**Desenvolvimento e Implantação de um Sistema Automatizado para
Adequação do Processo de Calibração de Monitores de Radiação Gama**

Iremar Alves da Silva Junior

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

**Orientadora:
Dra. Maria da Penha Albuquerque Potiens**

SÃO PAULO

2012

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**Desenvolvimento e Implantação de um Sistema Automatizado para
Adequação do Processo de Calibração de Monitores de Radiação Gama**

Iremar Alves da Silva Junior

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

**Orientadora:
Dra. Maria da Penha Albuquerque
Potiens**

SÃO PAULO

2012

Dedicatória

Termino essa etapa de minha vida com uma certeza: a imensa gratidão que tenho por todos que me ajudaram durante esse caminho que percorri que tenho certeza não teria sido possível sem a colaboração de todos que estiveram envolvidos, direta ou indiretamente nesse trabalho.

Dedico esse trabalho a minha querida mãe Márcia, aos meus irmãos Marcelo e Robson, à minha esposa Andréa, minhas filhas Samanta, Sabrina e Natalia, que tanto me ajudaram entendendo minha ausência durante esse período.

AGRADECIMENTOS

Várias são as pessoas (corpo de funcionários do LCI-IPEN), amigos e entidades a quem agradeço pelo muito que me ajudaram no desenvolvimento de minha dissertação.

À professora Dra. Maria da Penha Albuquerque Potiens, por todo seu empenho, pela inestimável orientação, apoio e confiança demonstrados durante a realização do trabalho.

Ao IPEN, CNPq e CNEN pelo apoio financeiro.

Aos funcionários que por várias vezes não pouparam esforços em atender às demandas do meu trabalho, adequando muitas vezes seus horários e tarefas, de modo a auxiliar as necessidades de minhas atividades. Em especial, aos técnicos Marcos Xavier, que muitas vezes me auxiliou com idéias e sugestões, sempre me incentivando; Valdir, que também contribuiu por diversas vezes, dando sugestões sobre o sistema implantado; Claudinei, que tanto contribuiu, inicialmente com um espaço em seu laboratório de eletrônica e depois com diversos apoios durante a realização de experimentos.

Aos colegas Gelson, Rafael, Aldo, Marina, Ana Maria e Teresa que sempre estiveram do meu lado dando apoio e ajudando.

Ao Dr. Vitor Vivolo, meu primeiro orientador (projeto de pesquisa), que tanto me ajudou com sua experiência, viabilizando diversas atividades e muito me ensinando.

Às Dra. Letícia e Dra Linda que sempre me apoiaram.

Ao Dr. Orlando Rodrigues, pela ajuda em algumas etapas do meu trabalho.

A todos os funcionários do setor de Projetos do IPEN, em especial ao Sr. Márcio Ramos, responsável pelos projetos da bancada e conjunto atenuador, por sua presteza na elaboração do sistema e suas diversas peças.

Estendo meus agradecimentos aos diversos amigos e colegas que fui formando durante esse período no IPEN, em especial ao Dr. Paulo Tarso, pela imensa ajuda durante a fase de produção da parte escrita, lendo e recomendando alterações importantes em meu trabalho.

Aos meus amigos de moradia do CRUSP, Esdras, Felipe, Vinícius e Lucas, dentre tantos outros.

Em especial agradeço a minha esposa Andréa pela imensa paciência e compreensão, uma vez que estive ausente por tanto tempo e às minhas filhas Samanta, Sabrina e Natalia.

DESENVOLVIMENTO E IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO PARA ADEQUAÇÃO DO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DE MONITORES DE RADIAÇÃO GAMA

Iremar Alves da Silva Júnior

RESUMO

Esse trabalho foi desenvolvido com a finalidade de melhorar a qualidade dos serviços de calibração e testes de monitores de radiação gama, prestados pelo Laboratório de Calibração de Instrumentos do IPEN, assim como diminuir a dose ocupacional dos técnicos envolvidos no processo de calibração, seguindo os princípios de proteção radiológica.

Foi realizado o desenvolvimento e a implantação de um sistema automatizado para o processo de calibração de monitores de radiação gama, constituído por (i) um dispositivo pneumático de troca dos atenuadores e (ii) uma mesa de posicionamento, ambos acionados remotamente por intermédio de um painel de comando. Também fez parte a implantação de um Sistema Irradiador Caesa-Gammatron, que aumentou o intervalo de taxa de kerma no ar, devido sua alta atividade em relação ao sistema atualmente em uso no laboratório de calibração com radiação gama. Para isso, foi necessária a instalação de um dispositivo atenuador controlado remotamente nesse sistema irradiador. Por último foi realizado uma avaliação da redução da dose ocupacional.

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR ADEQUATION OF THE CALIBRATION PROCESS FOR GAMMA RADIATION MONITORS

Iremar Alves da Silva Júnior

ABSTRACT

This work was developed with the aim of improving the quality of the services of calibration and tests of gamma radiation monitors - provided by the IPEN Laboratory of Instrument Calibration - as well as reducing the occupational dose in technicians involved in the process of calibration, following the principles of radiation protection.

In this study it was carried out the development and implementation of a system for adequation of the process of gamma radiation monitors calibration. It is constituted by (i) a pneumatic dispositive to exchange the attenuators and (ii) a positioning table, both actuated through a control panel. System was also implemented. A Caesa-Gammatron Irradiator, which increased the range of the air kerma rates, due to its activity higher than the current system of gamma radiation in use in the calibration laboratory. Hence, it was necessary the installation of remotely controlled in the attenuator dispositive in this irradiator system. Lastly, it was carried out an evaluation in the reduction of the occupational doses.

SUMÁRIO

Página

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VI
SUMÁRIO	VII
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XIV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Justificativa	3
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
2.1 Proteção Radiológica	5
2.2 Princípios de Proteção Radiológica	6
2.2.1 Princípio da Justificação	6
2.2.2 Princípio da Limitação de Dose Individual	6
2.2.3 Princípio de Otimização	6
2.3 Classificação de Áreas	7
As áreas supervisionadas devem ser indicadas como tal, em seus acessos ⁽¹⁾	7
2.4 Principais Grandezas e Unidades de Radioproteção	7
2.4.1 Atividade	7
2.4.2 Exposição	8
2.4.3 Dose Absorvida	8
2.4.4 Dose Equivalente	8
2.4.5 Kerma	9
2.5 Calibração de Equipamentos	9
2.6 Automação	10
2.7 Sistemas Pneumáticos	11
2.7.1 Unidade de tratamento de ar	11
2.7.2 Válvula de Controle Direcional	12
2.7.3 Cilindros Pneumáticos	13
2.8 Eletromecânica	13
2.8.1 Motor de Passo	13
2.8.2 Sistema de controle, sensores e atuadores	14
2.8.3 Sensores	14

2.8.4	Atuadores.....	14
2.9	Controlador Lógico Programável - CLP	15
2.10	IHM com CLP incorporado.....	15
2.11	Linguagem Descritiva BCM	17
2.11.1	Estrutura da Linguagem Descritiva BCM.....	17
3	INSTALAÇÕES E MATERIAIS.....	19
3.1	Instalações	19
3.2	Equipamentos.....	19
3.2.1	Sistema Irradiador OB85/1	19
3.2.2	Sistema Irradiador Caesa-Gammatron	20
3.2.3	Sistemas de Referência	21
3.2.4	Sistemas Auxiliares e Acessórios Importantes:	22
3.3	Condições Iniciais do Laboratório de Calibração Gama.....	22
3.4	Materiais utilizados no projeto	24
3.4.1	Softwares	24
3.4.2	Dispositivo pneumático do OB85/1.....	24
3.4.3	Dispositivo atenuador do CAESA-GAMMATRON	24
3.4.4	Mesa de posicionamento	24
3.4.5	Características do CAESA-GAMMATRON.....	25
3.4.6	Controle do sistema automatizado	25
4	METODOLOGIA E RESULTADOS	26
4.1	Análise das necessidades do laboratório de calibração.....	26
4.2	Dispositivo Pneumático	27
4.3	Reconfiguração da disposição dos irradiadores.....	29
4.4	Mesa de Posicionamento.....	30
4.5	Dispositivo Atenuador do Irradiador Caesa-Gammatron.....	34
4.6	Ampliação do Intervalo da Taxa de kerma no Ar	35
4.7	Instalação do Medidor das Condições Ambientais.....	36
4.8	Caracterização do Sistema Irradiador Caesa-Gammatron.....	37
4.8.2	Definição da Metodologia para Estimativa da Atividade	40
4.8.3	Aplicação da Metodologia para Estimativa da Atividade.....	43
4.9	Verificação do Procedimento de Dosimetria	44
4.10	Dosimetria do Irradiador OB85/1	51
4.11	Homogeneidade do Campo de Radiação do Irradiador OB/85-1	56
4.12	Dosimetria do Irradiador Caesa-Gammatron	59
4.13	Homogeneidade do Campo de Radiação do Irradiador Caesa-Gammatron	60

4.14	Valores de Referência da Taxa de kerma no Ar	63
4.14.1	Valores da fonte de ^{137}Cs e ^{60}Co do irradiador OB85/1.	63
4.14.2	Valores da fonte de ^{137}Cs do irradiador Caesa-Gammatron.	64
4.15	Avaliação da Dose Ocupacional	64
4.16	Instalação do IHM com CLP incorporada.....	67
5	CONCLUSÕES	69
6	CONSIDERAÇÕES.....	69
7	ANEXOS	70
7.1	Distância Fonte do Irradiador ao Primeiro Ponto de Dosimetria.....	70
7.2	Rotina do Programa em Linguagem Descritiva BCM.....	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 1 - MECANISMO DE WATT.	11
FIGURA 2 - UNIDADE DE TRATAMENTO DE AR.	12
FIGURA 3 - VÁLVULA DE CONTROLE DIRECIONAL DUPLO SOLENÓIDE 5/2.	12
FIGURA 4 - CILINDRO PNEUMÁTICO MAGNÉTICO DE DUPLA AÇÃO.	13
FIGURA 5 - DIAGRAMA INTERNO DE MOTOR DE PASSO, (A) UNIPOLAR E (B) BIPOLAR.	14
FIGURA 6 - IHM COM CP INCORPORADO DA SÉRIE GP3000 E SEUS MODULOS DE EXPANSÃO ADICIONAIS.	16
FIGURA 7 - IHM COM CP INCORPORADA, MODELO GP3011.	16
FIGURA 8 - DIAGRAMA DE ESTADOS.	17
FIGURA 9 - DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO.	18
FIGURA 10 - DIAGRAMA DA MALHA DE CONTROLE.	18
FIGURA 11 - IRRADIADOR OB85/1, DE MARCA STS.	20
FIGURA 12 - SISTEMA IRRADIADOR DE TELETAPIA CAESA-GAMMATRON.	20
FIGURA 13 - (A) CÂMARA DE IONIZAÇÃO PADRÃO SECUNDÁRIO (1000 cm ³) E (B) CÂMARA DE IONIZAÇÃO PADRÃO SECUNDÁRIO (30 cm ³).	21
FIGURA 14 - (A) ELETRÔMETRO PADRÃO SECUNDÁRIO PTW-UNIDOS E (B) CÂMARA DE IONIZAÇÃO PADRÃO SECUNDÁRIO (0,3 cm ³).	21
FIGURA 15 - VISÃO GERAL DA SALA DE CALIBRAÇÃO GAMA DO LCI-IPEN.	22
FIGURA 16 - (A) IRRADIADOR OB85/1 E (B) DETALHE DO POSICIONAMENTO DOS ATENUADORES.	22
FIGURA 17 - (A) MESA DE POSICIONAMENTO, (B) MANIPULO DA MESA E (C) PONTEIRO DE METAL UTILIZADO PARA VERIFICAR A POSIÇÃO DA MESA (C).	23
FIGURA 18 – TERMÔMETRO, HIGRÔMETRO E BARÔMETRO UTILIZADOS PELO LABORATÓRIO GAMA.	23
FIGURA 19 - PROJETO EM <i>SOLID EDGE</i> DO DISPOSITIVO PARA TROCA DOS ATENUADORES DE CHUMBO.	27
FIGURA 20 - (A) PEÇAS DO DISPOSITIVO MECÂNICO PARA TROCA DOS ATENUADORES E (B) DISPOSITIVO INSTALADO NO SISTEMA IRRADIADOR OB 85/1.	27
FIGURA 21 - TELA DO SOFTWARE FLUIDSIM DA FESTO, COM A SIMULAÇÃO DO SISTEMA EM OPERAÇÃO.	28
FIGURA 22 - (A) PAINEL DE COMANDO MONTADO E (B) INSTALADO NA SALA DE CONTROLE DO LCI-IPEN.	28
FIGURA 23 - (A) DETALHE DOS CILINDROS PNEUMÁTICOS COM SENSORES MAGNÉTICOS E (B) DETALHE DAS VÁLVULAS DIRECIONAIS INSTALADAS NA PARTE TRASEIRA DO IRRADIADOR OB85/1.	29

FIGURA 24 - DETALHE DA PASSAGEM POR DETRÁS DOS IRRADIADORES OB85/1 E CAESA-GAMMATRON.	30
FIGURA 25 - POSIÇÃO DO LASER DE REFERÊNCIA DE ALTURA E ALINHAMENTO.	30
FIGURA 26 - VISÃO DE DETALHES DO PROJETO DA MESA DE POSICIONAMENTO, COM AS DIMENSÕES DA MESA.....	31
FIGURA 27 - DETALHE DA ALTURA MÍNIMA (58 CM) E MÁXIMA (108 CM).	32
FIGURA 28 - PEÇAS USINADAS DA MESA DE POSICIONAMENTO.	32
FIGURA 29 - MESA DE POSICIONAMENTO MONTADA E INSTALADA NA SALA DE CALIBRAÇÃO. ...	32
FIGURA 30 - (A) DETALHE DA ESTEIRA PORTA CABOS, (B) AJUSTE ESCALONADO DE ALTURA E (C) AJUSTE DE ALTURA POR MANIPULO.....	33
FIGURA 31 - (A) DETALHE DO MINI-MONITOR DE LCD E (B) CÂMERA DE VÍDEO, ACRÍLICO UTILIZADO EM SUBSTITUIÇÃO AO PONTEIRO E BASE EM MADEIRA PARA A TRENA.	33
FIGURA 32 - (A) SUPORTE PARA MEDIDORES E DETECTORES MENORES, (B) SUPORTES PARA MEDIDORES MAIORES E (C) SUPORTE EM USO DURANTE UMA CALIBRAÇÃO.	34
FIGURA 33 - DISPOSITIVO ATENUADOR DE RADIAÇÃO.	35
FIGURA 34 - INTERVALO DE TAXA DE KERMA NO AR DO LABORATÓRIO GAMA.	35
FIGURA 35 – IRRADIADORES COM SEUS DISPOSITIVOS ATENUADORES INSTALADOS.....	36
FIGURA 36 – (A) DATALOGGER INSTALADO PRÓXIMOS DOS INSTRUMENTOS ANALÓGICOS E (B) TELA DO MONITOR MOSTRANDO UMA PLANILHA DE CALIBRAÇÃO AO LADO DOS VALORES MOSTRADOS PELO SOFTWARE DE AQUISIÇÃO DE DADOS.	36
FIGURA 37 - (A) VISÃO DO MECANISMO DE AJUSTE DO TAMANHO DA ABERTURA DO COLIMADOR E (B) DETALHE DO MECANISMO DE AJUSTE DA ABERTURA DO COLIMADOR.....	38
FIGURA 38 - (A) VISTA LATERAL DO IRRADIADOR CAESA-GAMMATRON, (B) IRRADIADOR SEM O COLIMADOR E (C) MEDIÇÃO DO TAMANHO DO DIÂMETRO DE ABERTURA DA SAÍDA DO CABEÇOTE.	38
FIGURA 39 - (A) ORIFÍCIO ONDE A FONTE É EXPOSTA NO IRRADIADOR CAESA-GAMMATRON E (B) FONTE DE Cs-137 EXPOSTA E MEDIDA COM UM PAQUÍMETRO.....	39
FIGURA 40 - (A) ARRANJO EXPERIMENTAL MONTADO NO IRRADIADOR CAESA-GAMMATRON), (B) FILME RADIOCRÔMICO ANTES DA IRRADIAÇÃO E (C) FILME RADIOCRÔMICO APÓS A IRRADIAÇÃO.	39
FIGURA 41 - (A) COMPARAÇÃO ENTRE O TAMANHO DO CAMPO DE RADIAÇÃO OBTIDO POR GEOMETRIA E O OBTIDO EXPERIMENTALMENTE COM O FILME RADIOCRÔMICO E (B) ESQUEMA GEOMÉTRICO REPRESENTADO EM AUTOCAD.....	40
FIGURA 42 - ESQUEMA DO IRRADIADOR CAESA-GAMMATRON COM DOIS CAMPOS DE RADIAÇÃO E SUAS RESPECTIVAS DISTÂNCIAS.	40
FIGURA 43 - ARRANJO EXPERIMENTAL PARA ESTIMAR A ATIVIDADE DA FONTE DE ¹³⁷ Cs DO SISTEMA IRRADIADOR OB85/1.....	41
FIGURA 44 - ARRANJO EXPERIMENTAL PARA ESTIMAR A ATIVIDADE DA FONTE DE ¹³⁷ Cs DO SISTEMA IRRADIADOR CAESA-GAMMATRON.....	43
FIGURA 45 – DOSIMETRIA DO CAMPO DE RADIAÇÃO DA FONTE DE ¹³⁷ Cs, COM INTERVALO DE 10 CM.	45

