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

**ESTUDO DO ENVELHECIMENTO DE UM TUBO DE RAIOS X POR MÉTODOS
NÃO INVASIVOS**

MÁRCIO BOTTARO

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

Orientador:
Dr. Maurício Moralles

SÃO PAULO

2007

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

**ESTUDO DO ENVELHECIMENTO DE UM TUBO DE RAIOS X POR MÉTODOS
NÃO INVASIVOS**

MÁRCIO BOTTARO

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

Orientador:
Dr. Maurício Morales

SÃO PAULO

2007

DEDICATÓRIA

A minha esposa Ana Paula e meus filhos Bianca e Francisco,
pelo amor, alegria, paciência e compreensão.

A meus pais Irineu e Márcia pelo apoio incondicional de toda uma vida.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Maurício Morales, pela amizade, orientação, confiança e apoio em todas as etapas do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Dr. Ludwig Büermann do PTB, pela motivação, constantes esclarecimentos técnicos e inspiração deste tema.

Ao físico nordestino reacionário Clayton Augusto Benevides, pelo apoio e incentivo aos estudos de física e matemática durante nosso treinamento na Alemanha.

Ao amigo Reinulf do PTB, pelos diversos esclarecimentos relacionados aos divisores de alta tensão e formas de onda gentilmente cedidas para os testes das rotinas de cálculo do PPV.

Ao Dr. Hilgers do PTB, pela colaboração nas dúvidas relacionadas a correção da resposta em frequência dos divisores de AT.

Ao Dr. Leonardo Menezes da UFPE pelo apoio e incentivo aos estudos de física e matemática.

À Dra. Denise Yanikian Nersissian, que participou diretamente em todas as etapas deste trabalho.

Ao grande “físico da computação” Helio Murata, por toda orientação com relação a condução dos programas desenvolvidos neste trabalho.

Ao grande amigo Vlamir Viana, pelo apoio a mais esta iniciativa e por sua participação direta no contato com vários fabricantes de tubos de raios X durante este trabalho.

Ao mais famoso e exótico técnico do IEE, Edson Pereira Barbosa, por seu apoio e cooperação nas atividades de laboratório e manutenções decorrentes deste trabalho e pelos tubos de raios X doados.

À Tânia Correia Furquim, pelas valiosas informações da prática de controle de qualidade.

Ao Gianni Leoni Donatiello, pelas inúmeras consultas técnicas que esclareceram muitos detalhes no decorrer deste trabalho.

Ao Daniel “Larusso” pela amizade e grande cooperação no decorrer do trabalho.

À Fernanda Cristina Salvador pelo companheirismo e trocas de informações quanto às CSR's.

Ao João dos Santos Justo Pires pela amizade durante esse trabalho e pelo companheirismo e colaborações relacionadas ao PPV.

Ao Dr. Paulo Roberto Costa pelo incentivo e pelas informações relacionadas às cargas de trabalho.

Ao Engº Edmur Canzian da CNZ Engenharia e Informática LTDA pela colaboração no desenvolvimento do sistema de aplicação de cargas.

Ao Dr. Marco A. G. Pereira pelos vários questionamentos que engrandeceram esse trabalho.

Aos colegas da Siemens do Brasil Waldir e Eduardo, pela doação de tubos e esclarecimento de dúvidas técnicas.

Ao companheiro do IPEN, Engº Francisco Sprenger, pela amizade e troca de informações.

Ao Prof. Dr. Silvio Herdade pela colaboração com sua grande e inestimável experiência.

Ao colega Heber “SENAI”, por sua colaboração para as fotos do sistema espectrométrico.

Ao Prof. Dr. Ricardo Terini pelo companheirismo e troca de informações.

A equipe da CPG do IPEN pelo suporte sempre com grande cordialidade.

Aos funcionários do STAMH que de forma direta ou indireta colaboraram com este trabalho.

ESTUDO DO ENVELHECIMENTO DE UM TUBO DE RAIOS X POR MÉTODOS NÃO INVASIVOS

MÁRCIO BOTTARO

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi a avaliação do envelhecimento de um tubo de raios X com anodo de tungstênio utilizado para aplicações de radiodiagnóstico, por meio de aplicação de cargas de acordo com distribuições de cargas de trabalho da realidade brasileira e avaliações periódicas de grandezas associadas à qualidade de radiação produzida. Para o propósito deste trabalho, um sistema clínico com retificação monofásica de onda completa foi utilizado. Para avaliação em longo prazo das características do tubo de raios X relacionadas à carga de trabalho foi necessária a medição de parâmetros que pudessem representar de forma quantitativa o envelhecimento do tubo de raios X, estando estes relacionados principalmente ao desgaste do anodo. Esta medição indireta do envelhecimento do tubo levou a escolha de quatro parâmetros, alguns deles normalmente empregados na prática de controle de qualidade de equipamentos de radiologia diagnóstica: primeira e segunda camada semi-redutora (CSR), dimensões dos pontos focais, medida não invasiva do Potencial de Pico Prático e espectrometria de raios X. Estes parâmetros foram medidos inicialmente e após cada aplicação de carga pertinente. Para garantir a confiabilidade dos resultados, condições de reprodutibilidade foram estabelecidas para cada parâmetro de avaliação. As incertezas envolvidas em todos os processos de medição foram calculadas para avaliação da real contribuição dos efeitos do envelhecimento do tubo de raios X nos parâmetros não invasivos. Dentre os parâmetros avaliados, os que mostraram maior sensibilidade aos efeitos da aplicação de carga em longo prazo foram as energias médias obtidas por meio de espectrometria de raios X e as camadas semi-redutoras. Um modelo relacionado a estes parâmetros foi aplicado e estimativas da taxa de envelhecimento do tubo de raios X para diferentes tensões de aceleração e correntes anódicas foram obtidas.

STUDIES OF X RAY TUBE AGING BY NON-INVASIVE METHODS

MÁRCIO BOTTARO

ABSTRACT

The objective of the present work was the evaluation of an x ray tube aging with an anode made of tungsten, used in radio diagnostic. Workloads were applied, in accordance with Brazilian workload distribution, and periodic measurements of quantities related to the radiation quality of the beam were performed. For the purpose of this work, a single phase, full bridge clinical system was employed. For the long term x ray tube characteristics evaluation related to the applied workload, it was necessary to measure parameters that could quantitatively represent the tube aging, with special attention to the anode roughening. For the indirect measurement of tube aging, four parameters were chosen, some of them normally applied in x ray diagnostic quality control: first and second half value layers (HVL), focal spot dimensions, non invasive measurement of Practical Peak Voltage (PPV) and x ray spectroscopy. These parameters were measured before any workload and after each workload intervals. To assure confidence of the results reproducibility conditions were stated to each evaluated parameter. The uncertainties involved in all measurement processes were calculated to evaluate the real contributions of x ray tube aging effects on non invasive parameters. Within all evaluated parameters, the most sensitive to long term workload were the mean energy obtained from spectroscopy and half value layers. A model related to these parameters was applied and estimates of x ray tube aging rate for different acceleration voltages and anodic currents were calculated.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS.....	18
3 FUNDAMENTOS	19
3.1 PRODUÇÃO DE RAIOS X	19
3.1.1 <i>Bremsstrahlung</i>	19
3.1.2 <i>Radiação característica</i>	21
3.2 GERADORES DE RAIOS X	22
3.2.1 <i>Gerador de alta tensão de geradores de raios X</i>	22
3.2.1.1 Geradores Monofásicos e Trifásicos	24
3.2.1.2 Geradores de Potencial Constante e Alta Frequência	28
3.2.2 <i>Tubo de raios X</i>	29
3.2.2.1 Catodo.....	31
3.2.2.2 Anodo.....	33
3.2.2.3 Ponto Focal	36
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA RADIOLÓGICO UTILIZADO	38
4.1.1 <i>Gerador de alta tensão</i>	38
4.1.2 <i>Conjunto fonte de raios X</i>	39
4.2 CARGA DE TRABALHO	40
4.2.1 <i>Controle de cargas e aquisição de dados</i>	41
4.2.1.1 Divisor de alta tensão invasivo.....	42
4.2.1.2 Sistema de aquisição de cargas	43
4.3 PARÂMETROS DE ANÁLISE	46
4.3.1 <i>Primeira e segunda camada semi-redutora</i>	46
4.3.1.1 Geometria para determinação da primeira e segunda CSR's.....	47
4.3.1.2 Materiais e instrumentos utilizados na determinação das CSR's	49
4.3.1.3 Condições de reprodutibilidade.....	50
4.3.1.3.1 Posicionamento do tubo de raios X.....	50
4.3.1.3.2 Alinhamento da câmara de ionização em relação ao feixe de raios X.....	51
4.3.1.3.3 Preparo do gerador de alta tensão do gerador de raios X	52
4.3.1.3.4 Método para determinação da camada semi-redutora.....	53
4.3.2 <i>Dimensões dos pontos focais</i>	54
4.3.2.1 Geometria para medida do ponto focal.....	55
4.3.2.2 Materiais e instrumentos utilizados na medida de ponto focal.....	56
4.3.2.3 Condições de reprodutibilidade.....	57
4.3.2.3.1 Alinhamento do sistema	57
4.3.2.3.2 Critério da técnica radiográfica utilizada	57
4.3.2.4 Adaptação do método de medida de ponto focal.....	58

