2001–2005.
- 45 - CIESZYKOWSKA, I.; PIASECKI, A.; MIELCARSKI, M. ***Development of sealed sources for use in brachytherapy.*** Final report of a coordinated research project. IAEA -TECDOC-1512. 2001–2005.

-
- 46 - DASH, A.; SAXENA, S.K.; MANOLKAR, R.B.; SHANTA, A.; MAJALI, M.A.; VENKATESH, M. ***Development of miniature 125I sources for the treatment of eye and prostate cancers.*** Final report of a coordinated research project. IAEA -TECDOC-1512. 2001–2005.
- 47 - SAXENA, S.K.; SHANTA, A.; RAJURKAR, N.S.; MAJALI, M.A. Studies on the production and quality assurance of miniature 125I radioactive sources suitable for treatment of ocular and prostate cancer. ***Appl. Radiat Isot*** , v. 64, p. 441-447. 2006.
- 48 - MOURA, J. A. ***Estudo e desenvolvimento de metodologia para controle de qualidade em processo de produção de fontes seladas de iodo-125 para aplicação em braquiterapia.*** 2009. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas energéticas e Nucleares. São Paulo.
- 49 - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. GERÊNCIA COMERCIAL. ***Produtos e Serviços comercializados pelo IPEN.*** Disponível em <www.ipen.br>. Acesso em 25/10/2015.
- 50 - EMBRASOL. ***Lavadoras por Ultrassom.*** LS-12DA. Disponível em <http://www.embrasol.com.br/produtos>. Acesso em 19/02/2015.
- 51 - NOVUS PRODUTOS ELETRÔNICOS LTDA. ***Manual de instruções Controlador Universal de Processos - N1200.*** Man. 5001050 V1.1x. 2010.
- 52 - APPLIED MOTION PRODUCTS. Hardware manual. ***1240i Programmable Step Motor Driver.*** 2000.
- 53 - SIEMENS. Simatic- ***S7-200 Programmable Controller System Manual.*** Edition 08/2005. Disponível em <www.siemens.com.br>. Acesso em 10/02/2015.

-
- 54 - CAPINTEC INC. **CRC-15w owner's manual**. Copyright 1998 Capintec Inc. Manual Stock No. 9250-0082. Ver. J – January 2004.
- 55 - MICROSOFT Windows XP Professional. Microsoft Corporation. Copyright 1985-2001. Conjunto de programas. 1 CD-ROM.
- 56 - SIEMENS. **Microwin SP4 Step 7 V4.0**. 2007. Conjunto de programas. 1 CD-ROM.
- 57 - SIEMENS BRASIL. Manual de Treinamento. **Programação step 7 Microwin 4.0**. Sitrain training for automation and driver – Siemens Brasil, abril de 2007.
- 58 - APPLIED MOTION PRODUCTS. **Si programmer V2.5.7 software**. 2009. Programa. 1 CD- ROM.
- 59 - APPLIED MOTION PRODUCTS. **Si Programmer™ Software Manual**. 920-0006 Rev. D5 3/19/09. Copyright 2009. 1 CD-ROM.
- 60 - INDUSOFT. **Indusoft Web Studio V6.1 SP1** HMI/SCADA software. 2006. Programas. 1CD-ROM
- 61 - INDUSOFT. **Indusoft Web Studio V6.1- Getting started guide**. PN: IND-GSG-WD002-2003. USA.
- 62 - MARTE CIENTÍFICA E INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL LTDA. **Manual do usuário. Balanças eletrônicas modelo AD**. Ref. 307.0059.00 rev 01. 2012
- 63 - MOURA, J. A.; **Study of the positioning influence in the water activity measurement during leak test of iodine-125 seeds**. Journal of Physical Science and Application. Volume. 5, No.5, 2015.