FIGURA 46 - DOSIMETRIA DO CAMPO DE RADIAÇÃO DA FONTE DE ^{137}Cs , COM INTERVALO DE 50 CM.	45
FIGURA 47 - DOSIMETRIA DO CAMPO DE RADIAÇÃO DA FONTE DE ^{137}Cs , COM INTERVALO DE 100 CM.	46
FIGURA 48 - DOSIMETRIA DO CAMPO DE RADIAÇÃO DA FONTE DE ^{137}Cs , COM INTERVALO DE 10 CM.	46
FIGURA 49 - DOSIMETRIA DO CAMPO DE RADIAÇÃO DA FONTE DE ^{137}Cs , COM INTERVALO DE 50 CM.	47
FIGURA 50 - DOSIMETRIA DO CAMPO DE RADIAÇÃO DA FONTE DE ^{137}Cs , COM INTERVALO DE 100 CM.	47
FIGURA 51 - DOSIMETRIA DO CAMPO DE RADIAÇÃO DA FONTE DE ^{137}Cs , COM INTERVALO DE 10 CM.	48
FIGURA 52 - DOSIMETRIA DO CAMPO DE RADIAÇÃO DA FONTE DE ^{137}Cs , COM INTERVALO DE 50 CM.	48
FIGURA 53 - DOSIMETRIA DO CAMPO DE RADIAÇÃO DA FONTE DE ^{137}Cs , COM INTERVALO DE 100 CM.	49
FIGURA 54 - DOSIMETRIA DO CAMPO DE RADIAÇÃO DA FONTE DE ^{137}Cs , COM INTERVALO DE 10 CM.	49
FIGURA 55 - DOSIMETRIA DO CAMPO DE RADIAÇÃO DA FONTE DE ^{137}Cs , COM INTERVALO DE 50 CM.	50
FIGURA 56 - DOSIMETRIA DO CAMPO DE RADIAÇÃO DA FONTE DE ^{137}Cs , COM INTERVALO DE 100 CM.	50
FIGURA 57 – DOSIMETRIA DO CAMPO DE RADIAÇÃO DA FONTE DE ^{137}Cs , SEM ATENUADOR. ...	52
FIGURA 58 – DOSIMETRIA DO CAMPO DE RADIAÇÃO DA FONTE DE ^{137}Cs , COM UM ATENUADOR.	52
FIGURA 59 – DOSIMETRIA DO CAMPO DE RADIAÇÃO DA FONTE DE ^{137}Cs , COM DOIS ATENUADORES.....	53
FIGURA 60 – DOSIMETRIA DO CAMPO DE RADIAÇÃO DA FONTE DE ^{137}Cs , COM TRÊS ATENUADORES.....	53
FIGURA 61 – DOSIMETRIA DO CAMPO DE RADIAÇÃO DA FONTE DE ^{60}Co , SEM ATENUADOR.	54
FIGURA 62 – DOSIMETRIA DO CAMPO DE RADIAÇÃO DA FONTE DE ^{60}Co , COM UM ATENUADOR.	54
FIGURA 63 – DOSIMETRIA DO CAMPO DE RADIAÇÃO DA FONTE DE ^{60}Co , COM DOIS ATENUADORES.....	55
FIGURA 64 – DOSIMETRIA DO CAMPO DE RADIAÇÃO DA FONTE DE ^{60}Co , COM TRÊS ATENUADORES.....	55
FIGURA 65 - HOMOGENEIDADE DO CAMPO DE RADIAÇÃO A UM METRO DO OB85/1.	56
FIGURA 66 - HOMOGENEIDADE DO CAMPO DE RADIAÇÃO A QUATRO METROS DO OB85/1.	57
FIGURA 67 - DIAGRAMA DO CAMPO DE RADIAÇÃO DO IRRADIADOR OB85/1.	57
FIGURA 68 – DOSIMETRIA DA FONTE DE ^{137}Cs REALIZADA SEM ATENUADOR.....	59

FIGURA 69 – DOSIMETRIA DA FONTE DE ^{137}Cs REALIZADA COM UM ATENUADO.	60
FIGURA 70 - HOMOGENEIDADE DO CAMPO DE RADIAÇÃO A UM METRO DO CAESA-GAMMATRON.	61
FIGURA 71 - HOMOGENEIDADE DO CAMPO DE RADIAÇÃO A QUATRO METROS DO CAESA-GAMMATRON.	61
FIGURA 72 - DIAGRAMA DO CAMPO DE RADIAÇÃO DO IRRADIADOR CAESA-GAMMATRON.	62
FIGURA 73 – DOSÍMETRO PESSOAL DA RADOS (RAD-60).	65
FIGURA 74 - DIAGRAMA DA MONTAGEM DOS DOSÍMETROS COM TODOS OS ATENUADORES ABERTOS.	65
FIGURA 75 - DIAGRAMA DA MONTAGEM DOS DOSÍMETROS COM TODOS OS ATENUADORES FECHADOS.	66
FIGURA 76 – (A) PAINEL DE COMANDO COM IHM; (B) MINI MONITOR DE LCD PARA VISUALIZAR A POSIÇÃO DA MESA DE POSICIONAMENTO E (C) VISÃO GERAL DE AMBOS.	68

LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 1 – LIMITES DE DOSE RECOMENDADOS PELA ICRP 60.....	5
TABELA 2 – TABELA COM O CÁLCULO DO TEMPO DE DECAIMENTO EM ANOS.	42
TABELA 3 – COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE EXPOENTES AJUSTADOS.	51
TABELA 4 - TAMANHO DO CAMPO DE RADIAÇÃO DO OB85/1.....	58
TABELA 5 – TAXA DE KERMA DA FONTE DE ^{137}Cs DO IRRADIADOR OB85/1.....	63
TABELA 6 – TAXA DE KERMA DA FONTE DE ^{60}Co DO IRRADIADOR OB85/1.....	63
TABELA 7 - TAXA DE KERMA DA FONTE DE ^{137}Cs DO IRRADIADOR CAESA-GAMMATRON.....	64
TABELA 8 – PLANILHA DE CALIBRAÇÃO DE MONITOR DE RADIAÇÃO VICTOREEN 450, ANTES DA AUTOMAÇÃO.	67
TABELA 9 – PLANILHA DE CALIBRAÇÃO DE MONITOR DE RADIAÇÃO VICTOREEN 450, APÓS AUTOMAÇÃO. .	67

1 INTRODUÇÃO

A norma CNEN-NN-3.01 “Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica”, revisada em janeiro de 2005⁽¹⁾, estabelece que os serviços de proteção radiológica devam assegurar que a calibração de equipamentos usados para calibrar feixes e fontes seja rastreada por um laboratório padrão de dosimetria, reconhecido ou autorizado pela CNEN; além disso, todas as normas da CNEN, que estabelecem requisitos de radioproteção e segurança nas instalações nucleares e radiativas e outros serviços na área médica e industrial que utilizam material radioativo, prevêm a utilização de instrumentos adequados e calibrados na sua faixa de utilização⁽²⁻⁵⁾. Um plano de proteção radiológica deve prever, em uma situação de emergência, a monitoração do local com um instrumento adequado para estas medidas. A utilização de um instrumento descalibrado numa situação de emergência pode indicar um falso resultado, implicando numa exposição maior ao trabalhador⁽⁶⁾. No Brasil, cerca de 150 instrumentos apresentam escalas maiores que os níveis de taxa de dose encontrados em laboratórios de calibração atualmente autorizados, o que impossibilita além destas calibrações o teste de estouro de escala* nestes e em aproximadamente mais uns 500 instrumentos que possuem escalas menores.

O Laboratório de Calibração de Instrumentos do IPEN (LCI-IPEN) realiza anualmente cerca de 1500 testes[†] e medidas de calibração em monitores de radiação, que são utilizados em radioproteção, radioterapia, radiodiagnóstico e medicina nuclear. Os monitores de radiação utilizados em radioproteção representam a grande maioria dos testes e calibrações realizados pelo Laboratório de Calibração de Instrumentos do IPEN (cerca de 60%). Para este tipo de medida o LCI-IPEN dispõe de um Sistema Irradiador, modelo OB 85/1, com fontes de ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{226}Ra e ^{241}Am . Este sistema tem possibilitado a realização de testes na maioria dos instrumentos enviados ao LCI-IPEN, mas devido às novas tecnologias empregadas nesses instrumentos e ao decaimento

* Um instrumento que passa por um teste de estouro de escala deve ser capaz de manter a sua indicação por, pelo menos 5 minutos quando exposto a uma taxa maior do que 10 vezes o seu fundo de escala

† Testes são procedimentos realizados com a finalidade de verificar as condições operacionais dos instrumentos.

radioativo das fontes de radiação, alguns detectores com valores de escala superiores a 10 R/h ($25,8 \times 10^{-4}$ C/kg) não podem ser devidamente testados.

A melhora na qualidade dos seus processos de calibração e testes tem sido uma preocupação constante nos projetos de pesquisa e desenvolvimento no LCI-IPEN⁽⁷⁾, incluindo a diminuição de incertezas e identificação dos principais fatores que contribuem para estas incertezas^(8,9). Além disso, é um dos poucos laboratórios autorizados pelo Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI) que possui arranjos para calibração e testes nos quatro níveis de aplicação de monitores de radiação (Radioproteção, Radioterapia, Radiodiagnóstico e Medicina Nuclear), com radiações alfa, beta, gama e X e que atende a clientes de todo o Brasil, principalmente os da região sudeste, além de clientes de países vizinhos.

Deste modo, projetos têm sido desenvolvidos para a automação de seus sistemas^(7,10) possibilitando uma diminuição nas incertezas apresentadas, além da diminuição do tempo despendido para teste⁽¹¹⁾ ou irradiação de amostras, dando uma maior precisão nos resultados apresentados. Nos últimos anos, vêm aumentando consideravelmente a utilização de sistemas automatizados e softwares específicos para auxiliar nos procedimentos dos laboratórios de medidas⁽¹²⁻¹⁴⁾, inclusive de calibração de instrumentos⁽¹⁵⁻¹⁸⁾.

Atualmente, os sistemas disponíveis no LCI-IPEN consistem de fontes radioativas gama de ^{60}Co e ^{137}Cs , com diversas atividades, fontes radioativas beta de $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , diversas fontes radioativas alfa e beta (fontes planas), um sistema de radiação X industrial de 160 kV e um mamógrafo recém adquirido de 35 kV. Todos os métodos implantados nestes sistemas seguem recomendações e normas nacionais e internacionais⁽¹⁹⁻²⁵⁾. Para a implantação destes métodos foram utilizados sistemas de referência com rastreabilidade tanto ao LNMRI, IRD-CNEN-RJ, como a laboratórios internacionais de padronização primária como o NPL na Inglaterra, o PTB na Alemanha e o NIST nos EUA.

O uso de monitores de radiação com escalas elevadas deve aumentar juntamente com novos investimentos em energia nuclear⁽²⁶⁻²⁸⁾, sendo seu uso principal em instalações nucleares, onde as taxas de radiação são, em sua maioria, elevadas, devem ser calibrados com fonte de radiação também elevadas, pois assim podem ser calibrados suas escalas maiores, sendo atualmente calibrados apenas em valores bem menores do que sua capacidade de medição

permite, devido aos valores de atividade das atuais fontes em uso nos laboratórios de calibração.

1.1 Objetivos

1. Desenvolvimento e implantação de um sistema de posicionamento de monitores portáteis, acionado remotamente por intermédio de um painel de comando, constituído por:
 - I. Um dispositivo pneumático de troca dos atenuadores de radiação, para o Sistema Irradiador OB85/1.
 - II. Uma mesa de posicionamento que possa ser utilizada pelos sistemas irradiadores OB85/1 e Caesa-Gammatron.
 - III. Um dispositivo atenuador para o Sistema Irradiador Caesa-Gammatron.
2. Determinação das características do Sistema Irradiador Caesa-Gammatron:
 - I. Estimativa da posição da fonte no interior do irradiador.
 - II. Estimativa da atividade.
 - III. Dosimetria do campo de radiação.
 - IV. Determinação da homogeneidade do campo de radiação.
3. Avaliação da redução da dose ocupacional dos técnicos ou pesquisadores[‡], que será realizada através da comparação da dose ocupacional antes e após a automação do processo de calibração.

1.2 Justificativa

Esse trabalho foi desenvolvido com a finalidade de melhorar a qualidade dos serviços de calibração e testes de monitores de radiação gama, prestado pelo Laboratório de Calibração de Instrumentos do IPEN, pois o uso de monitores de

[‡] Como pesquisadores, encontram-se os alunos de pós-graduação que utilizam o sistema para efetuar irradiações de amostras ou equipamentos diversos.

radiação com escalas elevadas devem aumentar, necessitando de fontes de radiação mais intensa e processo de calibração mais eficiente, assim como diminuir a dose ocupacional dos técnicos e pesquisadores envolvidos no processo de calibração, seguindo os princípios de proteção radiológica^(29,30).

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Proteção Radiológica

O principal objetivo da Proteção Radiológica é proporcionar um padrão de proteção ao ser humano sem limitar os benefícios da utilização das radiações ionizantes. A *International Radiation Protection Commission* (ICRP)⁽²⁹⁾ estabelece recomendações em proteção radiológica que servem como base para programas e regulamentações mais completas emitidas por outras organizações internacionais e nacionais. A ICRP publicou seu primeiro relatório em 1928. Este primeiro relatório, denominado Publicação 1, continha recomendações que foram adotadas em Setembro de 1958. Recomendações subseqüentes foram publicadas em 1964, em 1966 e em 1977. A Publicação 26, de 1977, ampliada em 1978, foi aprimorada nos anos de 1980 e 1987. As recomendações foram completamente revisadas e publicadas em 1991 como Publicação 60 (ICRP Publication 60). E no ano de 2007, estas recomendações foram formalmente substituídas pela publicação 103⁽³¹⁾, que atualiza, consolida e fornece orientações adicionais sobre o controle de exposição a fontes de radiação publicadas desde 1990. Esta publicação também atualiza os fatores de ponderação no tecido utilizados nos cálculos das grandezas dose equivalente e efetiva baseado nas últimas informações de biologia e física das radiações e mantém os três princípios básicos da radioproteção: justificação, otimização e limitação de dose.

No Brasil, a Autoridade Regulatória na área nuclear é a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), referência na área de radioproteção e responsável pela publicação das normas que regulamentam a utilização da radiação ionizante no Brasil.

Atualmente os limites anuais de dose individual de trabalhadores e indivíduos do público recomendados pela Portaria nº 453⁽³²⁾ e pela norma CNEN-NN-3.01⁽¹⁾, são aqueles estabelecidos pela ICRP 60⁽²⁹⁾, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Limites de dose recomendados pela ICRP 60

Grandeza	Limite de dose ocupacional	Limite de dose do público
Dose Efetiva	20 mSv/ano*	1 mSv/ano
Dose Equivalente no cristalino	20 mSv/ano*	15 mSv/ano
Dose Equivalente nas extremidades	500 mSv	—

*Valor médio de cinco anos, não podendo ultrapassar 50 mSv em um único ano.

2.2 Princípios de Proteção Radiológica

O sistema de proteção radiológica está fundamentado nos seguintes princípios básicos^(2,33):

2.2.1 Princípio da Justificação

Nenhuma prática ou fonte associada a essa prática será aceita pela CNEN, a não ser que a prática produza benefícios, para os indivíduos expostos ou para a sociedade, suficientes para compensar o detrimento correspondente, tendo-se em conta fatores sociais e econômicos, assim como outros fatores pertinentes.

2.2.2 Princípio da Limitação de Dose Individual

A exposição normal dos indivíduos deve ser restringida de tal modo que nem a dose efetiva nem a dose equivalente nos órgãos ou tecidos de interesse, causadas pela possível combinação de exposições originadas por práticas autorizadas, excedam o limite de dose especificado na tabela a seguir, salvo em circunstâncias especiais, autorizadas pela CNEN. Esses limites de dose não se aplicam às exposições médicas.

2.2.3 Princípio de Otimização

Em relação às exposições causadas por uma determinada fonte associada a uma prática, salvo no caso das exposições médicas, a proteção radiológica deve ser otimizada de forma que a magnitude das doses individuais, o número de pessoas expostas e a probabilidade de ocorrência de exposições mantenham-se tão baixas quanto possa ser razoavelmente exeqüível, tendo em conta os fatores econômicos e sociais. Nesse processo de otimização, deve ser observado que as doses nos indivíduos decorrentes de exposição à fonte devem estar sujeitas às restrições de dose relacionadas a essa fonte.

2.3 Classificação de Áreas

A classificação das áreas e suas definições são tratadas em normas e especificações publicadas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear do Brasil (CNEN)^(1,2,34).

Para fins de gerenciamento da proteção radiológica, os titulares devem classificar as áreas de trabalho com radiação ou material radioativo em áreas controladas, áreas supervisionadas ou áreas livres, conforme apropriado.