4.3.3	<i>Medida não-invasiva do PPV</i>	58
4.3.3.1	Medidores não invasivos de tensão de aceleração	58
4.3.3.2	Geometria utilizada para medição não invasiva do PPV	60
4.3.3.3	Materiais e instrumentos utilizados para medição não invasiva do PPV	61
4.3.3.4	Condições de reprodutibilidade	62
4.3.3.4.1	Alinhamento do sistema	62
4.3.3.4.2	Crítérios para aquisição de dados	63
4.3.3.4.3	Método para o cálculo do PPV	64
4.3.4	<i>Espectrometria de raios X</i>	64
4.3.4.1	Considerações iniciais para medida de espectros	65
4.3.4.2	Geometria para medida de espectros	67
4.3.4.3	Materiais e instrumentos utilizados para medição de espectros	69
4.3.4.4	Condições de reprodutibilidade	70
4.3.4.4.1	Plano de referência	70
4.3.4.4.2	Conjunto emissor de raios X	71
4.3.4.4.3	Detector do espectrômetro	73
4.3.4.4.4	Posicionamento dos colimadores	76
4.3.4.4.5	Preparo do gerador de alta tensão do gerador de raios X	76
4.3.4.4.6	Calibração em energia e correção dos espectros	78
4.3.4.4.7	Cálculo da energia média	81
4.3.4.4.8	Cálculo da camada semi-redutora	81
5	RESULTADOS	83
5.1	RESULTADO DAS CARGAS DE TRABALHO APLICADAS	83
5.2	RESULTADO DA MEDIÇÃO DA PRIMEIRA E SEGUNDA CAMADAS SEMI-REDUTORAS	86
5.3	RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DAS DIMENSÕES DOS PONTOS FOCALIS	91
5.4	RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE PPV	96
5.5	RESULTADOS DA ESPECTROMETRIA DE RAIOS X	99
6	DISCUSSÃO	109
7	CONCLUSÕES	114
APÊNDICE 1	CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE CARGAS	117
APÊNDICE 2	PROGRAMA PARA ANÁLISE DAS CARGAS DE TRABALHO	121
APÊNDICE 3	PROGRAMA PARA DETERMINAÇÃO DAS CSR'S	124
APÊNDICE 4	PROGRAMA PARA CÁLCULO DO PPV	128
APÊNDICE 5	ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA	133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Colisão entre elétron de energia E_1 e núcleo do átomo do alvo dando origem a um fóton de energia $h\nu$ pelo processo de <i>Bremsstrahlung</i> .	20
Figura 2. Espectros de raios X produzidos por um tubo para aplicação diagnóstica. A figura mostra o espectro emergente do alvo e o espectro filtrado (linha tracejada).	21
Figura 3. (1) O elétron incidente ejeta o elétron orbital de um átomo do alvo. (2) Um elétron de uma camada com maior energia preenche a lacuna dando origem à radiação característica. (3) O átomo restabelece seu equilíbrio.	21
Figura 4. (A) Transformador hipotético perfeitamente eficiente, (B) construção de um transformador de alta tensão ^[13] .	23
Figura 5. (A) Aquecimento do filamento gerando carga espacial. (B) Aplicação de uma tensão positiva ao anodo altera o equilíbrio das cargas, gerando um fluxo de elétrons do catodo para o anodo. (C) Quando o anodo está negativamente carregado em relação ao catodo, o fluxo de elétron é interrompido. Assim, um diodo funciona como uma válvula de direção única ^[13] .	25
Figura 6. Tensão aplicada, $V(t)$, e corrente elétrica, $I(t)$, gerada em um tubo de raios X com retificação de meia-onda ^[13] .	25
Figura 7. Esquemas de alimentação de tubos de raios X com retificação de onda completa ^[13] . (A) Os dois caminhos percorridos pelos elétrons, dependendo das polaridades das tensões aplicadas. (B) Forma de onda da tensão com retificação de onda completa.	26
Figura 8. Esquema de um circuito para emissão de raios X com retificação de onda completa ^[13] .	26
Figura 9. (A) Circuito retificador trifásico de seis pulsos. (B) Forma de onda de tensão aplicada ao tubo de raios X com ondulação da ordem de 13%.	27
Figura 10. (A) Circuito retificador trifásico de doze pulsos. (B) Forma de onda de tensão aplicada ao tubo de raios X com ondulação da ordem de 3%.	28
Figura 11. (A) Circuito retificador controlado por triodos. (B) Forma de onda de tensão aplicada ao tubo de raios X com ondulação inferior a 3%.	29
Figura 12. Alguns tubos de raios catódicos utilizados por Röntgen em seus estudos ^[18] .	30
Figura 13. Tubo de raios X utilizado em radiodiagnóstico ^[13] .	30
Figura 14. Tubo de raios X de anodo giratório ^[13] .	31
Figura 15. Catodo de um tubo de raios X mostrando dois filamentos e o dispositivo de focalização ^[13] .	32
Figura 16. Tubo de raios X de anodo estacionário ^[13] .	34
Figura 17. Anodos com disco de grafite ^[1] .	34
Figura 18. Relação de áreas de um anodo giratório ^[13] .	35
Figura 19. Imagem do ponto focal de um tubo de raios X utilizando-se uma câmara de abertura à micro orifício ^[13] .	36
Figura 20. Ilustração em corte de um prato de anodo giratório Siemens Biangulix ^[14] .	39
Figura 21. Distribuição das cargas de trabalho levantadas nos EUA por Simpkin ^[22] e no Brasil por Pereira et al. ^[23] .	40
Figura 22. Distribuição bimestral calculada das cargas de trabalho aplicadas ao tubo de raios X em estudo	41

Figura 23. Kit didático 8051 MX – CNZ Engenharia e Informática LTDA.....	43
Figura 24. Circuito do sistema amplificador e conversor A/D.....	43
Figura 25. Sistema amplificador e conversor A/D montado em placa universal	44
Figura 26. Isolador do sistema de preparo e disparo do gerador de raios X	44
Figura 27. Recomendações de geometria para medição da qualidade do feixe segundo a Norma IEC61267 ^[27]	47
Figura 28. Geometria para levantamento da curva de intensidade por espessura de material absorvedor	50
Figura 29. Graus de liberdade da cúpula radiológica montada em seu suporte de ensaio. Setas azuis indicam os movimentos longitudinal e de altura. Setas vermelhas indicam os movimentos circulares paralelo e perpendicular ao eixo anodo-catodo.	51
Figura 30. Posicionamento da câmara de ionização em relação ao feixe de raios X	51
Figura 31. Adaptação para chaveamento dos circuitos de foco fino e grosso operarem independentemente em modo de fluoroscopia	53
Figura 32. a) Geometria para medida de ponto focal de um tubo de raios X; b) Sistema mecânico para alinhamento da fenda com o detector (objeto-detector) ^[35]	55
Figura 33. Dispositivo de alinhamento Nuclear Associates - EUA, utilizado para o alinhamento do sistema de medição das dimensões dos pontos focais ^[35]	57
Figura 34. Conexão dos sistemas de aquisição ao equipamento de raios X.....	62
Figura 35. a) alinhamento sobre écran com sala iluminada; b) visualização do alinhamento por meio de irradiação da área de interesse, em sala escura, com auxílio do écran.	63
Figura 36. Simulação da projeção das intensidades (densidade de energia dos fótons), obtido por meio de simulação pelo método de Monte Carlo GEANT4 do tubo de raios X com alvo de 12°, com tensão de aceleração de 50 kV. Eixos com escala em mm.	66
Figura 37. Plano inicial de referência para determinação dos pontos para espectrometria de raios X.	67
Figura 38. Geometria para espectrometria de raios X: a) Vista do conjunto emissor de raios X (seta vermelha) alinhado com o plano de referência (seta verde); b) Vista do detector do espectrômetro (seta amarela) alinhado com o plano de referência (seta verde) e o laser de referência ao fundo do laboratório (seta azul).....	68
Figura 39. Figura ilustrativa da projeção do laser no piso e parede do laboratório de ensaio com auxílio da lente cilíndrica. A projeção no piso é utilizada para alinhar o diagrama geométrico de medição de espectros.	70
Figura 40. Alinhamento do conjunto emissor de raios X em relação ao plano de referência com detalhe do prumo e marcação de referência.	72
Figura 41. Alinhamento horizontal do conjunto emissor de raios X.....	72
Figura 42. Alinhamento do conjunto emissor de raios X paralelo ao fundo do laboratório de ensaios.	73
Figura 43. Alinhamento do detector do espectrômetro: a) Linha do prumo alinhada com a marcação do centro da janela do detector; b) Nível de bolha sobre o conjunto do detector do espectrômetro para alinhamento no plano vertical.	74
Figura 44. Alinhamento do detector do espectrômetro: Detalhe das marcas de referência para altura.....	74
Figura 45. Alinhamento do detector do espectrômetro: Detalhe das marcas de referência superiores e linha.	75
Figura 46. Alinhamento do detector do espectrômetro em relação ao plano de referência com auxílio do prumo.....	75

Figura 47. Distribuição das cargas de trabalho aplicadas, divididas por foco, totalizando 24 meses de cargas de trabalho aplicadas ao tubo de raios X.....	84
Figura 48. Cargas de trabalho aplicadas ao tubo de raios X, acumuladas por período e por foco, e carga prevista por foco de acordo com a distribuição indicada na seção 4.2 totalizando 24 meses de cargas aplicadas ao tubo de raios X.	84
Figura 49. Resultados das medidas da primeira CSR em foco fino para tensão de 50 kV em função da carga de trabalho com ajuste representado pela curva contínua. Os dados do ajuste são indicados no quadro junto ao gráfico.	88
Figura 50. Resultados das medidas da primeira CSR em foco fino para tensão de 110 kV em função da carga de trabalho com ajuste representado pela curva contínua. Os dados do ajuste são indicados no quadro junto ao gráfico.....	88
Figura 51. Resultados das medidas da primeira CSR em foco grosso para tensão de 110 kV em função da carga de trabalho com ajuste representado pela curva contínua. Os dados do ajuste são indicados no quadro junto ao gráfico.....	89
Figura 52. Resultados das medidas da segunda CSR em foco grosso para tensão de 110 kV em função da carga de trabalho com ajuste representado pela curva contínua. Os dados do ajuste são indicados no quadro junto ao gráfico.....	89
Figura 53. Resultados da medida das dimensões dos pontos focais em função da carga de trabalho acumulada, para foco fino na posição paralela, com magnificação 2,0.	91
Figura 54. Resultados da medida das dimensões dos pontos focais em função da carga de trabalho acumulada, para foco fino na posição ortogonal, com magnificação 2,0.....	91
Figura 55. Resultados da medida das dimensões dos pontos focais em função da carga de trabalho acumulada, para foco grosso na posição paralela, nas magnificações de 1,0 (M01) e 2,0 (M02)	92
Figura 56. Resultados da medida das dimensões dos pontos focais em função da carga de trabalho acumulada, para foco grosso na posição ortogonal, nas magnificações de 1,0 (M01) e 2,0 (M02)	92
Figura 57. Resultados da medida das dimensões dos pontos focais em função da carga de trabalho acumulada, para foco fino na posição paralela, com magnificação 2,0 a 15% da amplitude máxima das intensidades da projeção da imagem da fenda ^[52]	93
Figura 58. Resultados da medida das dimensões dos pontos focais em função da carga de trabalho acumulada, para foco fino na posição ortogonal, com magnificação 2,0 a 15% da amplitude máxima das intensidades da projeção da imagem da fenda ^[52]	93
Figura 59. Resultados da medida das dimensões dos pontos focais em função da carga de trabalho acumulada, para foco grosso na posição paralela, nas magnificações de 1,0 (M01) e 2,0 (M02) a 15% da amplitude máxima das intensidades da projeção da imagem da fenda ^[52]	94
Figura 60. Resultados da medida das dimensões dos pontos focais em função da carga de trabalho acumulada, para foco grosso na posição ortogonal, nas magnificações de 1,0 (M01) e 2,0 (M02) a 15% da amplitude máxima das intensidades da projeção da imagem da fenda ^[52]	94
Figura 61. Resultados de medida do erro intrínseco relativo na medida de PPV para tensões de referência até 60 kV em foco fino.	97
Figura 62. Resultados de medida do erro intrínseco relativo na medida de PPV para tensões de referência maiores que 60 kV em foco fino.	97
Figura 63. Resultados de medida do erro intrínseco relativo na medida de PPV para tensões de referência até 60 kV em foco grosso.	98
Figura 64. Resultados de medida do erro intrínseco relativo na medida de PPV para tensões de referência maiores que 60 kV em foco grosso.	98
Figura 65. Resultados da medida da primeira e segunda CSR em foco fino pelo método da IEC 61267 (seção 4.3.1) e pelo espectro corrigido.....	99

Figura 66. Resultados da medida da primeira e segunda CSR em foco grosso pelo método da IEC 61267 (seção 4.3.1) e pelo espectro corrigido.	99
Figura 67. Espectros de três estados de aplicação de cargas, relocados, corrigidos e normalizados pela área total, para tensão de aceleração de 40 kV em foco grosso, obtidos no eixo central de medição (0°). O gráfico inferior ilustra o espectro inicial subtraído do espectro obtido após a última série de cargas.	101
Figura 68. Espectros de três estados de aplicação de cargas, relocados, corrigidos e normalizados pela área total, para tensão de aceleração de 70 kV em foco fino, obtidos no eixo central de medição (0°). O gráfico inferior ilustra o espectro inicial subtraído do espectro obtido após a última série de cargas.	101
Figura 69. Espectros de três estados de aplicação de cargas, relocados, corrigidos e normalizados pela área total, para tensão de aceleração de 90 kV em foco fino, obtidos no ângulo de $5,7^\circ$ em relação ao feixe central (lado do anodo). O gráfico inferior ilustra o espectro inicial subtraído do espectro obtido após a última série de cargas.	102
Figura 70. Espectros de três estados de aplicação de cargas, relocados, corrigidos e normalizados pela área total, para tensão de aceleração de 110 kV em foco grosso, obtidos no ângulo de $7,6^\circ$ em relação ao feixe central (lado do catodo). O gráfico inferior ilustra o espectro inicial subtraído do espectro obtido após a última série de cargas.	102
Figura 71. Variação da energia média em relação à carga de trabalho para foco fino, para tensão de 40 kV, na posição de medição central de 0° (Tabela 5), com ajuste representado pela curva contínua. Os dados do ajuste são indicados no quadro junto ao gráfico.	103
Figura 72. Variação da energia média em relação à carga de trabalho para foco fino, para tensão de 70 kV, na posição de medição central de 0° (Tabela 5), com ajuste representado pela curva contínua. Os dados do ajuste são indicados no quadro junto ao gráfico.	104
Figura 73. Variação da energia média em relação à carga de trabalho para foco fino, para tensão de 70 kV, na posição de medição inclinada para o anodo em $5,7^\circ$ (Tabela 5), com ajuste representado pela curva contínua. Os dados do ajuste são indicados no quadro junto ao gráfico.	104
Figura 74. Variação da energia média em relação à carga de trabalho para foco fino, para tensão de 70 kV, na posição de medição inclinada para o catodo em $7,6^\circ$ (Tabela 5), com ajuste representado pela curva contínua. Os dados do ajuste são indicados no quadro junto ao gráfico.	105
Figura 75. Variação da energia média em relação à carga de trabalho para foco fino, para tensão de 110 kV, na posição de medição central de 0° (Tabela 5), com ajuste representado pela curva contínua. Os dados do ajuste são indicados no quadro junto ao gráfico.	105
Figura 76. Variação da energia média em relação à carga de trabalho para foco grosso, para tensão de 40 kV, na posição de medição inclinada para o catodo em $7,6^\circ$ (Tabela 5), com ajuste representado pela curva contínua. Os dados do ajuste são indicados no quadro junto ao gráfico.	106
Figura 77. Variação da energia média em relação à carga de trabalho para foco grosso, para tensão de 70 kV, na posição de medição inclinada para o anodo em $5,7^\circ$ (Tabela 6), com ajuste representado pela curva contínua. Os dados do ajuste são indicados no quadro junto ao gráfico.	106
Figura 78. Sistema de calibração do ganho em tensão dos canais de leitura de tensão de aceleração e corrente anódica do sistema de aplicação de cargas e aquisição de dados 118	118
Figura 79. Curva de calibração da relação entre o tempo padrão e o número de posições de memória contendo o sinal de corrente. A equação utilizada e os dados dos parâmetros ajustados, bem como da qualidade do ajuste são indicados no gráfico.	119
Figura 80. Tela de entrada do programa WAnalyzer utilizado para processamento e análise dos dados das cargas aplicadas ao tubo de raios X.	122
Figura 81. Tela de entrada de erros relacionado a medida de corrente anódica do programa WAnalyzer.	123