Uma área deve ser classificada como área controlada quando for necessária a adoção de medidas específicas de proteção e segurança para garantir que as exposições ocupacionais normais estejam em conformidade com os requisitos de otimização e limitação de dose, bem como prevenir ou reduzir a magnitude das exposições potenciais.

Uma área deve ser classificada como área supervisionada quando, embora não requeira a adoção de medidas específicas de proteção e segurança, devem ser feitas reavaliações regulares das condições de exposições ocupacionais, com o objetivo de determinar se a classificação continua adequada.

As áreas controladas devem estar sinalizadas com o símbolo internacional de radiação ionizante, acompanhando um texto descrevendo o tipo de material, equipamento ou uso relacionado à radiação ionizante.

As áreas supervisionadas devem ser indicadas como tal, em seus acessos⁽¹⁾.

2.4 Principais Grandezas e Unidades de Radioproteção

2.4.1 Atividade

A atividade (A) é definida como sendo o número de transformações nucleares que ocorrem em uma dada amostra, por unidade de tempo⁽³⁵⁾. É dada pela equação 1:

$$A = k_1 \times N \quad (1)$$

Onde:

(k_1) é a constante de desintegração e (N) é o número de átomos radioativos contidos na amostra ou material.

A unidade da atividade no Sistema Internacional é o Becquerel (Bq), que equivale a uma desintegração radioativa por segundo. A unidade antiga é o Curie (Ci), sendo que $1 Ci = 37 GBq^{(33)}$.

2.4.2 Exposição

A exposição (X) é o quociente de dQ por dm , no qual dQ é a soma das cargas elétricas de todos os íons de um mesmo sinal, produzidos no ar quando todos os elétrons e pósitrons liberados pelos fótons, num elemento de ar de massa dm , são completamente freados⁽³⁶⁾. Conforme a equação 2:

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (2)$$

A unidade especial dessa grandeza é o roentgen (R). No sistema internacional de unidades (SI), a unidade utilizada para exposição é Coulomb/kilograma (C/kg). A relação entre R e C/kg é $1 R = 2,58 \times 10^{-4} C/kg^{(37)}$.

2.4.3 Dose Absorvida

A dose absorvida, D , é a quantidade de energia depositada (dE) pela radiação ionizante em qualquer meio, por unidade de massa (dm) do material absorvedor. Essa grandeza pode ser utilizada para qualquer tipo de radiação e medida em todo tipo de material^(37,38). Conforme a equação 3:

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (3)$$

A unidade da dose absorvida no Sistema Internacional é J/kg , sendo sua unidade de uso o gray (Gy), onde $1 Gy$ equivale a $1 J/kg$.

2.4.4 Dose Equivalente

A dose equivalente, H , é a medida da equivalência da energia absorvida pelo tecido biológico, considerando a eficácia biológica relativa (RBE), isto é, atribui-se à dose absorvida um peso característico da radiação absorvida (W_R). A necessidade desta grandeza decorre do fato de que doses iguais de radiações podem produzir danos biológicos de diferentes intensidades. Para fins de

proteção radiológica, considera-se o limite superior do fator RBE para cada tipo de radiação e o seu efeito.

$$H_T = D \times W_R \quad (4)$$

A unidade especial da dose equivalente é o sievert, cujo símbolo é Sv. No SI, a unidade é J/kg , sendo: $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$.

2.4.5 Kerma

A grandeza Kerma (K) é definida como sendo a soma das energias cinéticas iniciais (dE) de todas as partículas carregadas liberadas por partículas indiretamente ionizante incidentes em um material de massa (dm)^(38,39). Esta grandeza é válida somente para a radiação indiretamente ionizante (gama, raios X e nêutrons). Conforme a equação 4.

$$K = \frac{dE}{dm} \quad (5)$$

A unidade da grandeza Kerma é a mesma da grandeza dose absorvida, J/kg ou Gy, sendo $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$.

2.5 Calibração de Equipamentos

De acordo com o Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia⁽⁴⁰⁾, a calibração é o “conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões”.

A calibração de instrumentos tem por objetivo garantir que o instrumento esteja funcionando adequadamente, fornecendo em suas leituras valores que representem, o mais próximo possível, os valores reais do mensurando, que são indicados por instrumentos padrões^(19,41).

Os instrumentos monitores de radiação gama podem ser calibrados por mais de um método de calibração, sendo utilizado pelo Laboratório Gama do LCI-IPEN, o método de campos bem conhecidos, onde as características do feixe

de radiação são determinadas periodicamente utilizando-se um sistema de referência padrão, sendo assim determinada a grandeza de referência Kerma no ar. O documento SRS 16 da AIEA⁽⁵⁰⁾ (Agência Internacional de Energia Atômica), estabelece as principais diretrizes na implantação de métodos e procedimentos de calibração de monitores de radiação a serem utilizados nos laboratórios de calibração de instrumentos dentro de uma cadeia metrológica⁽²³⁾. No Brasil, o documento que regulamenta o funcionamento de um laboratório para a atividade de calibração de monitores utilizados em radioproteção foi formalmente publicado no ano de 2011 pelo Comitê de Avaliação de Serviços de Ensaio e Calibração (CASEC/IRD/CNEN)⁽¹⁹⁾.

De acordo com os critérios do CASEC, as calibrações devem ser sempre realizadas com fonte de ^{137}Cs , exceto nos casos em que o fabricante recomenda outra energia para calibração. A fonte de ^{60}Co deverá ser utilizada para o teste de dependência energética em um dos pontos ajustáveis ou outro que tenha sido testado com a fonte de ^{137}Cs . Além disso, as condições ambientais devem ser controladas e mantidas dentro dos seguintes valores:

Temperatura de 18 a 24 °C;

Umidade relativa do ar de 20 a 65%.

2.6 Automação

Uma automação consiste em um sistema de equipamentos eletrônicos e/ou mecânicos que controlam seu próprio funcionamento, quase sem a intervenção do homem.

Existe uma diferença entre automação e mecanização, pois a mecanização consiste simplesmente no uso de máquinas para realizar um trabalho, substituindo assim o esforço físico do homem. Enquanto que a automação possibilita a realização de um trabalho por meio de máquinas controladas automaticamente.

A idéia de automação já vem da pré-história, com invenções como a roda e o moinho movido por vento ou força animal. Um bom exemplo é o mecanismo desenvolvido por James Watt no século XVIII, para regulação do fluxo de vapor em máquinas, podendo ser considerado um dos primeiros sistemas de controle com realimentação. Esse dispositivo consistia num eixo vertical com

dois braços fixados próximos ao topo, tendo em cada extremidade desses braços uma esfera pesada. Quando a rotação aumentava, a força centrífuga atuando sobre as esferas forçavam a haste para baixo restringindo a passagem de vapor reduzindo a velocidade. Dessa forma a máquina funcionava de modo a regular-se sozinha, ou seja, automaticamente, por meio de um laço de realimentação. Na Figura 1 é mostrado um esquema do dispositivo^(42.43).

Figura 1 - Mecanismo de
Watt

O avanço da automação está ligado, em grande parte ao avanço da microeletrônica, que proporcionou o surgimento do CLP (Controlador Lógico Programável), que foi amplamente utilizado em substituição aos painéis de controle com relés (lógica de relés), facilitando muito as modificações quando necessário nas linhas de montagem ou qualquer outra aplicação, uma vez que essas modificações, na maioria dos casos, não precisavam ser realizadas fisicamente, poderão ser feitas apenas no programa gravado no CLP.

2.7 Sistemas Pneumáticos

Sistemas pneumáticos apresentam algumas vantagens em relação aos mecânicos, como investimento relativamente pequeno, robustez dos componentes pneumáticos e facilidade de implantação⁽⁴⁴⁾. Um sistema pneumático é composto principalmente pelos seguintes componentes:

2.7.1 Unidade de tratamento de ar

A função da unidade de tratamento de ar é a filtragem, a regulação da pressão e a introdução de certa quantidade de óleo para a lubrificação de todas as partes mecânicas dos componentes pneumáticos. A utilização desta unidade de serviço é indispensável em qualquer tipo de sistema pneumático, do mais

simples ao mais complexo. Na Figura 2 é mostrada uma unidade de tratamento de ar⁽⁴⁴⁾.

Figura 2 - Unidade de Tratamento de ar.

2.7.2 Válvula de Controle Direcional

Têm a função de orientar a direção que o fluxo de ar deve seguir, a fim de realizar um trabalho proposto. Existem diversos modelos, sendo que nesse trabalho foi utilizada a válvula do tipo duplo solenóide 5/2 vias, esses tipos de válvulas se caracterizam pelo número de posições, número de vias, posição de repouso, tipo de acionamento (comando) e pelo tipo de retorno (para posição de descanso).

O número de posições se refere à quantidade de posições que uma válvula direcional pode executar ou permanecer sob a ação de seu funcionamento.

O número de vias informa a quantidade de conexões de trabalho que a válvula possui, essas vias podem ser de entrada ou de escape de pressão.

O tipo de acionamento (comando) pode ser direto, quando a força de acionamento atua diretamente sobre a válvula ou indireto, quando a força de acionamento atua sobre qualquer dispositivo intermediário, libera o comando principal para acionar a válvula. Esses acionamentos podem ser, muscular, mecânico, elétrico ou pneumático, na Figura 3 é mostrada uma válvula direcional do tipo duplo solenóide 5/2⁽⁴⁴⁾.

Figura 3 - Válvula de controle direcional duplo solenóide 5/2.

2.7.3 Cilindros Pneumáticos

Basicamente, existem dois tipos de cilindros: de simples efeito ou simples ação e o duplo efeito ou dupla ação, com e sem amortecimento. Nesse trabalho foi utilizado um cilindro pneumático magnético de dupla ação. Ele recebe esse nome porque pode ser acionado para avançar e retornar, além de possuir um êmbolo magnético, que pode ser utilizado para verificação da posição. Na Figura 4 é mostrado um cilindro de dupla ação⁽⁴⁴⁾.

Figura 4 - Cilindro pneumático magnético de dupla ação.

2.8 Eletromecânica

2.8.1 Motor de Passo

Um motor de passo é um tipo de motor elétrico que é usado quando algo tem que ser posicionado com precisão ou rotacionado em um ângulo exato. Em um motor de passo, um ímã permanente, muito forte, é controlado por uma série de campos eletromagnéticos que são ativados e desativados eletronicamente. Controladores avançados de motores de passo podem utilizar modulação por largura de pulso para realizarem micropassos, obtendo uma maior resolução de posição e operação mais suave. Os motores de passo são classificados pelo torque que produzem. Uma característica única deste tipo de motor é a sua habilidade de poder manter o eixo em uma posição segurando o torque sem estar em movimento. Para atingir todo o seu torque, suas bobinas devem receber toda a corrente marcada durante cada passo.

Além disso, existem duas formas de enrolamento dos motores, que são unipolar e bipolar. Na Figura 5, são apresentadas imagens das constituições internas desses motores. O motor unipolar contém um canal comum para cada

segmento de bobinas, enquanto o motor bipolar não contém canal comum, sendo que o circuito de controle deste motor é muito mais complexo⁽⁴⁵⁾.

Figura 5 - Diagrama interno de motor de passo, (a) Unipolar e (b) Bipolar.

2.8.2 Sistema de controle, sensores e atuadores

O sistema de controle é responsável pela união do resultado da leitura dos sensores e dos atuadores. Eles recebem as informações fornecidas pelos sensores para saber o estado atual do processo, executam cálculos, lógicas pré-definidas, e enviam o resultado para os atuadores, de modo que a situação atual do processo seja modificada para se atingir um ponto de operação desejado. Na implantação de sistemas de controle, são utilizados dispositivos como microcontroladores, controladores lógicos programáveis (CLP's) e microprocessadores, entre outros. Estes dispositivos possuem, em comum, entradas e saídas (portas de entrada/saída), que servem para realizar a comunicação com os dispositivos periféricos (sensores e atuadores).

2.8.3 Sensores

Os sensores são elementos responsáveis pela leitura do estado em que o processo se encontra. Os sensores ou transdutores medem grandezas mecânicas (posição, velocidade e aceleração), grandezas físicas (temperatura, fluxo nível e pressão), entre outras. Eles enviam para o controlador a atual situação do processo para que este possa tomar as medidas necessárias.

2.8.4 Atuadores

Os atuadores são elementos ativos que atuam sobre uma grandeza física do processo, atendendo a comandos que podem ser manuais ou

automáticos. Como exemplos de atuadores, temos os cilindros pneumáticos e motores.

2.9 Controlador Lógico Programável - CLP

O Controlador Lógico Programável (CLP) é um equipamento eletrônico programável baseado em microprocessadores. É projetado para funcionar em ambientes industriais, podendo controlar desde simples máquinas e processos até automatizar uma planta completa.

O Controlador Lógico Programável é um dos equipamentos mais importante em automação de processos em geral, seu campo de aplicação é quase ilimitado.

Ele é constituído basicamente de três blocos: as Entradas, a Unidade Central de Processamento (CPU) e as Saídas. Por meio de dispositivos ligados ao Módulo de Entradas, o CP monitora continuamente o estado da máquina (ou processo) sob seu controle. A Unidade Central de Processamento processa os dados externos através do Programa do Usuário (Programa de Controle gravado previamente na memória do CLP). Simultaneamente, as saídas são acionadas conforme instruções contidas no mesmo Programa.

Os dispositivos de Entrada e Saída podem ser de diversos tipos, analógicos ou digitais, exemplos: Botoeiras, Chaves fim-de-curso, Motores, Contadores, Solenóides, Alarmes sonoros e visuais, Instrumentos analógicos, etc⁽⁴⁶⁾.

2.10 IHM com CLP incorporado

O IHM com CLP incorporado é uma fusão de modulo IHM (Interface Homem Máquina) com modulo CLP em um único equipamento, facilitando a instalação por serem equipamentos mais compactos e com a vantagem de possuírem preços mais acessíveis devido a seus custos reduzidos. Um exemplo desse tipo de equipamento é a linha de controladores programáveis GP3000 da BCM Automação, em especial o GP3011, que foi o utilizado nesse trabalho. Uma das vantagens deste modelo, é a possibilidade de combinar de 1 a 4 módulos de

diversos tipos, permitindo que as configurações atendam um grande número de aplicações com eficiência e economia, na Figura 6 é mostrado um GP3000 com seus respectivos módulos.

Figura 6 - IHM com CP incorporado da série GP3000 e seus módulos de expansão adicionais.

- Características gerais da linha GP3000
- Nº de Entradas: até 64 canais digitais e até 32 canais analógicas.
- Nº de saídas: até 56 canais digitais e até 16 canais analógicas.
- Entradas para *encoder* incremental: até 4 canais
- Memória de programa: 256 kbits em *Flash Eprom*
- Memória de variáveis: 1024 kbits
- Interface HM: Mostrador do painel de LCD ou Display gráfico, dependendo da versão do módulo básico.
- Comunicação: - um canal RS232, um canal RS485 isolado e um canal ethernet(GP3101).
- Programação: Linguagem Descritiva BCM
- Capacidade de módulos de E/S: 0 a 4 módulos
- Dimensões: 138x92mm ou 138x128mm, dependendo da versão do módulo básico. A profundidade depende de cada configuração⁽⁴⁶⁾.

Na Figura 7 é mostrado um GP3011.

Figura 7 - IHM com CP incorporada, modelo GP3011.

2.11 Linguagem Descritiva BCM

Essa é a linguagem de programação utilizada pelos CLP's da BCM Automação. Ela apresenta as diversas etapas de um processo em uma montagem gráfica, mostrando as ações que serão efetuadas em cada etapa, assim como a sequência dessas etapas (estados) e as condições que possibilitam ao processo, passar de um estado a outro, usando Diagrama de Estados. O Diagrama de Estados é basicamente uma forma padronizada de representação das regras de controle de um processo. Utiliza uma estrutura similar àquela adotada na eletrônica e na matemática, conhecida como "Diagrama de Variáveis de Estado", é possível descrever operações combinatórias ou seqüenciais, que são executadas dentro de um fluxo único ou em diversas ramificações paralelas e simultâneas. A forma gráfica adotada permite uma fácil visualização do conjunto, recurso que facilita a elaboração do projeto, oferecendo uma forma exata para descrição de cada operação, viabilizando a programação do controlador a partir do Diagrama de Estados. Deve-se observar que qualquer programa para controle de processos digitais ou analógicos pode ser representado por um Diagrama de Estados. A utilização do Diagrama de Estados elimina a necessidade de qualquer outro método para descrever do processo.

2.11.1 Estrutura da Linguagem Descritiva BCM

A estrutura da Linguagem Descritiva BCM é formada por:

ESTADOS – são o conjunto de comandos, esses estados quando ativados provocam ações. A sequência de ativação desses estados, determina a sequência do processo. Na Figura 8 é mostrado um diagrama de estado.

Figura 8 - Diagrama de estados.

TRANSIÇÕES – São as combinações de eventos que promovem a mudança de estado. Na Figura 9 é mostrado uma transição de estados.

Figura 9 - Diagrama de transição.

MALHA DE CONTROLE – É um diagrama de estado parcial, representa uma parte do processo, no qual apenas um estado pode estar ativo.