Figura 82. Tela de entrada do programa HVLCalc utilizado para determinação da primeira e segunda CSR's.	125
Figura 83. Tela de entrada de erros relacionados a determinação das CSR's efetuadas pelo programa HVLCalc.	126
Figura 84. Tela principal programa PPVCalc.jar.	128
Figura 85. Sinal de tensão de aceleração armazenado originalmente em 10000 posições de memória em uma frequência de aquisição de aproximadamente 3,5 kHz.	129
Figura 86. Vetor de saída do método "SignalCond" da classe SignCond.java para o sinal de entrada da Figura 85.	129
Figura 87. Entrada de dados dos sistemas de aquisição e divisor de alta tensão / medidor não invasivo.	131
Figura 88. Entrada de dados para correção da resposta em frequência e geração de espectro de magnitude das formas de onda.	134
Figura 89. Espectro de magnitudes de tensão em função da frequência para o sistema de referência descrito na seção 4.3.3.4.2.	136
Figura 90. Espectro de magnitudes de tensão em função da frequência para o sistema desenvolvido descrito na seção 4.2.1.2.	136

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais, equipamentos e instrumentos utilizados nas medições da primeira e segunda CSR's.	49
Tabela 2 – Materiais, equipamentos e instrumentos utilizados nas medições das dimensões dos pontos focais.	56
Tabela 3 – Materiais, equipamentos e instrumentos utilizados nas medições não invasivas do PPV.	61
Tabela 4 – Materiais, equipamentos e instrumentos utilizados nas medições de espectros.	69
Tabela 5 – Configurações do sistema de espectrometria – Foco Fino.	77
Tabela 6 – Configurações do sistema de espectrometria – Foco Grosso.	78
Tabela 7 – Relação de número de disparos válidos e inválidos por período	85
Tabela 8 – Taxa de variação percentual da primeira CSR em relação à carga de trabalho, W, para os dois focos em diversas tensões de aceleração.....	90
Tabela 9 – Taxa de variação percentual da energia média em relação à carga de trabalho, W, para os dois focos em diversas tensões de aceleração na posição de medição central de 0°.	107
Tabela 10 – Taxa de variação percentual da energia média em relação à carga de trabalho, W, para os dois focos em diversas tensões de aceleração na posição de medição inclinada para o anodo em 5,7°.	107
Tabela 11 – Taxa de variação percentual da energia média em relação à carga de trabalho, W, para os dois focos em diversas tensões de aceleração na posição de medição inclinada para o catodo em 7,6°.	108
Tabela 12 – Medição do PPV pelo sistema desenvolvido e pelo sistema de referência do IEE/USP. O erro calculado pelo programa PPVCalc representa a exatidão de cada sistema para uma forma de onda de entrada, com nível de confiança de aproximadamente 68,3%.	119
Tabela 13 – Medição do kVp máximo ^[2] pelo sistema desenvolvido e pelo sistema de referência do IEE/USP. O erro calculado pelo programa PPVCalc representa a exatidão de cada sistema para uma forma de onda de entrada, com nível de confiança de aproximadamente 68,3%.	120

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, na radiologia diagnóstica existem diferentes grandezas para expressar o valor da tensão de aceleração do tubo de raios X^[1], tais como o kVp (potencial de pico) máximo, o kVp médio ou o kVp efetivo^[2]. Estas grandezas são normalmente utilizadas em medidores de tensão de aceleração invasivos, não invasivos e em equipamentos de raios X para radiologia diagnóstica.

Devido a esta diversidade de grandezas para expressar a tensão de aceleração aplicada ao tubo de raios X, foi proposta uma nova grandeza denominada potencial de pico prático, PPP, ou *Practical Peak Voltage* - PPV^[3,4], que neste trabalho será designado PPV a partir daqui. Esta grandeza está relacionada à distribuição espectral da radiação X emitida e às propriedades da imagem. Geradores de raios X operando no mesmo valor de PPV produzirão o mesmo nível de contraste na imagem radiográfica, mesmo quando as formas de onda das tensões aplicadas ao tubo de raios X são diferentes.

Em 2002 a Comissão Internacional de Eletrotécnica publicou a norma IEC 61676^[5] que especifica os requisitos para a avaliação de desempenho de medidores não invasivos de tensão de aceleração de tubos de raios X. Esta utiliza como grandeza operacional para os medidores não invasivos o PPV. A norma IEC 61676 especifica várias grandezas de influências a serem aplicadas aos medidores tais como: a forma de onda e frequência da alta tensão aplicada ao tubo de raios X, as variações do ângulo do anodo, a filtração total, a taxa de dose, o tempo de irradiação, o tamanho de campo, entre outras. A resposta dos instrumentos à variação dessas grandezas deve estar dentro dos limites estabelecidos pela norma.

Simulações computacionais com um método analítico utilizando o código computacional XCOMP5R^[6] mostraram que o aumento da rugosidade média no anodo de tungstênio de um tubo de raios X na faixa de energias para radiodiagnóstico altera o espectro de saída do feixe de radiação X. Esta alteração pode ser verificada pelo aumento relativo da filtração inerente do tubo de raios X, ou seja, pelo o aumento da probabilidade dos elétrons alcançarem uma maior profundidade de penetração na superfície do anodo^[6].

Este aumento na filtração inerente, segundo Nowotny e Meghtzifene (2002)^[6], é mais pronunciado em baixas energias, ocorrendo inclusive uma contribuição de fótons de baixa energia (feixe mais “mole”) nos espectros obtidos em maiores tensões de aceleração, devido ao aumento da rugosidade. Outro ponto interessante observado por Nowotny e Meghtzifene^[6] é que os efeitos da rugosidade são mais pronunciados nos focos menores, devido provavelmente à densidade de corrente no alvo ser maior na utilização destes.

O interesse na influência real do efeito da rugosidade, ou melhor, do envelhecimento do tubo de raios X nos parâmetros de controle de qualidade, como a medida não invasiva de tensão de aceleração dos tubos de raios X, trouxe o questionamento sobre a vida útil dos tubos de raios X utilizados em radiologia diagnóstica. Baseado nos resultados de Nowotny e Meghtzifene^[6], durante um treinamento técnico de 9 semanas no ano de 2003, junto ao Instituto de Física Teórica da Alemanha, *Physikalisch-Technische Bundesanstalt – PTB* sob a supervisão do chefe da seção de dosimetria de fótons (*Arbeitsgruppe 6.62, Photonenmetrologie*) Dr. Ludwig Büermann, realizou-se uma avaliação experimental dos resultados da simulação computacional. Para simular experimentalmente o aumento da rugosidade no anodo de tungstênio do tubo de raios X na faixa de radiologia diagnóstica, foram adicionados filtros de tungstênio de diferentes espessuras ao feixe primário de radiação X. Com estes resultados foi possível verificar uma grande influência da rugosidade, simulada por meio dos filtros de tungstênio, no incremento do erro de leitura em medidores da grandeza PPV. Este fato deu origem a vários questionamentos:

- Os tubos avaliados no trabalho de simulação^[6] não possuem um histórico real de idade ou mesmo da carga de trabalho integrada no tempo de vida útil, aplicada durante seu período de utilização;
- Não existem registros de acompanhamento de tubos relatando o seu histórico de carga de trabalho e nem mesmo uma associação deste parâmetro com qualquer alteração física no anodo que possam comprovar a simulação teórica e a real equivalência em espessura de tungstênio que as alterações podem acarretar;
- Nas simulações considerou-se que o material do anodo era totalmente constituído de tungstênio. Sabe-se, porém, que a liga do

material do anodo pode ter em sua composição outros elementos, tais como o rênio.

O presente trabalho foi motivado pela proposta da avaliação prática da relação entre a carga de trabalho e parâmetros não invasivos normalmente utilizados em controle de qualidade de equipamentos radiológicos que utilizam tubos de raios X com anodo de tungstênio para diagnóstico, que pode determinar parâmetros que se relacionam a mudanças das características de um tubo de raios X devido ao possível “envelhecimento” do anodo.

Nenhuma avaliação neste sentido é efetuada em laboratórios de calibração de medidores não invasivos de tensão de aceleração de tubos de raios X, o que possibilita contribuição direta para avaliação da vida útil de tubos de raios X utilizados nesta prática. Não se conhece, por exemplo, o efeito de um envelhecimento forçado dos tubos de raios X por meio de cargas excessivas, como as cargas aplicadas em ensaios de segurança de equipamentos de raios X^[7,8,9,10].

Informações sobre parâmetros que se modificam com o envelhecimento do tubo permitiriam avaliar com mais clareza o comportamento dos medidores não invasivos com relação a mudanças na superfície do anodo, a provável vida útil de um tubo de raios X, a alteração de características de proteção das cúpulas de raios X e ainda determinar a vida útil de tubos de raios X utilizados para diagnóstico, de acordo com a previsão de carga de trabalho.

2 OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho foi a avaliação do envelhecimento de um tubo de raios X utilizado em radiodiagnóstico, com anodo de tungstênio, por meio de aplicação de cargas de trabalho e medições periódicas de grandezas associadas à qualidade de radiação produzida, que possam representar de forma quantitativa o envelhecimento do tubo de raios X. Os parâmetros escolhidos devem ser relacionados principalmente ao desgaste do anodo. As avaliações foram efetuadas em várias tensões de aceleração e em dois focos de tamanhos diferentes, para que os dados pudessem ser mais conclusivos, já que dispúnhamos para estes ensaios de um único tubo de raios X.

As cargas de trabalho foram aplicadas de forma a representar o uso do tubo de raios X por um período de dois anos, com distribuição de cargas conforme a realidade brasileira.

3 FUNDAMENTOS

3.1 Produção de raios X

Os raios X são produzidos quando uma substância é bombardeada por elétrons em alta velocidade^[11]. A radiação X é criada pela conversão da energia cinética desses elétrons em fótons com energias apropriadas^[12].

Quando um elétron em alta velocidade penetra a superfície de um alvo ele pode sofrer uma série de interações. Nestas interações o elétron normalmente sofre perda de energia em ionizações, gerando raios delta e eventualmente calor^[11]. Outra porção dos elétrons provoca colisões radiativas, ou seja, a colisão leva à produção de radiação.

Para este trabalho a radiação de interesse é a produzida por tubos de raios X utilizados na faixa de energia de diagnóstico, excluindo-se a faixa de mamografia (40 a 150 keV). Dois tipos de radiação X são evidenciados:

- Radiação de freamento (*Bremsstrahlung*);
- Radiação característica;

3.1.1 *Bremsstrahlung*

O processo que contribui para a geração do maior número de fótons de radiação X é o *Bremsstrahlung*. Neste processo, elétrons que penetram o material do alvo e passam perto de um núcleo de um átomo do alvo, são defletidos e freados pela força de atração do núcleo. A energia perdida pelo elétron durante esta interação aparece como um fóton de raios X com frequência ν e energia $h\nu$ ^[11]. Em algumas colisões mais raras, pode ocorrer o completo freamento do elétron, dando origem a um fóton de energia $h\nu$ igual à energia inicial do elétron. A Figura 1^[11] mostra a interação do elétron com um átomo do alvo gerando um fóton de raios X (*Bremsstrahlung*).

Figura 1. Colisão entre elétron de energia E_1 e núcleo do átomo do alvo dando origem a um fóton de energia $h\nu$ pelo processo de *Bremsstrahlung*.

Os elétrons produzem neste processo fótons de energias variadas, sendo a maior parte deles produzidos com energias inferiores à energia dos elétrons que os originou. De forma simplificada, podemos dizer que os elétrons que atingem as zonas mais próximas do núcleo estão submetidos à maior força de atração, gerando assim fótons de maior energia. Analogamente, os elétrons que atingem as regiões mais externas sofrem interações mais fracas e consequentemente geram fótons de raios X de menor energia.

Dentro desta abordagem, podemos verificar que o espectro de *Bremsstrahlung* (espectro contínuo) é composto em maior parte por fótons de baixa energia e este número é reduzido à medida que a energia aumenta, até a energia máxima, que corresponde à energia dos elétrons acelerados. Este espectro apresenta, dependendo da energia inicial dos elétrons, picos superpostos de radiação característica^[11]. Num processo de produção de raios X detalhado a seguir, um número considerável de fótons de baixa energia é filtrado por absorvedores inerentes ou intencionalmente integrantes no sistema.

A Figura 2 ilustra um espectro contínuo de raios X (*Bremsstrahlung*) com pico característico superposto, evidenciando ainda a redução de fótons de baixa energia após a interposição de absorvedores.

Figura 2. Espectros de raios X produzidos por um tubo para aplicação diagnóstica. A figura mostra o espectro emergente do alvo e o espectro filtrado (linha tracejada).

3.1.2 Radiação característica

O processo de interação que produz a radiação característica envolve a colisão de elétrons em alta velocidade com elétrons orbitais dos átomos do alvo. A interação pode ocorrer somente quando os elétrons incidentes possuem energia cinética maior que a energia de ligação dos elétrons dos átomos do alvo. Nestas condições o elétron orbital é ejetado do átomo deixando uma vacância que é preenchida por um elétron de uma camada de maior energia. Nesta transferência de uma camada de maior energia para uma de menor energia, a energia perdida pelo elétron é emitida na forma de um fóton de raios X ^[11,12,13].

Figura 3. (1) O elétron incidente ejeta o elétron orbital de um átomo do alvo. (2) Um elétron de uma camada com maior energia preenche a lacuna dando origem à radiação característica. (3) O átomo restabelece seu equilíbrio.

A energia do fóton de raios X emitido neste processo é característica do elemento químico pertencente ao material do alvo, o que dá o nome radiação característica. Um determinado material alvo pode promover uma série de energias de radiação características, dependendo do nível de energia em que as interações são originadas (camadas K,L,M, etc).

3.2 Geradores de raios X

Um gerador de raios X pode ser compreendido como um equipamento capaz de converter energia elétrica em radiação X, de forma controlada. Sabemos ainda que a maior parte do resultado desta conversão de energia é perdida em forma de calor. O equipamento é constituído basicamente de um gerador de energia elétrica, um transdutor que é o tubo de raios X contido em um invólucro protetor e um sistema de controle do fornecimento de energia elétrica ao tubo de raios X.

O tubo de raios X requer fundamentalmente dois circuitos de controle: controle de aquecimento de filamento para liberação de elétrons e circuito de alta tensão para acelerá-los do catodo para o anodo (alvo). No caso de tubos com anodo giratório, um terceiro circuito é necessário, o de controle de rotação do anodo.