O diagrama de estados completo do processo pode ser formado por apenas uma malha ou por diversas malhas. Na Figura 10 é mostrado uma malha de controle.

Figura 10 - Diagrama da malha de controle.

O Diagrama de Estados apresenta de forma gráfica a estrutura lógica do conjunto de malhas de controle. Cada malha representa o controle de uma parte do processo⁽⁴⁷⁾.

3 INSTALAÇÕES E MATERIAIS

3.1 Instalações

O laboratório de calibração gama do LCI-IPEN possui um Sistema Irradiador STS Steuerungstechnik[§] & Strahlenschutz^{**} GmbH, Alemanha, modelo OB85/1, com fontes emissoras de radiação gama de ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{226}Ra e ^{241}Am . Esse equipamento é utilizado tanto para atividades de calibração como de pesquisa, disposto em uma sala e com seu painel de controle em uma ante-sala, para que possa ser operado remotamente. Há provisões para o acondicionamento e desumidificação do ar dentro da sala, possibilitando assim um controle das condições ambientais.

Os sistemas de referência incluem câmaras de ionização com certificados de calibração rastreáveis a padrões primários, e desde 2001 o laboratório trabalha atendendo ao sistema de garantia da qualidade de acordo com as recomendações da norma NBR ISO/IEC 17025⁽²⁴⁾.

A sala de irradiação possui blindagens constituídas por paredes de concreto e são supervisionadas pelo serviço de radioproteção do IPEN. Seus usuários utilizam dosímetros pessoais controlados e produzidos pelo próprio IPEN.

3.2 Equipamentos

Os seguintes instrumentos e equipamentos foram diretamente utilizados neste trabalho:

3.2.1 Sistema Irradiador OB85/1

Irradiador pneumático acionado remotamente por um painel de comando localizado na ante-sala de calibração, com controle de tempo de irradiação e com as seguintes fontes instaladas em seu interior:

[§] Tecnologia de Controle.

^{**} Proteção contra Radiações.

Fonte de Cobalto (^{60}Co), com atividade de 37GBq ($\pm 10\%$) em 11 de maio de 1995, fonte de Césio 137 (^{137}Cs), com atividade de 740GBq (+ 15% –10 %) em 28 de abril de 1995, fonte de Radio 226 (^{226}Ra), com atividade de 370MBq ($\pm 10\%$) em 27 de abril de 1995 e fonte de Amerício 241 (^{241}Am)^{††}, com atividade de 7,4GBq ($\pm 10\%$) em 17 de maio de 1995.

Na Figura 11 é mostrado o irradiador OB85/1.

Figura 11 - Irradiador OB85/1, de marca STS.

3.2.2 Sistema Irradiador Caesa-Gammatron

Irradiador de teleterapia, acionado eletricamente através de um painel de comando confeccionado^{††} pelo LCI-IPEN e localizado na ante-sala de calibração, com controle de tempo de irradiação e com uma única fonte de Césio 137 instalada em seu interior, na Figura 12 é mostrado o irradiador Caesa-Gammatron.

Figura 12 - Sistema Irradiador de Teleterapia Caesa-Gammatron.

^{††} A fonte de Amerício 241 (Am-241) é a única que não se encontra instalada no interior do irradiador, podendo ser instalada pela parte de trás do irradiador quando necessário seu uso.

^{††} Técnico Sr. Marcos Xavier.

3.2.3 Sistemas de Referência

Durante o desenvolvimento do trabalho foram utilizadas câmaras de ionização diferentes dependendo do tipo de medida. Para as medidas de dosimetria dos feixes de radiação foram utilizadas as câmaras de ionização padrão secundário, marca PTW, modelo 32002 (1.000 cm^3) e modelo 23361 (30 cm^3), mostradas na Figura 13.

Figura 13 - (a) Câmara de Ionização padrão secundário (1000 cm^3) e (b) Câmara de Ionização padrão secundário (30 cm^3).

Para as medidas de homogeneidade do campo de radiação foi utilizada a câmara de ionização padrão secundário marca PTW, modelo 31013 ($0,3\text{ cm}^3$). Todas as câmaras de ionização utilizadas foram acopladas ao eletrômetro padrão secundário PTW-UNIDOS. A câmara de ionização e o eletrômetro estão ilustrados na Figura 14.

Figura 14 - (a) Eletrômetro padrão secundário PTW-UNIDOS e (b) Câmara de Ionização padrão secundário ($0,3\text{ cm}^3$).

3.2.4 Sistemas Auxiliares e Acessórios Importantes:

Além do sistemas de referência, foram utilizados outros sistemas auxiliares como absorvedores de alta pureza, simuladores de água e de Lucite, barômetros aneróide e de coluna, higrômetros, termômetros, desumidificadores e climatizadores de ambiente, etc.

3.3 Condições Iniciais do Laboratório de Calibração Gama

Uma análise da estrutura física do laboratório de calibração gama demonstrou a necessidade de melhoria dos seus arranjos e sistemas, visando o atendimento dos princípios de proteção radiológica (principalmente a otimização). A Figura 15 mostra as condições gerais da sala de calibração gama. Na sequência, serão mostrados os diversos detalhes observados que precisavam ser melhorados.

Figura 15 - Visão geral da sala de calibração gama do LCI-IPEN.

A Figura 16 mostra o irradiador OB85/1 e o detalhe dos atenuadores. Esse irradiador vem originalmente com apenas dois atenuadores de chumbo, sendo que o LCI-IPEN confeccionou um terceiro atenuador, com o objetivo de possibilitar um intervalo de medida maior, estendendo o limite inferior da taxa de kerma no ar.

Figura 16 - (a) Irradiador OB85/1 e (b) detalhe do posicionamento dos atenuadores.

A Figura 17 mostra os detalhes da mesa de posicionamento utilizada nas calibrações e testes, podendo ser observados alguns detalhes, como as cantoneiras fixadas no chão e que eram utilizadas como trilhos para o deslizamento da mesa, que danificavam o piso do laboratório com riscos porque as rodas externas da mesa, não deslizavam sobre as cantoneiras (a). Também é possível visualizar o manipulô que utilizado para regular a altura da mesa (b), o ponteiro de metal e a trena métrica utilizados para verificação da distância da mesa em relação à fonte de radiação (c).

Figura 17 - (a) Mesa de posicionamento, (b) manipulô da mesa e (c) ponteiro de metal utilizado para verificar a posição da mesa (c).

A Figura 18 mostra os instrumentos utilizados para coleta dos dados relativos às condições ambientais, sendo todos analógicos.

Figura 18 – Termômetro, Higrômetro e Barômetro utilizados pelo Laboratório Gama.

3.4 Materiais utilizados no projeto

3.4.1 Softwares

- Software Solid Edge (projeto em 3D);
- Software FluidSIM 4 (simular sistema pneumático);
- Software AutoCad 14 (desenho com precisão do campo de radiação);
- Software Procp V5Kind 3.0 (programação do CLP).

3.4.2 Dispositivo pneumático do OB85/1^{§§}

- 3 cilindros pneumáticos magnéticos de dupla ação;
- 6 sensores magnéticos;
- 2 sensores de fim de curso (*switch*);
- 3 válvulas direcionais 5/2 com duplo solenóide;
- 1 fonte de 24 V (DC) e 12 V (DC) / 1,5 A.

3.4.3 Dispositivo atenuador do CAESA-GAMMATRON

- 1 motor DC (12 V);
- laser duplo;
- 2 réles de 12 V (DC), usado para lógica de réles, para inverter rotação).

3.4.4 Mesa de posicionamento

- Base de acrílico;
- Câmera de vídeo;
- Monitor de LCD de 5";
- Motor de passo bipolar de 23kgf/cm;
- Driver de motor de passo;
- Fonte de 75 V (DC);
- Trilho de aço inox;
- Base de madeira para a trena;
- 5 metros de correia dentada;

^{§§} Foi utilizado para o sistema de ar comprimido, o mesmo compressor utilizado para alimentar os cilindros que acionam as fontes de radiação no interior do irradiador.

- 5 metros de tubo de alumínio para correia dentada;
- Trena de 5 metros;
- Esteira porta cabos;
- Cantoneira em U (para proteger esteira porta cabos).

3.4.5 Características do CAESA-GAMMATRON

- Filme radiocrômico;
- Monitor de radiação tipo teletector;
- Monitor de radiação tipo Rados-60.

3.4.6 Controle do sistema automatizado

- Controlador GP3011/FFR (IHM+CLP);
- Módulo GP3 ESD Q30 (16E/14S digitais);
- Lâmpada 24VDC (indicar problema no sistema);
- Botoeira liga/desliga.

4 METODOLOGIA E RESULTADOS

4.1 Análise das necessidades do laboratório de calibração

Após uma análise das necessidades do LCI-IPEN em relação a suas calibrações e testes, realizada em conjunto com os técnicos e pesquisadores que utilizam estas instalações, foi possível definir quais seriam os pontos importantes para serem melhorados através da automação do sistema e da implantação de um sistema irradiador que tivesse uma fonte com uma atividade mais intensa que a em uso na rotina. Essa análise foi realizada, usando os princípios da engenharia de requisitos, muito utilizada em desenvolvimento de software, que tem por objetivo melhorar a modelagem de sistemas e a capacidade de analisá-los, possibilitando maior entendimento de suas características antes da implementação⁽⁴⁸⁾, e obtendo-se os requisitos necessários ao melhoramento do processo de calibração.

Foi observado inicialmente que os técnicos e pesquisadores que utilizavam o sistema de radiação gama, necessitavam entrar na sala de calibração diversas vezes durante uma calibração ou testes, ou ainda em atividades de pesquisas, pois necessitavam movimentar a mesa de posicionamento ou efetuar a troca dos atenuadores do sistema irradiador OB85/1, sendo observado que essa movimentação poderia ser eliminada pelo menos em parte, através da automação desse sistema. Também foi observado que para se ampliar a faixa de dose utilizando o sistema irradiador Caesa-Gammatron, seria necessário instalar nesse sistema, um dispositivo atenuador de radiação, possibilitando o uso desse sistema com um atenuador ou sem, conseguindo assim duas faixas de uso desse sistema.

4.2 Dispositivo Pneumático

O primeiro item observado foi o processo para a troca dos atenuadores de chumbo posicionados na saída do irradiador. Esta troca era realizada manualmente com a presença física do operador dentro da sala de calibração. Com o apoio do setor de projetos do IPEN^{***} foi feito um estudo para definir a melhor configuração de um dispositivo mecânico para troca dos atenuadores de chumbo, utilizando o *Software Solid Edge* que permite o desenvolvimento em 3D, facilitando o acompanhamento do projeto devido a opção de visualizar as diversas partes do dispositivo mecânico, obtendo-se como resultado final o projeto mostrado na Figura 19. Esse dispositivo foi confeccionado em alumínio e sua base de fixação em aço.

Figura 19 - Projeto em *Solid Edge* do dispositivo para troca dos atenuadores de chumbo.

A partir deste projeto foram usinadas todas as peças do dispositivo para troca dos atenuadores, que foi montado e instalado no Sistema Irradiador OB85/1, conforme a Figura 20.

(a)

(b)

Figura 20 - (a) Peças do dispositivo mecânico para troca dos atenuadores e (b) dispositivo instalado no Sistema Irradiador OB 85/1.

^{***} Em especial com o Projetista Sr. Márcio A. G. Ramos.

Após a instalação física do dispositivo para troca dos atenuadores, foi realizada uma simulação com o *Software FluidSIM 4 (Demo-Version)*⁽⁴⁹⁾, para definir os componentes pneumáticos que seriam utilizados na automação (cilindros pneumáticos magnéticos, válvulas direcionais, reguladores de fluxo, etc.), conforme tela do software na Figura 21.

Figura 21 - Tela do software FluidSim da FESTO, com a simulação do sistema em operação.

Pela simulação foi possível definir os componentes pneumáticos que seriam utilizados, incluindo a necessidade de reguladores de fluxo, proporcionando movimentos suaves dos atenuadores de chumbo e evitando desgastes e barulhos devido ao movimento das peças. Foi confeccionado um painel de comando para controle do sistema pneumático, como mostrado na Figura 22. Com esse painel de comando é possível selecionar quantos atenuadores de chumbo o operador deseja utilizar, usando os botões em vermelho para retirar ou os verdes para inserir os atenuadores.

Figura 22 - (a) Painel de comando montado e (b) instalado na sala de controle do LCI-IPEN.

Com a instalação da parte pneumática e do painel de controle, foi possível iniciar a utilização do dispositivo para troca dos atenuadores de radiação na rotina de calibração e testes do Sistema Irradiador OB85/1. Na Figura 23 é possível visualizar os detalhes da montagem no Sistema Irradiador OB85/1, visualizando os sensores magnéticos instalados nos cilindros pneumáticos magnéticos, que são os responsáveis pela indicação no painel de comando do posicionamento dos atenuadores (aberto e fechado), acendendo as lâmpadas da botoeira (botão). Quando o operador/técnico aciona o botão referente à posição que deseja para cada atenuador, assim que o atenuador ficar na posição desejada, é acesa a respectiva lâmpada da botoeira, indicando que o atenuador está na posição desejada, dessa forma o operador tem a confirmação de sua seleção. Na parte de trás do irradiador OB85/1 foram instaladas as válvulas direcionais 5/2, que utilizam o mesmo sistema de ar comprimido do irradiador, que é alimentado por um compressor de ar instalado na sala de calibração.

Figura 23 - (a) Detalhe dos cilindros pneumáticos com sensores magnéticos e (b) detalhe das válvulas direcionais instaladas na parte traseira do irradiador OB85/1.

4.3 Reconfiguração da disposição dos irradiadores

Devido ao elevado valor da atividade do Sistema Irradiador Caesa-Gammatron, foi necessário realizar um deslocamento de 50 cm de ambos os sistemas irradiadores (OB85/1 e Caesa-Gammatron), em direção ao centro da sala, facilitando a passagem por trás de ambos os sistemas, além de facilitar a manutenção. Após o deslocamento a passagem detrás dos irradiadores passou a ser de 70 cm, conforme Figura 24.

Figura 24 - Detalhe da passagem por detrás dos irradiadores OB85/1 e Caesa-Gammatron.

Com estas alterações na posição dos irradiadores, foi necessário modificar também a localização do sistema de posicionamento a laser de referência de altura, sendo que este era originalmente instalado na parede da sala, e foi instalado diretamente no dispositivo de troca dos atenuadores de chumbo, conforme Figura 25.

Figura 25 - Posição do laser de referência de altura e alinhamento.

4.4 Mesa de Posicionamento

O segundo item estudado foi a mesa de posicionamento, sendo que seu projeto necessitava atender ambos os irradiadores (OB85/1 e Caesa-Gammatron), enquanto a antiga mesa de posicionamento apenas atendia o

irradiador OB85/1. Novamente em conjunto com o setor de projetos do IPEN⁺⁺⁺, foi elaborado um projeto que atendesse a nova necessidade⁺⁺⁺ do laboratório de calibração gama.

Foi projetada uma mesa de posicionamento, capaz de possibilitar o uso dos dois sistemas irradiadores do Laboratório de Calibração Gama, possibilitando algumas vantagens, em relação à antiga mesa de posicionamento:

- Maior curso no ajuste de altura (50 cm), facilitando o uso de simuladores, utilizados principalmente em atividades de pesquisa, enquanto a antiga mesa de posicionamento apenas proporcionava um ajuste de 30 cm, dificultando algumas irradiações de amostras;
- Deslizamento mais suave com o uso de trilhos em aço inox. A mesa de posicionamento anterior deslizava sobre cantoneiras, que dificultava seu deslizamento de maneira suave;
- Maior flexibilidade, possibilitando seu uso por ambos os sistemas irradiadores, devido suas dimensões;
- Fios e cabeamentos incorporados na própria mesa de posicionamento, através de uma esteira porta cabos, facilitando a calibração e testes de equipamentos que necessitam ser alimentados pela energia elétrica da sala de calibração.

Nas Figuras 26 e 27 são mostrados alguns detalhes do projeto da mesa de posicionamento, desenvolvido com o software *Solid Edge*.

Figura 26 - Visão de detalhes do projeto da mesa de posicionamento, com as dimensões da mesa.

⁺⁺⁺ Em especial com o Projetista Márcio A. G. Ramos.

⁺⁺⁺ Ser utilizado por ambos os sistemas irradiadores.

Figura 27 - Detalhe da altura mínima (58 cm) e máxima (108 cm).

A partir do projeto da mesa de posicionamento, foram usinadas todas as peças, conforme Figura 28.

Figura 28 - Peças usinadas da mesa de posicionamento.

Antes da montagem das peças usinadas, foram instalados na sala de calibração os trilhos em aço inox. Após esse procedimento as peças foram montadas e a mesa de posicionamento foi devidamente instalada na sala de calibração conforme Figura 29.

Figura 29 - Mesa de posicionamento montada e instalada na sala de calibração.

Na Figura 30 são mostrados alguns detalhes da mesa de posicionamento, como a esteira porta cabos (a) que possibilitou a entrada da fiação elétrica e cabos em geral pela parte inferior da mesa, os ajustes de altura, um por furação graduada (b) e outro por manipulador (c), possibilitando um maior curso na altura.