O gerador possui ainda um comando eletro-eletrônico, cujas funções são ligar e desligar o equipamento de raios X, selecionar parâmetros elétricos como tensão (kVp), corrente (mA) e tempo de exposição (s), e também controlar a emissão de raios X.

3.2.1 Gerador de alta tensão de geradores de raios X

O gerador de alta tensão de um gerador de raios X^[7] possui como componentes principais o transformador de alta tensão e os circuitos de controle de carga aplicada ao tubo de raios X.

O transformador de alta tensão apresenta uma relação de espiras normalmente elevada (enrolamento primário N1 e enrolamento secundário N2), sendo projetados para trabalhar com altas correntes no circuito primário, e altas tensões no circuito secundário. Com isso, um de seus principais requisitos é a tensão de isolamento entre circuitos primário e secundário, que na faixa de

diagnóstico deve ser da ordem de 160 a 170 kV. Para atender a todos estes requisitos, estes transformadores operam imersos em óleo isolante. Para um transformador hipotético (Figura 4.A) perfeitamente eficiente, a relação (3.1) é dada.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (3.1)$$

Figura 4. (A) Transformador hipotético perfeitamente eficiente, (B) construção de um transformador de alta tensão^[13].

Na prática, os transformadores de alta tensão têm um núcleo em forma de anel composto por ferro ou por outro material ferromagnético, ligando as bobinas primária e secundária (Figura 4.B). Isto aumenta bastante a eficiência do transformador, com uma melhor transferência de potência entre as bobinas, porém sem alterar a relação (3.1).

Nesta transformação, energia não pode ser criada ou destruída, ou seja, para um transformador ideal, a potência de entrada é igual à de saída ($P_{in} = P_{out}$). A potência elétrica é dada pela relação:

$$P = V \cdot I \quad (3.2)$$

Para um transformador ideal, cuja eficiência é de 100%, vale a relação:

$$V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2 \quad (3.3)$$

Deste modo, nota-se que a relação (3.1) pode ser reescrita como $I_2/I_1 = N_1/N_2$, ou seja, se o transformador faz aumentar a tensão na bobina secundária, a corrente elétrica induzida será proporcionalmente menor. No

entanto, a corrente elétrica do circuito primário deve ser bastante alta para gerar a potência necessária à elevação de tensão do circuito secundário nos valores desejados.

3.2.1.1 Geradores Monofásicos e Trifásicos

Além de elevar a tensão da rede elétrica a tensões mais altas, os geradores executam uma tarefa conhecida por retificação, que é a transformação da corrente alternada, que originalmente chega pela rede de alimentação elétrica, em correntes contínuas ou contínuas pulsadas. A retificação de um sinal elétrico alternado é obtida por meio de dispositivos eletrônicos chamados diodos. Um diodo é um dispositivo que permite a passagem de uma corrente elétrica em uma única direção. Existem diversos tipos de diodos, produzidos com diferentes tecnologias e utilizados para as mais diversas aplicações. Nesta publicação não serão discutidos os detalhes técnicos de seus princípios de funcionamento, mas sim a sua aplicação na produção de raios X.

Um circuito simplificado de um sistema para a geração de raios X é mostrado na Figura 5. Os raios X são produzidos quando elétrons acelerados atingem núcleos de átomos. Deste modo, o circuito apresentado, chamado circuito de retificação de meia-onda, ou circuito auto-retificado, deve fazer com que um fluxo de elétrons seja acelerado do catodo (filamento) para o anodo (alvo). A corrente elétrica que flui no tubo de raios X ligado em um circuito como este, é mostrada na Figura 6. Vê-se que, neste caso, somente nos intervalos de tempo onde a corrente é diferente de zero haverá a produção de raios X. Na Figura 5 vê-se, ainda, um sistema para o fornecimento de corrente elétrica ao filamento, que permitirá a criação dos elétrons livres que serão acelerados dentro do tubo, além de um controlador de tempo de exposição.

Na maioria dos casos de circuitos auto-retificados (meia-onda), o circuito de filamento é alimentado por uma derivação do secundário de alta tensão, o que leva a uma maior simplificação do circuito gerador de alta tensão, no entanto, os tempos de irradiação são diferentes dos tempos de aplicação de carga, devido ao atraso na geração de carga espacial pela inércia térmica do filamento que não é pré-aquecido. Este fenômeno requer atenção especial quando trabalhamos com este tipo de circuito^[7].

Figura 5. (A) Aquecimento do filamento gerando carga espacial. (B) Aplicação de uma tensão positiva ao anodo altera o equilíbrio das cargas, gerando um fluxo de elétrons do catodo para o anodo. (C) Quando o anodo está negativamente carregado em relação ao catodo, o fluxo de elétron é interrompido. Assim, um diodo funciona como uma válvula de direção única^[13].

Figura 6. Tensão aplicada, $V(t)$, e corrente elétrica, $I(t)$, gerada em um tubo de raios X com retificação de meia-onda^[13].

A produção de radiação através de um circuito como o da Figura 5 é muito pouco eficiente, uma vez que cerca da metade do potencial elétrico aplicado não é utilizado na produção de raios X, sendo transformado em calor, que é dissipado pelo tubo de raios X. Um sistema mais eficiente é apresentado na Figura 7.

Este sistema, detalhado na Figura 8, é chamado de retificação de onda completa e permite eliminar por meio de uma ponte retificadora, os picos negativos do potencial aplicado ao tubo de raios X e, deste modo, aumentar a eficiência do equipamento na produção de radiação.

Figura 7. Esquemas de alimentação de tubos de raios X com retificação de onda completa^[13]. (A) Os dois caminhos percorridos pelos elétrons, dependendo das polaridades das tensões aplicadas. (B) Forma de onda da tensão com retificação de onda completa.

A energia dos fótons de raios X produzidos no tubo depende da tensão aplicada. Quanto maior a tensão aplicada, maior será a eficiência na produção de radiação e maior será o poder de penetração dos fótons produzidos. Um tubo de raios X acionado por um potencial com retificação de onda completa é limitado, pois existem intervalos em que a tensão cai, atingindo zero instantaneamente e somente depois voltando a se elevar. Este comportamento é desaconselhável em equipamentos e aplicações radiológicas que exijam grande eficiência ou feixes de radiação mais penetrantes.

Figura 8. Esquema de um circuito para emissão de raios X com retificação de onda completa^[13].

Apesar destas limitações, os sistemas de retificação monofásicos abordados até aqui são amplamente usados no Brasil, e ainda são produzidos pela indústria nacional. Suas principais vantagens na atualidade são baixo custo, robustez (grande utilização em pronto-socorros) e facilidade de manutenção.

Uma forma de melhorar o rendimento da geração de raios X é a utilização de circuitos com retificação mais eficiente do que as técnicas de retificação monofásicas mostradas até aqui, o que pode ser obtido com sistemas de retificação trifásicos. Estes sistemas garantem menores ondulações do sinal retificado em dois arranjos normalmente empregados em geradores de alta tensão de geradores de raios X como mostram a Figura 9 e Figura 10.

Um fator importante que classifica o grau de retificação de um sistema é sua ondulação percentual. A ondulação percentual é definida como a diferença percentual entre os valores máximo e mínimo de uma forma de onda. Diferente da ondulação de 100% obtidas com os circuitos monofásicos de retificação, os percentuais de ondulação nos circuitos de retificação trifásica são bem menores, sendo aproximadamente 13% nos circuitos retificadores trifásicos de seis pulsos (Figura 9), e cerca de 3% (Figura 10) nos circuitos retificadores trifásicos de doze pulsos^[14].

Figura 9. (A) Circuito retificador trifásico de seis pulsos. (B) Forma de onda de tensão aplicada ao tubo de raios X com ondulação da ordem de 13%.

Figura 10. (A) Circuito retificador trifásico de doze pulsos. (B) Forma de onda de tensão aplicada ao tubo de raios X com ondulação da ordem de 3%.

Os circuitos elétricos de transformadores de alta tensão para equipamentos trifásicos são mais complexos e não serão explorados a fundo neste texto, pois este não é o foco principal deste trabalho. A eficiência de um sistema na produção de raios X é inversamente proporcional a sua ondulação percentual, ou seja, quanto menor a ondulação percentual, maior será a eficiência do equipamento.