Figura 30 - (a) Detalhe da esteira porta cabos, (b) ajuste escalonado de altura e (c) ajuste de altura por manipulador.

O ponteiro de metal com 1,5 mm de diâmetro, utilizado para verificação da distância da mesa de posicionamento de detectores em relação aos irradiadores, foi substituído por um novo conjunto, composto por uma lâmina em acrílico, uma câmera de vídeo e um mini-monitor, instalado diretamente na mesa de posicionamento, evitando erro de paralaxe e oferecendo maior qualidade na medida da distância. Foi instalada uma nova trena, sendo essa mais larga e com números maiores em relação à anteriormente utilizada, montada sobre uma base em madeira. Na Figura 31 é possível visualizar essas modificações.

Figura 31 - (a) Detalhe do mini-monitor de LCD e (b) câmera de vídeo, acrílico utilizado em substituição ao ponteiro e base em madeira para a trena.

Com o objetivo de facilitar o posicionamento dos diversos instrumentos no feixe de radiação, foi desenvolvido um suporte em acrílico, com duas partes móveis, uma para monitores pequenos e outra para os maiores, conforme Figura 32.

Figura 32 - (a) Suporte para medidores e detectores menores, (b) suportes para medidores maiores e (c) suporte em uso durante uma calibração.

4.5 Dispositivo Atenuador do Irradiador Caesa-Gammatron

Com a implantação do sistema Caesa-Gammatron na sala de irradiação, foi necessária a instalação de um dispositivo atenuador para ampliar a faixa de taxa de kerma no ar, além de contribuir para diminuir a dose ocupacional dos trabalhadores^{§§§}. Este dispositivo funciona como uma blindagem adicional quando está na posição fechada e os valores de dose medidos no interior da sala são menores. Após a instalação desse dispositivo, foram realizadas medidas a quatro metros da fonte de radiação, obtendo-se uma taxa de kerma no ar de $(90,06 \pm 0,03^{****})$ mGy/h e medidas a um metro da fonte de radiação, obtendo-se $(1318,23 \pm 0,08)$ mGy/h, ambas as medidas com o atenuador aberto e depois foram realizadas medidas com o atenuador fechado, obtendo-se para $(7,09 \pm 0,05)$ mGy/h (para quatro metros) e $(1318,23 \pm 0,08)$ mGy/h (para um metro).

^{§§§} Porque também vai servir como blindagem, para diminuir o BG na sala quando este dispositivo estiver fechado.

^{****} Incertezas com $k=2$, valores obtidos com a câmara padrão de 30 cm^3 .

Esse dispositivo também é controlado remotamente da sala de controle. Na Figura 33 é possível visualizar o dispositivo instalado no irradiador.

Figura 33 - Dispositivo Atenuador de radiação.

4.6 Ampliação do Intervalo da Taxa de kerma no Ar

Como citado anteriormente, após a implantação do sistema irradiador Caesa-Gammatron, o intervalo de taxa de kerma no ar foi ampliado significativamente. O Sistema Irradiador OB85/1 possui um intervalo de taxa de Kerma no ar de $(2,36 \pm 0,02) \mu\text{Gy/h}$ a $(37,75 \pm 0,12) \text{mGy/h}$ enquanto no Sistema Irradiador Caesa-Gammatron este intervalo vai de $(7,09 \pm 0,01) \text{mGy/h}$ a $(1318,26 \pm 0,15) \text{mGy/h}$, dosimetria realizada em 16/03/2012 como parte desse trabalho. A Figura 34 mostra um gráfico com os intervalos de taxa de kerma no ar de ambos os irradiadores e a Figura 35 mostra a disposição dos dois irradiadores na sala de calibração gama com os seus respectivos sistemas atenuadores.

Figura 34 - Intervalo de taxa de kerma no ar do laboratório gama.

Figura 35 – Irradiadores com seus dispositivos atenuadores instalados.

4.7 Instalação do Medidor das Condições Ambientais

Foi adquirido um *Datalogger* da Lufft (Registrador gráfico de temperatura, umidade relativa e pressão barométrica), que foi instalado no interior na sala de calibração de instrumentos, com o objetivo de modernizar e facilitar a aquisição dos dados, possibilitando que o técnico/pesquisador que esteja utilizando o sistema não necessite entrar na sala de calibração para obter os valores relativos às condições ambientais, uma vez que esses dados são disponibilizados diretamente na tela do computador utilizado na anti-sala, na Figura 36 são mostrados o *Datalogger* e a tela do software de aquisição de dados que acompanha o produto.

Figura 36 – (a) Datalogger instalado próximos dos instrumentos analógicos e (b) Tela do monitor mostrando uma planilha de calibração ao lado dos valores mostrados pelo software de aquisição de dados.

Com a instalação do *Datalogger*, houve uma melhora na qualidade da aquisição desses valores, pois esses dados exigiam anteriormente que o técnico/pesquisador tivesse que entrar na sala de calibração, verificar os valores de temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa do ar e memorizar esses dados, retornasse a sala de controle para poder anotar na planilha de calibração, dificultando o processo, causando um aumento no tempo de calibração.

4.8 Caracterização do Sistema Irradiador Caesa-Gammatron

Para se utilizar o sistema irradiador Caesa-Gammatron nas medidas de calibração, foi necessário realizar um estudo para a determinação de algumas características, pois este equipamento foi uma doação da Fundação Antônio Prudente (Hospital do Câncer), por motivo de baixa atividade de sua fonte radioativa de ^{137}Cs para uso em radioterapia. Esse equipamento não possui mais nenhuma documentação que indique suas características, como posição da fonte radioativa, nem sua atual atividade.

A principal vantagem no uso desse equipamento na rotina de calibração e testes, é a possibilidade de ampliar o intervalo de taxas de kerma no ar e efetuar calibração de instrumentos que operam com altas taxas de dose, como é o caso do teletector, que possui dois detectores Geiger-Muller, sendo um para faixas de dose baixa e outra para faixa de dose alta.

Para se utilizar a mesma trena métrica em uso irradiador OB85/1, foi necessário a determinação da posição da fonte no interior do irradiador Caesa-Gammatron. O procedimento utilizado nesta determinação está explicado a seguir:

4.8.1 Estimativa da Posição da Fonte de ^{137}Cs

Com base nas marcações encontradas no colimador do irradiador, utilizadas para ajustar o tamanho do campo de radiação, conforme Figura 37, foi possível estabelecer uma primeira estimativa para a posição da fonte de ^{137}Cs no interior do irradiador. Utilizando o tamanho do campo indicado na saída do colimador foi possível calcular a posição da fonte, por cálculo geométrico (semelhança de triângulos).

Figura 37 - (a) Visão do mecanismo de ajuste do tamanho da abertura do colimador e (b) detalhe do mecanismo de ajuste da abertura do colimador.

Para melhorar a estimativa do posicionamento foi necessário realizar uma desmontagem parcial do colimador, que possibilitou algumas observações e medições no cabeçote do irradiador, na tentativa de se obter a posição e tamanho da fonte no seu interior, como mostrado na Figura 38.

Figura 38 - (a) Vista lateral do irradiador Caesa-Gammatron, (b) irradiador sem o colimador e (c) medição do tamanho do diâmetro de abertura da saída do cabeçote.

Utilizando um paquímetro foi possível medir o diâmetro da abertura por onde a fonte é exposta. Foi montado um arranjo experimental para fixar o paquímetro na posição e com auxílio de uma câmera de vídeo, foi ajustada a abertura do paquímetro de modo a coincidir com o diâmetro da fonte de ^{137}Cs , expondo a fonte do irradiador até conseguir com que o diâmetro da fonte exposta

coincidisse com a abertura do paquímetro, possibilitando uma boa estimativa de seu diâmetro, conforme mostra a Figura 39. Esse procedimento foi necessário devido à influência da região de penumbra no tamanho do campo de radiação. Desta forma se obteve uma estimativa para o diâmetro da fonte de ^{137}Cs (25 mm). Com esses dados foi possível fazer um esquema em tamanho real e montar um arranjo experimental com auxílio de um filme radiocrômico, como mostrado na Figura 40, para se determinar o tamanho do campo de forma experimental e compará-lo ao obtido por análise geométrica. Esta comparação pode ser vista na Figura 41.

Figura 39 - (a) Orifício onde a fonte é exposta no irradiador Caesa-Gammatron e (b) fonte de Cs-137 exposta e medida com um paquímetro.

Figura 40 - (a) Arranjo experimental montado no Irradiador Caesa-Gammatron), (b) filme radiocrômico antes da irradiação e (c) filme radiocrômico após a irradiação.

Figura 41 - (a) Comparação entre o tamanho do campo de radiação obtido por geometria e o obtido experimentalmente com o filme radiocrômico e (b) esquema geométrico representado em AutoCAD.

Com esse arranjo experimental em conjunto com o cálculo geométrico, foi possível estimar a distância entre a frente do colimador até a fonte de ^{137}Cs no interior do irradiador em 16,5 cm, conforme diagrama mostrado na Figura 42. Esses dados serviram para posicionar o irradiador Caesa-Gammatron de forma que sua fonte de ^{137}Cs fique alinhada com a fonte do sistema irradiador OB85/1, possibilitando o uso da mesma trena de referência utilizada para medir a distância entre a fonte e o medidor/detector de radiação nas calibrações.

Figura 42 - Esquema do irradiador Caesa-Gammatron com dois campos de radiação e suas respectivas distâncias.

4.8.2 Definição da Metodologia para Estimativa da Atividade

Para estimar a atividade da fonte de ^{137}Cs localizada no interior do irradiador Caesa-Gammatron, inicialmente foi utilizado um experimento para estimar a atividade da fonte de ^{137}Cs do Sistema Irradiador OB85/1, validando

assim o método para ser utilizado no irradiador Caesa-Gammatron, porque o Sistema Irradiador OB85/1 possui toda a documentação técnica, sendo possível comparar os resultados obtidos experimentalmente com os constantes na documentação. Foram realizadas medições à distância de um metro da fonte de ^{137}Cs do Sistema Irradiador OB85/1, conforme Figura 43, com um medidor de radiação do tipo teletector, posicionado no centro do feixe de radiação.

Figura 43 - Arranjo experimental para estimar a atividade da fonte de ^{137}Cs do Sistema Irradiador OB85/1.

A taxa de exposição da fonte de ^{137}Cs obtida a esta distância foi $4,57 \pm 0,02$ R/h e com esse valor foram realizados os cálculos de atividade⁽³⁸⁾ usando a equação^{†††} (5), obtendo-se então uma estimativa do valor da atividade.

$$X = \frac{\Gamma \times A}{d^2} \Rightarrow A = \frac{X \times d^2}{\Gamma} \quad (5)$$

Onde: X = exposição, A = atividade, d = distância e Γ = fator gama^{†††*}

$$A_1 = \frac{X \times d^2}{\Gamma} \Rightarrow A_1 = \frac{4,57 \times 1^2}{0,34}$$

$$A_1 = (13,45 \pm 0,06) \text{ Ci} \quad \text{ou} \quad A_1 = (497,6 \pm 2,2) \text{ GBq}$$

^{†††} Embora essa equação seja para fonte isotrópica, foi utilizada devida sua simplicidade e por causa do valor obtido ser apenas uma estimativa, não sendo utilizado para nenhum cálculo. Esse valor foi obtido em 19/06/2010

^{†††*} Fator característico da emissão gama da fonte.

Este valor foi comparado com aquele contido no certificado de fabricação da fonte de ^{137}Cs (740,0 GBq (+15% -10%))^{§§§§} datado de 28/04/1995 e corrigido pelo decaimento para o dia 19/06/2010.^{*****}, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Tabela com o cálculo do tempo de decaimento em anos.

Data Inicial	Data Final	Tempo
28/04/1995	19/06/2010	5531 (dias)
		15,14 (anos)

Este tempo de decaimento foi usado para estimar o valor da atividade ⁽³⁷⁾ da fonte de ^{137}Cs em 19/06/2010, usando a equação (6).

$$A = A_0 \times e^{-\lambda \times t} \quad (6)$$

Onde: A = atividade, A_0 = atividade inicial, λ = constante de desintegração, e t = tempo de decaimento.

A constante de desintegração é calculada pela equação (7), usando o tempo de meia vida para o ^{137}Cs de 30,17 anos.

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (7)$$

Os cálculos, utilizando a equação (6) foram então realizados de acordo com:

$$A_2 = A_0 \times e^{-\lambda \times t} \Rightarrow A_2 = 740,0 \times e^{-(0,02297 \times 15,14)}$$

$$A_2 = 522,6 (+15\% - 10\%) [\text{GBq}] \quad \text{ou} \quad A_2 = 14,10 (+15\% - 10\%) [\text{Ci}]$$

^{§§§§} Certificado da fonte de ^{137}Cs .

^{*****} Foi levado em conta os anos bissextos.

Comparando o valor medido com o valor calculado, é verificada uma diferença de aproximadamente 5,0 % para a estimativa do valor da atividade da fonte de ^{137}Cs do Sistema Irradiador OB85/1.

Esse valor é compatível com as incertezas (+15%,-10%) apresentadas pelo fabricante da fonte de ^{137}Cs do irradiador OB85/1.

4.8.3 Aplicação da Metodologia para Estimativa da Atividade

Com base nos valores obtidos, pode-se usar a mesma metodologia para estimar o valor da atividade da fonte de ^{137}Cs do irradiador Caesa-Gammatron, pois se observa uma incerteza da ordem de 5%, valor aceitável para o caso de fontes radioativas. Do mesmo modo, inicialmente foi medido o valor da taxa de exposição a uma distância de um metro da fonte de ^{137}Cs do irradiador Caesa-Gammatron, conforme Figura 44.

Figura 44 - Arranjo experimental para estimar a atividade da fonte de ^{137}Cs do Sistema Irradiador Caesa-Gammatron.

O valor de taxa de exposição encontrado neste experimento foi de 164,1 R/h e com esse valor foram feitos os cálculos mostrados a seguir, para obter uma estimativa do valor da atividade⁺⁺⁺⁺.

$$A = \frac{164,1 \times 1^2}{0,34} \Rightarrow A \cong 483 \text{ Ci} \quad \text{ou} \quad A \cong 17.860 \text{ GBq}$$

⁺⁺⁺⁺ Valor obtido em 19/06/2010.

Esse experimento demonstra que o Sistema Irradiador Caesa-Gammatron possui uma atividade 30 vezes superior ao Sistema Irradiador OB85/1, podendo ampliar bastante a faixa de calibração de alguns modelos de monitores de radiação gama, que até então não poderiam ser testados no sistema anterior.

4.9 Verificação do Procedimento de Dosimetria

A dosimetria do campo de radiação do sistema irradiador OB85/1, foi realizada com o sistema dosimétrico de referência padrão secundário^{****} do LCI-IPEN com rastreabilidade ao Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI), calibrado em termos de kerma no ar. É recomendada a realização de uma dosimetria periódica⁽³⁹⁾, sendo realizadas medidas em quatro pontos do campo de radiação, em intervalos de um metro de distância entre cada ponto. Os valores obtidos são utilizados para verificação dos valores utilizados como referência pelo laboratório gama. Com o objetivo de verificar esse procedimento em uso pelo LCI-IPEN, foi realizada uma dosimetria com intervalos de apenas 10 cm de distância entre cada ponto do campo de radiação. Essas medidas foram realizadas para todas as condições de uso do sistema irradiador, ou seja, sem atenuador, com um atenuador, com dois atenuadores e com três atenuadores. Após essa dosimetria foram confeccionados os gráficos e respectivos ajustes, com o objetivo de comparar os ajustes e verificar se o procedimento atualmente adotado pelo laboratório gama está adequado.

Os valores de kerma no ar mostrado nos gráficos foram obtidos com a equação (9), conforme certificado de calibração do sistema de referência.

$$K_{ar} = N_K \times K_Q \times K_D \times L \quad (9)$$

Onde N_K é o coeficiente de calibração, K_Q é o fator de correção para a qualidade, L é a leitura do sistema de referência e K_D é fator de correção para a densidade do ar.

^{****} Eletrômetro PTW-UNIDOS e câmara padrão de 1000 cm³.

Nas Figuras 45, 46 e 47, são mostrados os gráficos e seus respectivos ajustes, sendo realizadas medidas com intervalos de 10 cm, 50 cm e 100 cm, sem atenuador, em todo o campo de radiação.

Figura 45 – Dosimetria do campo de radiação da fonte de ^{137}Cs , com intervalo de 10 cm.

Figura 46 - Dosimetria do campo de radiação da fonte de ^{137}Cs , com intervalo de 50 cm.

Figura 47 - Dosimetria do campo de radiação da fonte de ^{137}Cs , com intervalo de 100 cm.

Nas Figuras 48, 49 e 50, são mostrados os gráficos e seus respectivos ajustes, sendo realizadas medidas com intervalos de 10 cm, 50 cm e 100 cm, com um atenuador, em todo o campo de radiação.

Figura 48 - Dosimetria do campo de radiação da fonte de ^{137}Cs , com intervalo de 10 cm.

Figura 49 - Dosimetria do campo de radiação da fonte de ^{137}Cs , com intervalo de 50 cm.