3.2.1.2 Geradores de Potencial Constante e Alta Frequência

Algumas técnicas como a cinefluoroscopia e a angiografia necessitam de feixes de raios X gerados por meio de potenciais aproximadamente constantes. Para gerar estes tipos de feixes, são utilizados sistemas que monitoram constantemente os valores de tensão que são aplicados ao tubo e produzem um sinal de *feedback* proporcional à diferença entre a tensão instantânea e a tensão desejada.

Os sistemas conhecidos por triodos são utilizados para fazer esta correção, por meio de *feedback* dos divisores de alta tensão empregados junto aos transformadores, mantendo o potencial praticamente constante como ilustrado na Figura 11^[14].

Figura 11. (A) Circuito retificador controlado por triodos. (B) Forma de onda de tensão aplicada ao tubo de raios X com ondulação inferior a 3%.

Com o desenvolvimento de semicondutores de alta potência na década de oitenta, tornou-se possível a produção dos chamados geradores multipulsados ou de alta frequência. Com estes sistemas, tornou-se possível produzir potenciais com ondulação percentual bastante baixa, mesmo sendo alimentados por tensões monofásicas ou trifásicas. Para isso, utilizam-se circuitos de alta tecnologia que combinam a possibilidade de geração de potenciais aproximadamente constantes com transformadores de menor volume^[15]. O projeto e melhoria destes transformadores de alta frequência é sempre o grande desafio nos geradores de alta tensão de geradores de raios X devido aos requisitos de potência do sistema^[16].

3.2.2 Tubo de raios X

Os tubos de raios X^[12,13,17] são conversores de energia. Estes tubos tiveram origem nos tubos de Crooks (tubos de raios catódicos) com extremidades de platina ou tântalo no terminal elétrico positivo (ânodo) disposto em 45° em relação ao eixo do tubo, e alumínio no terminal negativo (catodo), com extremidade livre voltada para o ânodo, em forma de disco côncavo. Em seus estudos com estes tubos, no Laboratório de Física da Universidade de Würzburg, Wilhelm Conrad Röntgen descobriu os raios X, ou raios Röntgen^[18].

Figura 12. Alguns tubos de raios catódicos utilizados por Röntgen em seus estudos^[18].

A energia elétrica aplicada aos tubos de raios X é convertida em outras duas formas de energia: radiação X e calor, sendo o último um produto indesejado, porém inevitável. Eles são projetados e construídos de maneira a maximizar a produção de raios X e a dissipar o calor tão rapidamente quanto possível. A Figura 13 apresenta um tubo de raios X utilizado em radiodiagnóstico.

Figura 13. Tubo de raios X utilizado em radiodiagnóstico^[13].

A construção elétrica de um tubo de raios X é relativamente simples, contendo dois elementos fundamentais: o catodo e o anodo. Estes elementos estão dispostos no interior de um invólucro de vidro dentro do qual é produzido alto vácuo e mantido a pressões menores que $1,3 \cdot 10^{-6}$ kPa ($1,3 \cdot 10^{-8}$ atm), lembrando que a pressão ao nível do mar é 101,3 kPa (1 atm). Este invólucro possui uma pequena área com uma espessura de vidro menor que o restante do tubo, chamada janela, por onde saem os fótons de raios X que serão utilizados na produção da radiografia. O propósito do rebaixo na região da janela é reduzir a filtração inerente promovida pelo vidro, que normalmente é de pirex.

O tubo de raios X é montado no interior de uma cúpula, cuja função, além de oferecer suporte ao tubo de raios X, é absorver a radiação que não é utilizada na produção da radiografia. Dentro da cúpula, o tubo de raios X é imerso em óleo isolante que possui a função de proteção elétrica e dissipação térmica do anodo. A Figura 14 apresenta, esquematizado, um tubo de raios X de anodo giratório.

Figura 14. Tubo de raios X de anodo giratório^[13].

A produção de raios X ocorre quando os elétrons liberados no catodo são acelerados em direção ao anodo por uma diferença de potencial; no anodo são desacelerados rapidamente gerando os raios X e calor.

A seguir estão descritas as características mais importantes de alguns elementos dos tubos de raios X.

3.2.2.1 Catodo

O catodo é o terminal negativo do tubo de raios X responsável pela emissão dos elétrons que serão acelerados em direção ao anodo. Ele é constituído por um ou dois filamentos, que são utilizados um de cada vez dependendo da aplicação e do dispositivo focalizador. O filamento é um fio enrolado em forma helicoidal, geralmente de tungstênio. O diâmetro deste fio é de 2 mm e a hélice tem 1 a 2 cm de comprimento e 2 a 5 mm de diâmetro. Quando uma corrente elétrica da ordem de 3,5 a 7 A passa através deste filamento, a agitação térmica de seus átomos torna-se tão grande que provoca a emissão de elétrons para fora do fio criando uma nuvem eletrônica em volta

deste. Este efeito é chamado efeito termiônico. A nuvem eletrônica criada é chamada carga espacial e será responsável pelo feixe de elétrons que será acelerado para o anodo. A temperatura necessária para produzir o efeito termiônico em uma taxa suficientemente alta para gerar os elétrons necessários é de cerca de 2200 °C. Se o filamento for mantido nesta temperatura, parte do tungstênio pode evaporar e depositar-se no interior do vidro (metalização do tubo), o que pode ocasionar posteriormente problemas de isolamento interna (abertura de arco-voltaico). Assim, a corrente do tubo é mantida em um valor inferior, tal que o filamento esteja pré-aquecido antes da irradiação ocorrer, porém numa temperatura menor que a necessária no momento de exposição. Deste modo, a maioria dos equipamentos radiológicos possui botões de duas etapas para o acionamento: a primeira etapa é chamada preparo, quando a temperatura do filamento se eleva, e a segunda é chamada irradiação, quando a alta tensão entre o anodo e o catodo é acionada. Estes filamentos são montados no interior de uma cúpula focalizadora, feita de níquel e mantida sob o mesmo potencial que o filamento. Devido à geometria da cúpula, gera-se um campo elétrico entre o filamento e o anodo, o que impede a dispersão da nuvem eletrônica. A Figura 15 apresenta um catodo com dois filamentos paralelos (bombardeiam duas pistas distintas no anodo).

Figura 15. Catodo de um tubo de raios X mostrando dois filamentos e o dispositivo de focalização^[13].

3.2.2.2 Anodo

O anodo é o terminal positivo do tubo de raios X, sendo dois tipos encontrados na radiologia diagnóstica: o anodo estacionário e o anodo giratório. Ele possui duas funções: converter a energia eletrônica em radiação X e dissipar o calor criado por este processo. Assim, o material do anodo deve ser escolhido de forma a atender estas funções. A situação ideal seria aquela onde a maioria dos elétrons criasse mais fótons de raios X do que calor. A fração do total de energia eletrônica convertida em radiação X (eficiência) depende de dois fatores: o número atômico (Z) do material do anodo e da energia dos elétrons. Assim o anodo pode ser visto em duas partes:

- Alvo: De material com elevado número atômico, o que garante maior número de elétrons orbitais e maior núcleo, proporcionando maior probabilidade de interações. O alvo é contido por um eixo de suporte;
- Suporte: Material com boa condutividade e capacidade térmica, apresentando volume muito maior que o alvo para este propósito.

A maioria dos tubos de raios X para diagnóstico utiliza o tungstênio como alvo, pois possui um número atômico alto ($Z=74$) e sua eficiência na produção de raios X é razoavelmente grande. Tem um alto ponto de fusão (3380°C) e uma baixa pressão de vapor (ou seja, poucos átomos de tungstênio evaporam do alvo nas temperaturas operacionais normais). Isto permite que, mesmo com um alto bombardeio de elétrons em uma área pequena do material gerando altíssimas temperaturas, o tungstênio não irá derreter nem evaporar. Atualmente, uma liga de 90% de tungstênio e 10% de rênio tem sido utilizada por combinar às propriedades já descritas uma resistência maior a quebras ou rachaduras resultantes do ciclo térmico ao qual o material é submetido durante uma exposição.