Figura 50 - Dosimetria do campo de radiação da fonte de ^{137}Cs , com intervalo de 100 cm.

Nas Figuras 51, 52 e 53, são mostrados os gráficos e seus respectivos ajustes, sendo realizadas medidas com intervalos de 10 cm, 50 cm e 100 cm, com dois atenuadores, em todo o campo de radiação.

Figura 51 - Dosimetria do campo de radiação da fonte de ^{137}Cs , com intervalo de 10 cm.

Figura 52 - Dosimetria do campo de radiação da fonte de ^{137}Cs , com intervalo de 50 cm.

Figura 53 - Dosimetria do campo de radiação da fonte de ^{137}Cs , com intervalo de 100 cm.

Nas Figuras 54, 55 e 56, são mostrados os gráficos e seus respectivos ajustes, sendo realizadas medidas com intervalos de 10 cm, 50 cm e 100 cm, com três atenuadores, em todo o campo de radiação.

Figura 54 - Dosimetria do campo de radiação da fonte de ^{137}Cs , com intervalo de 10 cm.

Figura 55 - Dosimetria do campo de radiação da fonte de ^{137}Cs , com intervalo de 50 cm.

Figura 56 - Dosimetria do campo de radiação da fonte de ^{137}Cs , com intervalo de 100 cm.

Devido às diferenças nos expoentes das funções ajustadas serem muito pequenas, conforme Tabela 3, é possível verificar que o atual procedimento de dosimetria utilizado pelo laboratório gama está adequado. Nos casos da utilização

de um conjunto atenuador, a distância foi medida a partir do último atenuador, seguindo as recomendações da Norma ISO 4037⁽³⁹⁾.

Tabela 3 – Comparação entre os valores de expoentes ajustados.

Comparação dos valores de expoente ajustados				
Distância (cm)	Sem Atenuador	Um Atenuador	Dois Atenuadores	Três Atenuadores
10,0	1,99	1,82	1,77	1,49
50,0	1,99	1,81	1,77	1,49
100,0	1,99	1,81	1,76	1,48

4.10 Dosimetria do Irradiador OB85/1

Após as modificações no arranjo do laboratório de calibração gama, houve a necessidade de realizar uma nova dosimetria, sendo essa uma dosimetria completa em ambos os sistemas irradiadores e em todas as suas fontes^{§§§§§} de radiação em uso pelo laboratório.

A primeira dosimetria foi realizada no sistema irradiador OB85/1, utilizando o sistema dosimétrico de referência padrão para radiação gama do Laboratório de Calibração de Instrumentos do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (LCI-IPEN) com rastreabilidade ao Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI), calibrado em termos de kerma no ar com uma incerteza de 1,8% (k=2), essa dosimetria foi realizada em 25/03/2012.

Nas Figuras 57, 58, 59 e 60 são mostrados os gráficos da dosimetria da fonte de ¹³⁷Cs e nas Figuras 61, 62, 63 e 64 são mostrados os gráficos da dosimetria da fonte de ⁶⁰Co. Agora que já foi verificado que a dosimetria pode ser realizada com apenas quatro pontos, sem comprometer as curvas, foram utilizados apenas quatro pontos com intervalos de um metro (100 cm) para a dosimetria de ambas as fontes de radiação.

^{§§§§§} Dosimetria realiza no sistema irradiador OB85/1 (fonte de ¹³⁷Cs e ⁶⁰Co) e no sistema irradiador Caesa-Gammatron (¹³⁷Cs).

Figura 57 – Dosimetria do campo de radiação da fonte de ^{137}Cs , sem atenuador.

Figura 58 – Dosimetria do campo de radiação da fonte de ^{137}Cs , com um atenuador.

Figura 59 – Dosimetria do campo de radiação da fonte de ^{137}Cs , com dois atenuadores.

Figura 60 – Dosimetria do campo de radiação da fonte de ^{137}Cs , com três atenuadores.

Figura 61 – Dosimetria do campo de radiação da fonte de ^{60}Co , sem atenuador.

Figura 62 – Dosimetria do campo de radiação da fonte de ^{60}Co , com um atenuador.

Figura 63 – Dosimetria do campo de radiação da fonte de ^{60}Co , com dois atenuadores.

Figura 64 – Dosimetria do campo de radiação da fonte de ^{60}Co , com três atenuadores.

4.11 Homogeneidade do Campo de Radiação do Irradiador OB/85-1

Utilizando-se a câmara padrão secundário da PTW de $0,3 \text{ cm}^3$ (modelo 31013) e o eletrômetro PTW-UNIDOS, foram realizadas medidas nas distâncias de um e quatro metros nos eixos x (horizontal) e y (vertical), com a finalidade de se obter o tamanho experimental do campo de radiação (sem os atenuadores), através de sua homogeneidade, porque só é possível realizar calibrações e testes na parte homogênea do campo, que deve ser maior do que 95%⁽¹⁹⁾. Na Figura 65 é mostrado o gráfico de homogeneidade do campo de radiação nos eixos x e y a uma distância de um metro da fonte de radiação e na Figura 66 é mostrado o gráfico a uma distância de quatro metros *****.

Figura 65 - Homogeneidade do campo de radiação a um metro do OB85/1.

No gráfico acima é possível visualizar uma homogeneidade do campo de radiação elevada (-12 cm e +11 cm), indicando um tamanho de campo de radiação de 23 cm, em ambos os eixos.

***** A barra de erros representa o erro padrão da média.

Figura 66 - Homogeneidade do campo de radiação a quatro metros do OB85/1.

Verifica-se uma homogeneidade acima de 95% nos dois casos, estando de acordo com as recomendações⁽¹⁹⁾.

A Figura 67 mostra um diagrama do tamanho do campo de radiação do irradiador OB85/1 obtido experimentalmente, onde é possível visualizar o tamanho experimental do campo de radiação a uma distância de metro (diâmetro de 23 cm) e a quatro metros (diâmetro de 54 cm) da fonte de radiação.

Figura 67 - Diagrama do campo de radiação do irradiador OB85/1.

Abaixo são apresentados os cálculos dos tamanhos de campo de radiação teórico, onde é possível perceber que os valores são muito próximos dos obtidos experimentalmente.

Os cálculos foram realizados conforme mostrado abaixo, onde $(19,00 \pm 0,05)$ cm é a distância da fonte até a saída do colimador e $(5,00 \pm 0,05)$ cm é o diâmetro do campo na saída do colimador, com esses dados foi possível calcular a razão entre eles e escrever uma função para se obter o valor teórico do tamanho do campo de radiação a qualquer distância da fonte, conforme mostrado abaixo.

$$\frac{19,0}{5,0} = 3,8 \quad \text{razão} \approx 4$$

Com valor da razão arredondado para quatro, se consegue uma garantia maior no valor da homogeneidade do campo de radiação, pois ao arredonda para cima, o valor do campo teórico fica menor, abaixo é mostrado os cálculos do tamanho do campo de radiação teórico e comparado com o obtido experimentalmente.

<p>Teórico</p> $\frac{100,0}{A} = 4 \Rightarrow A = 25cm$ <p>Experimental</p> $A \approx 23cm$	<p>Teórico</p> $\frac{400,0}{B} = 4 \Rightarrow B = 100cm$ <p>Experimental</p> $B \approx 54cm$
--	---

Comparando esses valores com os obtidos nos testes de homogeneidade do campo de radiação é possível perceber que os valores são bem próximos para o campo de radiação a uma distância de um metro. Para, a distância de quatro metros não foi possível realizar o teste de homogeneidade do campo até as dimensões do teórico, pois só foi possível realizar medidas até o tamanho de campo de radiação de 54 cm, devido às limitações físicas na realização das medidas. Os valores de tamanho de campo obtidos estão na Tabela 4.

Tabela 4 - Tamanho do Campo de Radiação do OB85/1.

Distância (cm)	Experimental (cm)	Teórico (cm)
100	23	25
400	54	100

4.12 Dosimetria do Irradiador Caesa-Gammatron

A dosimetria foi realizada utilizando o sistema dosimétrico de referência padrão para radiação gama do Laboratório de Calibração de Instrumentos do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (LCI-IPEN) com rastreabilidade ao Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI), calibrado em termos de kerma no ar com uma incerteza de 1,8% ($k=2$). Essas medidas foram realizadas para todas as condições de uso do sistema irradiador, ou seja, sem atenuador⁺⁺⁺⁺⁺ e com um atenuador. Após essa dosimetria foram confeccionados os gráficos e respectivos ajustes. No caso da utilização de atenuador, a distância foi medida a partir do último atenuador, seguindo as recomendações da Norma ISO 4037⁽³⁹⁾.

Essa dosimetria foi realizada em 25/03/2012, nas Figuras 68 e 69, são mostrados os gráficos e seus respectivos ajustes para medidas realizadas com intervalos de 100 cm, sem atenuador.

Figura 68 – Dosimetria da fonte de ^{137}Cs realizada sem atenuador.

⁺⁺⁺⁺⁺ Na dosimetria sem atenuador, não foi possível realizar medidas em valores inferiores a dois metros, devido às limitações do sistema padrão de 1000 cm^3 , as medidas no intervalo inferior a dois metros foram realizadas com o sistema padrão de 30 cm^3 , não sendo utilizadas nesses gráficos apenas por motivo de manter todos os dados com o mesmo sistema.

Figura 69 – Dosimetria da fonte de ^{137}Cs realizada com um atenuado.

4.13 Homogeneidade do Campo de Radiação do Irradiador Caesa-Gammatron

Utilizando-se a câmara padrão secundário da PTW de $0,3 \text{ cm}^3$ (modelo 31013) e o eletrômetro PTW-UNIDOS, foram realizadas medidas nas distâncias de um e quatro metros nos eixos x (horizontal) e y (vertical), com a finalidade de se obter o tamanho experimental do campo de radiação.

Nas Figuras 70 e 71 são mostrados os gráficos de homogeneidade do campo de radiação nos eixos x e y, respectivamente a uma distância de um metro e quatro metros da fonte de radiação.

É possível visualizar uma homogeneidade do campo de radiação elevada em ambos os gráficos, sendo (-11 cm e 9 cm) para um metro, indicando um tamanho de campo de radiação de 20 cm, em ambos os eixos, e (-30 cm e +30 cm) para quatro metros.

Verifica-se uma homogeneidade acima de 95% nos dois casos, estando de acordo com as recomendações⁽¹⁹⁾.

Figura 70 - Homogeneidade do campo de radiação a um metro do Caesa-Gammatron.

Figura 71 - Homogeneidade do campo de radiação a quatro metros do Caesa-Gammatron.

A Figura 72 mostra um diagrama do tamanho do campo de radiação do irradiador Caesa-Gammatron obtido experimentalmente, onde é possível visualizar o tamanho experimental do campo de radiação a uma distância de metro (diâmetro de 20 cm) e a quatro metros (diâmetro de 60 cm) da fonte de radiação.

Figura 72 - Diagrama do campo de radiação do irradiador Caesa-Gammatron.

Abaixo são apresentados os cálculos dos tamanhos de campo de radiação teórico, onde é possível perceber que os valores são muito próximos dos obtidos experimentalmente.

Os cálculos foram realizados conforme mostrado abaixo, onde $(16,50 \pm 0,05)$ cm é a distância da fonte até a saída do colimador e $[(4,50 \times 4,50) \pm 0,05]$ cm é o tamanho do campo na saída do colimador, com esses dados foi possível calcular a razão entre eles e escrever uma função para se obter o valor teórico do tamanho do campo de radiação a qualquer distância da fonte, conforme mostrado a seguir.

$$\frac{16,5}{4,5} \cong 3,67 \quad \text{razão} \approx 4$$

$$\begin{array}{c} \text{Teórico} \\ \frac{100,0}{C} = 4 \Rightarrow C = 25\text{cm} \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \text{Experimental} \\ C \cong 20\text{cm} \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \text{Teórico} \\ \frac{400,0}{D} = 4 \Rightarrow D = 100\text{cm} \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \text{Experimental} \\ D \cong 60\text{cm} \end{array}$$

Com base em todos os dados experimentais e cálculos realizados, foi possível escrever uma equação para que o técnico ou pesquisador que esteja utilizando os sistemas de irradiação possa utilizar para estimar o tamanho do campo de radiação de ambos os irradiadores, basta utilizar a equação (8), onde o valor cinco (5) na equação é o valor da razão arredondada para cima, de forma a garantir a homogeneidade no campo de radiação.

$$C = \frac{d}{5} \quad (8)$$

onde: C = tamanho do campo d = distância 5 = razão

4.14 Valores de Referência da Taxa de kerma no Ar

4.14.1 Valores da fonte de ^{137}Cs e ^{60}Co do irradiador OB85/1.

As Tabelas 5 e 6 mostram os valores da taxa de Kerma no ar do sistema irradiador OB85/1, os valores foram obtidos com o sistema de referência padrão para a distância de um metro da fonte de radiação^{*****}.

Tabela 5 – Taxa de kerma da fonte de ^{137}Cs do irradiador OB85/1.

Irradiador OB85/1 - Fonte de Cs-137		
Atenuadores	Taxa de kerma no ar (mGy/h)	Incerteza (mGy/h)
0	38,265	± 0,004
1	1,8678	± 0,0004
2	0,2344	± 0,0003
3	0,0182	± 0,0002

Tabela 6 – Taxa de kerma da fonte de ^{60}Co do irradiador OB85/1.

Irradiador OB85/1 - Fonte de Co-60		
Atenuadores	Taxa de kerma no ar (mGy/h)	Incerteza (mGy/h)
0	1,4466	± 0,0008
1	0,2322	± 0,0003
2	0,0737	± 0,0002
3	0,0170	± 0,0001

^{*****} Esses valores foram obtidos em 30/07/2010.

4.14.2 Valores da fonte de ^{137}Cs do irradiador Caesa-Gammatron.

A Tabela 7 mostra os valores da taxa de Kerma no ar do sistema irradiador Caesa-Gammatron, os valores foram obtidos com o sistema de referência padrão para a distância de um metro da fonte de radiação^{§§§§§§}.

Tabela 7 - Taxa de kerma da fonte de ^{137}Cs do irradiador Caesa-Gammatron.

Irradiador Caesa-Gammatron - Fonte de Cs-137		
Atenuadores	Taxa de kerma no ar (mGy/h)	Incerteza (mGy/h)
0	344,09	± 0,11
1	27,35	± 0,01

4.15 Avaliação da Dose Ocupacional

Para realizar a avaliação da dose ocupacional foram utilizados três dosímetros eletrônicos do tipo individual, marca Rados (RAD-60), conforme mostrado na Figura 73, sendo que um foi posicionado na sala de controle dos irradiadores sobre a mesa de operação para ser utilizado como o dosímetro de controle, os outros dois foram colocados sobre a mesa de posicionamento dos monitores de radiação, ficando alinhados com o feixe de radiação de cada irradiador, onde os valores de dose são os mais elevados dentro da sala de calibração. Foi escolhida uma distância de 220 cm do centro de cada irradiador, que é o centro do curso útil da mesa de posicionamento, que tem um curso total de 450 cm. Nas Figuras 74 e 75 são apresentados os esquemas mostrando os valores de equivalente de dose ambiente obtidos com todos os atenuadores abertos e também com todos os atenuadores fechados de ambos os irradiadores. Foi possível verificar que o valor de equivalente de dose ambiente encontrado, quando todos os atenuadores estão fechados é de aproximadamente 50% inferior àqueles encontrados com todos os atenuadores abertos. Esses sistemas foram ligados ao sistema de segurança da sala, assim sempre que alguém entrar na sala de calibração com radiação gama, todos os atenuadores serão

^{§§§§§§} Esses valores foram obtidos em 17/03/2012.

automaticamente fechados, mantendo os valores o mais baixo possível dentro da sala de calibração com radiação gama.

Figura 73 – Dosímetro pessoal da Rados (RAD-60).

Figura 74 - Diagrama da montagem dos dosímetros com todos os atenuadores abertos.

Figura 75 - Diagrama da montagem dos dosímetros com todos os atenuadores fechados.

Após verificar a redução dos valores de BG no interior da sala de calibração gama, foram realizadas algumas calibrações de monitores de radiação com o objetivo de verificar a redução do tempo de calibração e permanência do técnico ou pesquisador no interior da sala de calibração. Depois que todos esses itens foram verificados, foi possível chegar a uma redução no valor da dose ocupacional em cerca de 50%. As Tabelas 8 e 9 mostram duas planilhas com os detalhes de uma calibração realizada no sistema manual e outra após a automação do sistema em um monitor de radiação Victoreen 450, sendo possível perceber as vantagens obtidas, como redução do tempo de calibração desse modelo, de 50 minutos com o sistema manual para 30 minutos com o sistema automatizado, também houve uma imensa vantagem em relação ao técnico ou pesquisador entrar na sala de calibração, sendo que em uma calibração manual era necessário entrar na sala de calibração um total de 16 vezes e após a automação apenas duas vezes, outra vantagem foi quanto ao liga-desliga do irradiador OB85/1, diminuindo de 14 vezes para apenas duas vezes.

Tabela 8 – Planilha de calibração de monitor de radiação Victoreen 450, antes da automação.

Calibração Manual				
Etapas	Atenuadores	Distância (cm)	Ação do operador na sala de calibração	Irradiador OB85
1	3	100,0	posicionar monitor de radiação	
2	3	174,0	posicionar mesa e atenuadores	liga
3	3	110,0	posicionar mesa	desliga-liga
4	2	313,5	posicionar mesa	desliga-liga
5	2	198,0	posicionar mesa	desliga-liga
6	2	125,5	posicionar mesa	desliga-liga
7	1	277,0	posicionar mesa e atenuadores	desliga-liga
8	1	175,0	posicionar mesa	desliga-liga
9	1	111,0	posicionar mesa	desliga-liga
10	0	324,0	posicionar mesa e atenuadores	desliga-liga
11	0	205,0	posicionar mesa	desliga-liga
12	0	130,0	posicionar mesa	desliga-liga
13	0	102,5	posicionar mesa	desliga-liga
14	0	229,5	posicionar mesa	desliga-liga
15	3	229,5	posicionar mesa e atenuadores	desliga
16	3	229,5	retirar monitor de radiação	

*tempo total de calibração: 50 minutos

Tabela 9 – Planilha de calibração de monitor de radiação Victoreen 450, após automação.

Calibração Automatizada				
Etapas	Atenuadores	Distância (cm)	Ação do operador na sala de calibração	Irradiador OB85
1	3	100,0	posicionar monitor de radiação	
2	3	174,2	acionamento remoto	liga
3	3	110,2	acionamento remoto	
4	2	313,4	acionamento remoto	
5	2	198,2	acionamento remoto	
6	2	125,4	acionamento remoto	
7	1	277,0	acionamento remoto	
8	1	175,2	acionamento remoto	
9	1	110,8	acionamento remoto	
10	0	324,2	acionamento remoto	
11	0	205,0	acionamento remoto	
12	0	129,7	acionamento remoto	
13	0	102,4	acionamento remoto	
14	0	229,4	acionamento remoto	
15	3	229,4	acionamento remoto	desliga
16	3	229,4	retirar monitor de radiação	

*tempo total de calibração: 30 minutos

4.16 Instalação do IHM com CLP incorporada

A instalação do IHM (Interface Homem-Máquina) com CLP (Controlador Lógico Programável) foi a parte final da automação, possibilitando o controle de todo o sistema automatizado de calibração, através desse pequeno equipamento.

O IHM com CLP incorporado foi instalado no painel de comando que estava em uso (controlado apenas os atenuadores), ampliando os controles do

sistema, para que seja possível controlar o movimento da mesa de posicionamento, que é acionada por um motor de passo acoplado a um redutor.

Foi desenvolvido em conjunto com a empresa BCM Automação, um software para controle e aquisição de dados de ambos os sistemas irradiadores. Na Figura 76 é mostrado o painel do IHM e o mini monitor de 5", no qual são inseridas as opções desejadas, como quantidade de atenuadores e posição da mesa de posicionamento, esse equipamento permite aquisição das informações sobre posição dos atenuadores, através dos sensores magnéticos instalados nos cilindros pneumáticos do dispositivo atenuador do irradiador OB85/1 e do switch de fim de curso instalado no dispositivo atenuador do Caesa-Gammatron, possibilitando ao operador confirmar se os atenuadores estão na posição solicitada, ainda na Figura 76 é possível visualizar o painel de comando e o mini monitor em uma mesma figura.

(a)

(b)

(c)

Figura 76 – (a) Painel de comando com IHM; (b) Mini monitor de LCD para visualizar a posição da mesa de posicionamento e (c) Visão Geral de ambos.

5 CONCLUSÕES

Com a automação do sistema de posicionamento, houve uma diminuição do tempo de permanência do técnico/operador na sala de calibração, devido ao sistema poder ser operado remotamente a partir da sala de controle, além dos atenuadores estarem sempre fechados, pois estão ligados ao sistema de segurança, que fecham todos os atenuadores sempre que alguém entrar na sala de calibração, contribuindo para uma diminuição da dose ocupacional. Também houve uma melhora na qualidade das calibrações, devido sua maior reprodutibilidade e menor interferência humana no processo.

Com a implantação do sistema irradiador Caesa-Gammatron, o laboratório teve um ganho no intervalo de calibrações e testes, porque esse possui uma fonte de ^{137}Cs com uma atividade que supera em muito o sistema irradiador OB85/1, podendo ser utilizado nas calibrações de instrumentos como o teletector, além de diminuir o tempo das irradiações com objetivo de pesquisa, possibilitando um maior número de irradiações.

Após a automação do processo de calibração foi possível verificar através de medições com o dosímetro pessoal da RADOS (RAD-60), uma redução da dose ocupacional da ordem de 50%, durante a realização das calibrações, devido à redução no BG com os atenuadores fechados e o menor tempo de permanência na sala de calibração gama.

6 CONSIDERAÇÕES

Com essas alterações realizadas no laboratório de calibrações do IPEN, houve um ganho de qualidade nas calibrações e testes diversos, assim como uma diminuição da dose ocupacional dos envolvidos nas tarefas de calibração e pesquisas.

Para futuros trabalhos:

1. Um estudo de todas as componentes das incertezas do novo arranjo da sala de calibração gama.
2. Uma avaliação mais completa da diminuição da dose ocupacional.

7 ANEXOS

7.1 Distância Fonte do Irradiador ao Primeiro Ponto de Dosimetria

7.2 Rotina do Programa em Linguagem Descritiva BCM

```
;-----  
;   PROGRAMA DO IHM COM CLP  
;-----  
  
;   TECLAS DE FUNÇÃO  
;   F1 - MANDA PARA POSIÇÃO DESEJADA  
;   F2 - SELEÇÃO DAS OPÇÕES - NOVA POSIÇÃO  
;   F3 - SELECIONA IRRADIADOR OB85/1  
;   F4 - SELECIONA IRRADIADOR CAESA  
  
;   ENTRADAS DIGITAIS  
;   1 - SM1 - SENSOR MAGNÉTICO 1 - CILINDRO 1  
;   2 - SM2 - SENSOR MAGNÉTICO 2 - CILINDRO 1  
;   3 - SM3 - SENSOR MAGNÉTICO 3 - CILINDRO 2  
;   4 - SM4 - SENSOR MAGNÉTICO 4 - CILINDRO 2  
;   5 - SM5 - SENSOR MAGNÉTICO 5 - CILINDRO 3  
;   6 - SM6 - SENSOR MAGNÉTICO 6 - CILINDRO 3  
;   7 - SMA - SENSOR MOTOR ABERTO CAESA  
;   8 - SMF - SENSOR MOTOR FECHADO CAESA  
;   9 - SFC - SENSOR FIM DE CURSO  
;   10 - SPE - SENSOR PORTA ENTRADA  
  
;   SAÍDAS DIGITAIS  
;   1 - SOLENÓIDE 1 - CILINDRO 1  
;   2 - SOLENÓIDE 2 - CILINDRO 1  
;   3 - SOLENÓIDE 3 - CILINDRO 2  
;   4 - SOLENÓIDE 4 - CILINDRO 2  
;   5 - SOLENÓIDE 5 - CILINDRO 3  
;   6 - SOLENÓIDE 6 - CILINDRO 3  
;   7 - ABRE MOTOR DO ATENUADOR CAESA  
;   8 - FECHA MOTOR DO ATENUADOR CAESA  
;   9 - LUZ VERMELHA DE FALHA  
  
.....  
  
CLP=BCM3011 (ESD=1)  
  
INTERFACE2(9600)=1 (PROTOCOLO=BCM2)  
  
DISPLAY=DPA20  
  
DIM PORTA(0)           ; PORTA SERIAL A UTILIZAR  
DIM VELOC(0)           ; VELOCIDADE DE COMUNICACAO  
DIM NBITS(0)           ; NUMERO DE BITS DE DADOS  
DIM NSTOP(0)           ; NUMERO DE STOP BITS  
DIM PARID(0)           ; PARIDADE  
DIM CTRTS(0)           ; CONTROLE DO RTS  
DIM TERTS(0)           ; TEMPO ATIVACAO RTS E ENVIO DADOS
```

```

DIM CHCTS(0)          ; DEVE CONFERIR CTS?
DIM TOUT(0)           ; TIMEOUT RESPOSTA
DIM TFIM(0)           ; tempo final mensagem
DIM STAT(0)           ; STATUS DA COMUNICACAO
DIM BUFTX(255)        ; BUFFER DE TRANSMISSAO
DIM NUMTX(0)          ; NUMERO DE BYTES A TX
DIM BUFRX(255)        ; BUFFER DE RECEPCAO
DIM NUMRX(0)          ; NUMERO DE BYTES RECEBIDOS
DIM NTORX(0)          ; numero de bytes a receber
DIM RESV(9)           ; RESERVADO PARA USO DA ROTINA

```

```

DIM BCDDE(6)          ;Matriz para conversão decimal/BCD

```

```

;;;;;;;;;;;;;;

```

```

MALHA 0:

```

```

ESTADO 0:              ;Tela de apresentação

```

```

MOSTRA T(1,7)"LCI - IPEN"

```

```

MOSTRA (2,3)"LABORATORIO GAMA"

```

```

FACA VELMO=1 E ESCAL=160

```

```

SE SFC=1 ENTAO 3

```

```

SE ATRASO=50 ENTAO 3

```

```

ESTADO 2:

```

```

;Digita posição e escolhe irradiador

```

```

MOSTRA T(1,1)"POSICAO:",POSC "mm"

```

```

MOSTRA (1,16) POSR

```

```

MOSTRA (2,1)"F3 = OB85 F4 = CAESA"

```

```

FACA POSR=POSC

```

```

SE TF3=1 ENTAO 50

```

```

SE TF4=1 ENTAO 51

```

```

ESTADO 3:

```

```

;Pára o motor de passo

```

```

FACA BUFTX(0)=83 E BUFTX(1)=13 E NUMTX(0)=2 E STAT=1

```

```

RESET POSR

```

```

SE POSR=0 ENTAO 2

```

```

;-----

```

```

ESTADO 50:

```

```

;Verifica posição dos do OB85

```

```

DESL 9

```

```

SE SM1=0 E SM2=1 E SM3=0 E SM4=1 E SM5=0 E SM6=1 ENTAO 42

```

```

SE SM1=1 E SM2=0 E SM3=0 E SM4=1 E SM5=0 E SM6=1 ENTAO 43

```

```

SE SM1=1 E SM2=0 E SM3=1 E SM4=0 E SM5=0 E SM6=1 ENTAO 44

```

```

SE SM1=1 E SM2=0 E SM3=1 E SM4=0 E SM5=1 E SM6=0 ENTAO 45

```

```

ESTADO 42:

```

```

MOSTRA T(1,2)"OB85 - SEM "

```

```

MOSTRA (2,5)"NR DE FILTROS"

```

```

SE TECLA=1 ENTAO 5

```

```

SE TECLA=2 ENTAO 6

```

```

SE TECLA=3 ENTAO 7

```

SE TF4=1 ENTAO 51
SE TF2=1 ENTAO 2

ESTADO 43:
MOSTRA T(1,2)"OB85 - UM FILTRO"
MOSTRA (2,5)"NR DE FILTROS"
SE TECLA=0 ENTAO 4
SE TECLA=2 ENTAO 6
SE TECLA=3 ENTAO 7
SE TF4=1 ENTAO 51
SE TF2=1 ENTAO 2

ESTADO 44:
MOSTRA T(1,2)"OB85 - DOIS FILTROS"
MOSTRA (2,5)"NR DE FILTROS"
SE TECLA=0 ENTAO 4
SE TECLA=1 ENTAO 5
SE TECLA=3 ENTAO 7
SE TF4=1 ENTAO 51
SE TF2=1 ENTAO 2

ESTADO 45:
MOSTRA T(1,2)"OB85 - TRES FILTROS"
MOSTRA (2,5)"NR DE FILTROS"
SE TECLA=0 ENTAO 4
SE TECLA=1 ENTAO 5
SE TECLA=2 ENTAO 6
SE TF4=1 ENTAO 51
SE TF2=1 ENTAO 2

ESTADO 51: ;Verifica posição dos filtros do CAESA
DESL 9
SE SMA=1 E SMF=0 ENTAO 46
SE SMA=0 E SMF=1 ENTAO 47

ESTADO 46:
MOSTRA T(1,2)"CAESA - SEM FILTRO"
MOSTRA (2,1)"TECLA (5) UM FILTRO"
SE TECLA=5 ENTAO 9
SE TF3=1 ENTAO 50
SE TF2=1 ENTAO 2

ESTADO 47:
MOSTRA T(1,2)"CAESA - UM FILTRO"
MOSTRA (2,1)"TECLA (4) SEM FILTRO"
SE TECLA=4 ENTAO 8
SE TF3=1 ENTAO 50
SE TF2=1 ENTAO 2

;-----

ESTADO 4: ;Aciona filtros OB85 (Sem filtros)

LIGA 2,4,6
SE ATRASO=20 ENTAO 101

ESTADO 101:
DESL 2,4,6
VA PARA 90

ESTADO 90:
SE SM1=0 E SM2=1 E SM3=0 E SM4=1 E SM5=0 E SM6=1 ENTAO 31
SE ATRASO=40 ENTAO 70

ESTADO 5: ;Aciona filtros OB85 (Um filtro)
LIGA 1,4,6
SE ATRASO=20 ENTAO 102

ESTADO 102:
DESL 1,4,6
VA PARA 91

ESTADO 91:
SE SM1=1 E SM2=0 E SM3=0 E SM4=1 E SM5=0 E SM6=1 ENTAO 32
SE ATRASO=40 ENTAO 70

ESTADO 6: ;Aciona filtros OB85 (Dois filtros)
LIGA 1,3,6
SE ATRASO=20 ENTAO 103

ESTADO 103:
DESL 1,3,6
VA PARA 92

ESTADO 92:
SE SM1=1 E SM2=0 E SM3=1 E SM4=0 E SM5=0 E SM6=1 ENTAO 33
SE ATRASO=40 ENTAO 70

ESTADO 7: ;Aciona filtros OB85 (Três filtros)
LIGA 1,3,5
SE ATRASO=20 ENTAO 104

ESTADO 104:
DESL 1,3,5
VA PARA 93

ESTADO 93:
SE SM1=1 E SM2=0 E SM3=1 E SM4=0 E SM5=1 E SM6=0 ENTAO 34
SE ATRASO=40 ENTAO 70

ESTADO 8: ;Aciona filtros CAESA (Sem filtros)
LIGA 7
SE SMA=1 E SMF=0 ENTAO 105
SE ATRASO=50 ENTAO 71

ESTADO 105:

DESL 7

VA PARA 94

ESTADO 94:

SE SMA=1 E SMF=0 ENTAO 35

SE SMA=0 E SMF=1 ENTAO 36

SE ATRASO=40 ENTAO 71

ESTADO 9:

;Aciona filtros CAESA (Um filtro)

LIGA 8

SE SMA=0 E SMF=1 ENTAO 106

SE ATRASO=50 ENTAO 71

ESTADO 106:

DESL 8

VA PARA 95

ESTADO 95:

SE SMA=1 E SMF=0 ENTAO 35

SE SMA=0 E SMF=1 ENTAO 36

SE ATRASO=40 ENTAO 71

ESTADO 70

MOSTRA T(1,4)"ATENCAO OB85"

MOSTRA (2,2)"VERIFICAR FILTROS"

LIGA 9

SE ATRASO=100 ENTAO 50

ESTADO 71

MOSTRA T(1,4)"ATENCAO CAESA"

MOSTRA (2,2)"VERIFICAR FILTRO"

LIGA 9

DESL 7

DESL 8

SE ATRASO=100 ENTAO 51

;-----

ESTADO 31:

;Mostra mensagem OB85 (Sem filtros)

MOSTRA T(1,3)"IRRADIADOR OB85"

MOSTRA (2,6)"SEM FILTROS"

SE TECLA=1 ENTAO 5

SE TECLA=2 ENTAO 6

SE TECLA=3 ENTAO 7

SE TF3=1 ENTAO 50

SE TF4=1 ENTAO 51

SE TF2=1 ENTAO 2

ESTADO 32:

;Mostra mensagem OB85 (Um filtro)

MOSTRA T(1,3)"IRRADIADOR OB85"

MOSTRA (2,7)"UM FILTRO"
SE TECLA=0 ENTAO 4
SE TECLA=2 ENTAO 6
SE TECLA=3 ENTAO 7
SE TF3=1 ENTAO 50
SE TF4=1 ENTAO 51
SE TF2=1 ENTAO 2

ESTADO 33: ;Mostra mensagem OB85 (Dois filtros)
MOSTRA T(1,3)"IRRADIADOR OB85"
MOSTRA (2,5)"DOIS FILTROS"
SE TECLA=0 ENTAO 4
SE TECLA=1 ENTAO 5
SE TECLA=3 ENTAO 7
SE TF3=1 ENTAO 50
SE TF4=1 ENTAO 51
SE TF2=1 ENTAO 2

ESTADO 34: ;Mostra mensagem OB85 (Três filtros)
MOSTRA T(1,3)"IRRADIADOR OB85"
MOSTRA (2,5)"TRES FILTROS"
SE TECLA=0 ENTAO 4
SE TECLA=1 ENTAO 5
SE TECLA=2 ENTAO 6
SE TF3=1 ENTAO 50
SE TF4=1 ENTAO 51
SE TF2=1 ENTAO 2

ESTADO 35: ;Mostra mensagem CAESA (Sem filtros)
DESL 7
MOSTRA T(1,3)"IRRADIADOR CAESA"
MOSTRA (2,6)"SEM FILTRO"
SE TECLA=5 ENTAO 9
SE TF3=1 ENTAO 50
SE TF4=1 ENTAO 51
SE TF2=1 ENTAO 2

ESTADO 36: ;Mostra mensagem CAESA (Um filtro)
DESL 8
MOSTRA T(1,3)"IRRADIADOR CAESA"
MOSTRA (2,7)"UM FILTRO"
SE TECLA=4 ENTAO 8
SE TF3=1 ENTAO 50
SE TF4=1 ENTAO 51
SE TF2=1 ENTAO 2

.....
.....

MALHA 1: ;Composição dos comandos do motor de passo
ESTADO 0:
RESET SENTI,STAT(0) ;Sentido de giro: 0-CCW, 1-CW
FACA ENBUF=&BUFTX(0)

SE TF1=1 ENTAO 20

ESTADO 10: ;Preseta o modo continuo (sem parar)
FACA BUFTX(0)=77 E BUFTX(1)=67 E BUFTX(2)=13 E NUMTX(0)=3 E STAT=1
SE STAT(0)>2 ENTAO 11 ;Manda para o drive

ESTADO 11: ;Configura velocidade do motor
FACA VALOX=VELMO E VALOY=1 E ENBUF=&BUFTX(0)
VA PARA 12

ESTADO 12: ;Manda para o drive
FACA ALGA=BUFTX(0)+1 E BUFTX(0)=86 E BUFTX(ALGA)=13 E NUMTX(0)=ALGA+1 E STAT=1
SE STAT(0)>2 ENTAO 13

ESTADO 13: ;Configura aceleração (fixa em 1!)
FACA VALOX=1 E VALOY=1 E ENBUF=&BUFTX(0)
VA PARA 14

ESTADO 14: ;Manda para o drive
FACA ALGA=BUFTX(0)+1 E BUFTX(0)=65 E BUFTX(ALGA)=13 E NUMTX(0)=ALGA+1 E STAT=1
SE STAT(0)>2 ENTAO 15

ESTADO 15: ;Preseta o sentido CW
FACA BUFTX(0)=72 E BUFTX(1)=43 E BUFTX(2)=13 E NUMTX(0)=3 E STAT=1
SE STAT(0)>2 ENTAO 16 ;Manda para o drive

ESTADO 16: ;Dispara o movimento.
FACA BUFTX(0)=71 E BUFTX(1)=13 E NUMTX(0)=2 E STAT=1
SE ATRASO=10 E TF1=0 ENTAO 0

;-----

ESTADO 20: ;Preseta o modo normal (com parada em distância programada)
FACA BUFTX(0)=77 E BUFTX(1)=78 E BUFTX(2)=13 E NUMTX(0)=3 E STAT=1
SE STAT(0)>2 ENTAO 21 ;Manda para o drive

ESTADO 21: ;Configura velocidade do motor
FACA VALOX=VELMO E VALOY=1 E ENBUF=&BUFTX(0)
VA PARA 22

ESTADO 22: ;Manda para o drive
FACA ALGA=BUFTX(0)+1 E BUFTX(0)=86 E BUFTX(ALGA)=13 E NUMTX(0)=ALGA+1 E STAT=1
SE STAT(0)>2 ENTAO 23

ESTADO 23: ;Configura aceleração (fixa em 1!) e manda para o drive
FACA BUFTX(0)=65 E BUFTX(1)=49 E BUFTX(2)=13 E NUMTX(0)=3 E STAT=1
SE STAT(0)>2 ENTAO 24

ESTADO 24:
SE POSC>POSR ENTAO 25 ;MOVIMENTO CW
SE POSC<POSR ENTAO 125 ;MOVIMENTO CCW

ESTADO 25: ;CALCULA POSIÇÃO
FACA VALOX=POSC-POSR E VALOY=ESCAL E ENBUF=&BUFTX(0)
VA PARA 26

ESTADO 26: ;Manda para o drive
FACA ALGA=BUFTX(0)+1 E BUFTX(0)=68 E BUFTX(ALGA)=13 E NUMTX(0)=ALGA+1 E STAT=1
SE STAT(0)>2 ENTAO 27

ESTADO 27: ;Preseta o sentido CW
FACA BUFTX(0)=72 E BUFTX(1)=43 E BUFTX(2)=13 E NUMTX(0)=3 E STAT=1
SE STAT(0)>2 ENTAO 28 ;Manda para o drive

;-----

ESTADO 125: ;CALCULA POSIÇÃO
FACA VALOX=POSR-POSC E VALOY=ESCAL E ENBUF=&BUFTX(0)
VA PARA 126

ESTADO 126: ;Manda para o drive
FACA ALGA=BUFTX(0)+1 E BUFTX(0)=68 E BUFTX(ALGA)=13 E NUMTX(0)=ALGA+1 E STAT=1
SE STAT(0)>2 ENTAO 127

ESTADO 127: ;Preseta o sentido CCW
FACA BUFTX(0)=72 E BUFTX(1)=45 E BUFTX(2)=13 E NUMTX(0)=3 E STAT=1
SE STAT(0)>2 ENTAO 28 ;Manda para o drive

ESTADO 28:
FACA* POSR=POSC ;Atualiza a posição real com a posição movida.
FACA BUFTX(0)=71 E BUFTX(1)=13 E NUMTX(0)=2 E STAT=1 ;Dispara o movimento.
SE ATRASO=10 E TF1=0 ENTAO 0

;-----

ESTADO 30: ;Pára o movimento.
FACA BUFTX(0)=83 E BUFTX(1)=13 E NUMTX(0)=2 E STAT=1
RESET POSR

;-----

ESTADO 40: ;Reset geral (Z)
FACA BUFTX(0)=90 E BUFTX(1)=13 E NUMTX(0)=2 E STAT(0)=1
RESET POSR
SE ATRASO=20 ENTAO 41

ESTADO 41: ;Parada para limpar triggers(S)
FACA BUFTX(0)=83 E BUFTX(1)=13 E NUMTX(0)=2 E STAT(0)=1

.....

MALHA 2: ;Configurações básicas para a comunicação com o drive
ESTADO 0:
FACA PORTA=1 E VELOC=3 E NBITS=8 E NSTOP=1 E PARID=0 E CHCTS=0 E -

TERTS=0 E TOUT=50 E TFIM=50 E NTORX=0 E E63=1

.....

MALHA 3:

ESTADO 0:

SE SPE=1 ENTAO 60

ESTADO 60:

SE SM1=0 LIGA 2

SE SM3=0 LIGA 4

SE SM5=0 LIGA 6

VA PARA 61

ESTADO 61:

SE ATRASO=20 ENTAO 62

ESTADO 62:

DESL 2,4,6

SE SM1=1 E SM2=0 E SM3=1 E SM4=0 E SM5=1 E SM6=0 E SMA=0 E SMF=1 ENTAO 63

ESTADO 63:

MOSTRA T(1,3)"FILTROS FECHADOS"

MOSTRA (2,4)"TECLAS F2 F3 F4"

SE TF2=1 OU TF3=1 OU TF4=1 ENTAO 0

.....

MALHA 4:

ESTADO 0:

SE SPE=1 ENTAO 63

SE SMA=0 E SMF=1 DESL 8

ESTADO 63:

SE SMA=1 E SMF=0 LIGA 8

VA PARA 64

ESTADO 64:

VA PARA 0

.....

MALHA 5:

ESTADO 0:

SE POSC>4500 ENTAO 80

SE POSR>4500 ENTAO 81

SE POSC<1000 ENTAO 82

SE POSR<1000 ENTAO 83

ESTADO 80:

FACA POSC=4500
VA PARA 0

ESTADO 81:
FACA POSR=4500
VA PARA 0

ESTADO 82:
FACA POSC=1000
VA PARA 0

ESTADO 83:
FACA POSR=1000
VA PARA 0

;------

ROTINA(9000)=(MULTIASC.HEX)
ROTINA=(FP3011_15.HEX)
ROTINA=C9

.....
////////////////////////////////////

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. ***Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica***. Rio de Janeiro, CNEN, 2005. (CNEN-NN-3.01).
2. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. ***Serviços de radioproteção***, Rio de Janeiro, CNEN, 1998. (CNEN-NE-3.02).
3. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. ***Transporte de Materiais Radioativos***, Rio de Janeiro, CNEN, 1988. (CNEN-NE-5.01).
4. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. ***Gerência de Rejeitos Radioativos em Instalações Radiativas***, Rio de Janeiro, CNEN, 1985. (CNEN-NE-6.05).
5. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. ***Requisitos para o Registro de Pessoas Físicas para o Preparo, Uso e Manuseio Fontes Radioativas***, Rio de Janeiro, CNEN, 1998. (CNEN-NN-6.01).
6. INTERNATIONAL ELECTROTHECNICAL COMMISSION. ***Portable X and gamma radiation exposure rate meters and monitors for use in radiological protection***. Geneva, 1972 (IEC 395).
7. SILVA JÚNIOR, I. A., RAMOS, M. A. G., ET AL. ***Adequação e ajuste dos elementos eletromecânicos de um gerador de radiação X para automação do sistema de filtração adicional***, RADIO 2011. Anais. Recife, 2011.
8. SANTOS, G.P., POTIENS, M. P. A., VIVOLO, V. ***Uncertainties evaluation of an irradiator system dosimetry***. In: RADIO 2005, Rio de Janeiro. RADIO2005 (CD-ROM). ABENDE, 2005.

9. POTIENS, M. P. A., SANTOS, G. P. ***Evaluation of uncertainties in the calibration of radiation survey meters***. In: Second European IRPA Congress on Radiation Protection, 2006, Paris. Proceeding of Full Papers - CD-ROM, 2006.
10. BETTI, F. ***Desenvolvimento e Implantação de um Programa de Controle e Aquisição de Dados na Calibração de Instrumentos em Radiodiagnóstico***. Dissertação (mestrado), IPEN USP (2007).
11. VIVOLO, V. ***Aplicação de Metodologia de Testes de Desempenho para Monitores Portáteis de Radiação***, Dissertação (mestrado), IPEN USP (2000).
12. TASIC, T., BOJKOVSKI, J., PUSNIK, I., DRNOVSEK, J. ***Reliability design of a calibration laboratory automation software***. In Proceedings of: Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest, 2000, Sydney, Australia. (2002) 600-601.
13. YEUNG, K., HUANG, J. ***Development of a remote-access laboratory: a dc motor control experiment***. Computers in Industry 52 (2003) 305–311.
14. BEDOGNI, R. AND MONTEVENTI, F. – ***Development of automatic systems for the ionising radiation metrology at the ENEA-IRP secondary standard laboratory - Radiation Protection Dosimetry***. 2005 115 (1-4):612-615.
15. FERRATER-SIMÓN, C., MOLAS-BALADA, L. GOMIS-BELLMUNT, O. ***A Remote Laboratory Platform for Electrical Drive Control Using Programmable Logic Controllers***. IEEE TRANSACTIONS ON EDUCATION, VOL. 52, NO. 3, AUGUST 2009.
16. GARCÍA-HERNÁNDEZ, J.M. ET AL. ***An Automatic Calibration System for Portable Radiation Monitors***. IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, V.. 56, No. 3,p.1537-1543 (2009).

17. LJUNGBLAD, S., JOSEFSON L. E., HOLMSTEN M. **Method for Effective Calibration of Temperature Loggers with Automated Data Sampling and Evaluation.** Int J Thermophys v. 32, p. 2495–2503 (2011).
18. KNYZIAK, AB. **Automation of the measurement system for calibration in the field of gamma radiation.** Przegląd Elektrotechniczny, v. 87, p. 253-259 (2011).
19. LABORATÓRIO NACIONAL DE METROLOGIA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES. **Requisitos técnicos para certificação de laboratório de calibração de instrumentos de medição para radiação ionizante usados em radioproteção.** Instituto de Radioproteção e Dosimetria/Comissão Nacional de Energia Nuclear. RT-LCI-001/2011. Junho de 2011.
20. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments, IAEA, SRS 16.** Vienna, 2000.
21. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy, IAEA, TRS No. 398.** Vienna, 2000.
22. INTERNATIONAL ELECTROTECHICAL COMMISSION. **IEC 61267: Medical diagnostic x-ray equipment – Radiation conditions for use in the determination of characteristics.** Geneva, 2005.
23. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Dosimetry in Diagnostic Radiology: An International Code of Practice, IAEA.** Vienna, TRS 457, 2007.
24. NORMA BRASILEIRA ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005. **Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração.** Publicada em 25 de setembro de 2006.
25. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Requisitos de radioproteção e segurança para serviços de medicina nuclear.** Abril 1996. (CNEN-NN-3.05).

26. ARANHA, F. ***UFRJ cria primeiro curso de graduação em engenharia nuclear do país***. REVISTA BRASIL NUCLEAR, Ano 15, NÚMERO 36, 30 de Outubro de 2010, Disponível em: < <http://www.aben.com.br/publicacoes/brasil-nuclear/00000000013/ufrj-cria-primeiro-curso-de-graduao-em-engenharia-nuclear-do-pas/00000000058>>. Acesso em: 01/02/2012.
27. ARANHA, F., DANTAS, V. ***Energia nuclear vive novo ciclo de crescimento***. REVISTA BRASIL NUCLEAR, Ano 15, NÚMERO 37, 27 de Dezembro de 2010, Disponível em: < <http://www.aben.com.br/publicacoes/brasil-nuclear/00000000024/energia-nuclear-vive-novo-ciclo-de-crescimento/00000000074>>. Acesso em: 01/02/2012.
28. REVISTA BRASIL NUCLEAR. ***Setor nuclear brasileiro deve movimentar R\$ 52 bilhões até 2030***. Ano 15, NÚMERO 37, 27 de Dezembro de 2010. Disponível em: < <http://www.aben.com.br/publicacoes/brasil-nuclear/00000000024/setor-nuclear-brasileiro-deve-movimentar-r-52-bilhes-at-2030/00000000083>>. Acesso em: 01/02/2012.
29. ICRP, 1991. ***Recommendations of the International Commission on Radiological Protection***. ICRP Publication 60.
30. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. ***Protection and safety in medicine***. Publication 73, Pergamon Press, Oxford and New York, 1996.
31. ICRP, 2007. ***The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection***. ICRP Publication 103.
32. MINISTÉRIO DA SAÚDE. ***Diretrizes básicas de proteção radiológica em radiodiagnóstico médico e odontológico***. Portaria Federal 453 - Brasília: Diário Oficial da União. 02 Jun., 1998.

33. INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. **Noções Básicas de Proteção Radiológica**. São Paulo: 2002.
34. SCAFF, L. A. M. **Radiologia – Bases Físicas para Técnicos**. Editora Projeto Saber. São Paulo. 2004.
35. CEMBER, H. **Introduction to Health Physics**. Third edition, USA: Pergamon Press, p. 418-462, 1996.
36. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. **Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation**. ICRU Report 60. Bethesda, MD 1998.
37. OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. **Física das radiações**. 1ª edição, Ed. Oficina de Textos Brasil, São Paulo, 2010.
38. BITELLI, T. **Dosimetria e Higiene das Radiações**. 1ª Edição. Editora do Grêmio Politécnico. São Paulo. 1982.
39. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy**; ISO 4037-1, 1996.
40. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2003.
41. GONÇALVES, A. A. JR; SOUSA, A. R. **Metrologia – Científica e Industrial**. Editora Manole. 2008.
42. CRUZ, A.J.R.S. **Apostila de Automação Industrial**. Rio de Janeiro, 2008.

43. **Los sistemas de control automático.** Disponível em: <
http://www.kalipedia.com/tecnologia/tema/robotica/graficos-regulador-centrifugo-watt.html?x1=20070821klpinginf_30.Ges&x=20070821klpinginf_81.Kes>. Acesso em: 08/03/2012.
44. PARKER TRAINING. **Tecnologia Pneumática Industrial.** São Paulo: [s.n.], 2000. (Apostila M1001 BR).
45. **Motores de Passo.** Disponível em: <<http://www.ppgel.ufsj.edu.br/uaisocce r/downloads/1272062510.pdf>>. Acesso em 06/05/2012.
46. CONTROLADOR PROGRAMÁVEL GP3000. **Manual de Instalação e Características Técnicas.** 2010-2 (Apostila Referência: 31940101-5).
47. CONTROLADORES PROGRAMÁVEIS. **Linguagem Descritiva BCM.** 2010-2 (Apostila Referência: 31940092-8).
48. LONGO, F.; BEZERRA, W. R. **Engenharia de Requisitos.** Disponível em: <<http://www.inf.ufsc.br/~wesley/engSoft/>>. Acesso em: 20/03/2012.
49. FLUIDSIM 4. Versão 4.2h/1.5 [Programa de computador]. Festo Didactic GmbH & Co KG 1996-2007.
50. IAEA, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Calibration of radiation protection monitoring instruments.** IAEA, Vienna, 2000 (IAEA SRS-16).