O anodo estacionário é construído conforme a Figura 16, sendo constituído por uma pequena placa de tungstênio de 2 a 3 mm de espessura, que está inserida num bloco de cobre. A placa de tungstênio pode ser quadrada ou retangular com dimensões maiores que 1 cm. Como pode ser visto na Figura 16,

o alvo de tungstênio está posicionado de modo a formar um ângulo entre sua superfície e a direção de incidência dos elétrons. Estes ângulos são tipicamente da ordem de 10 a 20 graus e são utilizados para maximizar a quantidade de fótons que são emitidos na direção da janela do tubo.

Figura 16. Tubo de raios X de anodo estacionário^[13].

O anodo giratório está ilustrado na Figura 14 e consiste, em geral, de um disco de molibdênio, grafite, ou de uma combinação de ambos, com diâmetro entre 50 e 125 mm (dependendo do modelo). Na superfície deste disco encontra-se uma camada de uma liga de tungstênio e rênio, geralmente numa proporção de 90/10.

Figura 17. Anodos com disco de grafite^[19].

O disco deste alvo encontra-se rigidamente ligado ao rotor de um motor de indução. Este rotor encontra-se dentro do tubo e o estator do motor situa-se do lado de fora, contornando uma das extremidades do tubo. A grande

vantagem na utilização de tubos de anodo giratório encontra-se no fato de que cada parte do alvo é atingida pelo fluxo de elétrons somente durante um curto intervalo de tempo. Na maioria dos equipamentos radiológicos que utilizam tubos de anodo giratório, o anodo gira cerca de 3.000 vezes por minuto.

Na Figura 18 podemos ver a ilustração do ponto focal e pista focal (foco térmico). Considerando que um feixe de elétrons atinge um anodo estacionário (Figura 16) numa área de 6 mm de altura e 1,5 mm de largura, a área utilizada por este tipo de alvo é de $(1,5 \text{ mm}) \times (6 \text{ mm}) = 9 \text{ mm}^2$. Contudo, se um alvo com estas dimensões estiver posicionado em um anodo na forma de disco, a 50 mm do centro, a área que será atingida pelos elétrons terá 6 mm de altura, mas $2\pi \times 50 \text{ mm} \approx 314 \text{ mm}$ de comprimento. Assim, a área útil do alvo torna-se $(6 \text{ mm}) \times (314 \text{ mm}) \approx 1.900 \text{ mm}^2$. Nota-se que a área no alvo do tubo de anodo giratório é cerca de 200 vezes maior que no caso do tubo de anodo estacionário.

Figura 18. Relação de áreas de um anodo giratório^[13].

O anodo apresenta grande degradação com o tempo, de acordo com a carga de trabalho aplicada ao tubo de raios X em seu uso clínico. A degradação em utilização normal, respeitando os limites térmicos do tubo de raios X e cúpula radiológica^[20], aparece em forma de rugosidade^[6] e em casos de operação anormal, como por exemplo na falha no sistema de rotação do anodo, aparece na forma de “lágrimas” (derretimento do alvo) devido ao ponto de fusão do

tungstênio ser atingido na região bombardeada pelos elétrons. Este processo também provoca evaporação dos materiais do alvo, como ocorre com o tungstênio do filamento, que podem se depositar no vidro do tubo de raios X. Ambos os processos levam a um aumento gradativo da filtração inerente do conjunto fonte e conjunto emissor de radiação X. Um fato importante é que a rugosidade inicial de um anodo de um tubo de raios X possui um valor inicial normalmente muito diferente de zero devido ao processo de amaciamento promovido pelos fabricantes como parte do processo de fabricação^[21].

3.2.2.3 Ponto Focal

Nem todo o anodo está envolvido na produção dos raios X. A radiação é produzida numa pequena região na superfície do anodo conhecida como ponto focal. O tamanho do ponto focal será um dos fatores limitantes do poder de resolução (ou seja, da capacidade do sistema em identificar estruturas pequenas) do equipamento. As dimensões variam entre 0,1 mm e 2 mm e os tubos são construídos para terem tamanhos específicos de ponto focal de acordo com a aplicação desejada. Pontos focais pequenos geram imagens mais detalhadas e pontos focais grandes possuem uma melhor dissipação de calor.

O tamanho e a forma do ponto focal dependem, basicamente, do tamanho do filamento e das características de construção do dispositivo de focalização do tubo. Muitos tubos de raios X possuem dois filamentos, um grande e um outro pequeno, permitindo a produção de imagens com maior ou menor poder de resolução, dependendo das necessidades do diagnóstico.

A Figura 19 apresenta uma imagem de ponto focal obtida por meio de uma câmara de abertura à micro orifício.

Figura 19. Imagem do ponto focal de um tubo de raios X utilizando-se uma câmara de abertura à micro orifício^[13].

Conforme foi discutido anteriormente, grande parte da energia cedida aos elétrons é perdida na forma de calor. Deste modo, quanto menor o ponto focal, maior será a quantidade de calor depositada por unidade de área no material do anodo. Assim, deve existir um compromisso entre o tamanho do ponto focal e a corrente anódica, de modo que a quantidade de calor por unidade de área gerada não ultrapasse os limites de segurança. Deste modo, em um equipamento com foco duplo, o ponto focal pequeno sempre estará associado a correntes anódicas menores (logo menor intensidade de radiação) que quando selecionado o ponto focal grande. A escolha sempre será função da técnica diagnóstica a ser adotada.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Descrição do sistema radiológico utilizado

Para o propósito deste trabalho, um sistema clínico com retificação monofásica de onda completa foi utilizado. Apesar da grande evolução dos geradores de alta tensão de geradores de raios X, estes equipamentos ainda são muito empregados no Brasil, principalmente quando se tem como exigência a robustez do sistema, conforme discutido na seção 3.2.

4.1.1 Gerador de alta tensão

O gerador de alta tensão disponível no IEE/USP para o propósito deste trabalho, era um Heliophos 4B – Siemens, com comando eletromecânico e transformador de alta tensão com retificação monofásica de onda completa de 120 kV/500 mA. Este gerador opera no modo de radiografia com correntes de 40, 80 e 160mA em foco fino (0,7 mm) e 320 e 500 mA em foco grosso (1,2 mm) e no modo de fluoroscopia com correntes de 1 a 5 mA em foco fino. Ele apresenta algumas limitações como temporizador valvulado, que não garante a reprodutibilidade de tempo em técnicas de radiografia, sistema de regulação de alta tensão e corrente anódica por meio de componentes discretos e passivos (banco de resistores) e regulação manual de rede elétrica, o que não garante a perfeita reprodutibilidade dos parâmetros de aplicação de carga com o tempo de uso da máquina.

Uma calibração inicial dos parâmetros de aplicação de carga do gerador foi efetuada de forma a garantir valores de tensão e corrente aplicada ao tubo de raios X, dentro de uma margem razoável para a proposta deste trabalho, tanto nos modos de radiografia como de fluoroscopia.

Devido a suas limitações construtivas e de operação, algumas adaptações foram necessárias para que a garantia dos resultados fosse alcançada. Estas adaptações estão relacionadas na seção 4.2.1.

4.1.2 Conjunto fonte de raios X

O tubo de raios X utilizado no trabalho foi um tubo Røerix 124/30/60öDw-12°, com tensão máxima de 124 kV, potência máxima em foco fino de 30 kW e 50 kW em foco grosso. Possui anodo giratório com alvo de tungstênio (liga de 90 a 95% tungstênio e 10 a 5% rênio) com suporte de molibdênio, com filamentos em linha na cúpula focalizadora, e ângulos dos alvos em relação ao eixo anodo-catodo distintos, sendo 16° para foco fino e 12° para foco grosso. A Figura 20 ilustra em corte o prato do anodo giratório Siemens BIANGULIX, equivalente ao tubo de raios X Røerix 124/30/60öDw.

Figura 20. Ilustração em corte de um prato de anodo giratório Siemens Biangulix^[14].

A rotação do anodo é da ordem de 3000 rpm durante a aplicação de carga efetuada pelo gerador descrito na seção 4.1.1. O tubo de raios X é montado em uma cúpula radiológica Siemens PANTIX GEHÄUSE RG150/100 com janela acrílica, estator para anodo giratório e conjunto de canecas para alta tensão incorporados. Este tubo não está mais disponível comercialmente, mas é equivalente a nova série de tubos Siemens BIANGULIX, que apresenta equivalência com outros fabricantes como VARIAN, GE, etc., o que faz com que o tubo escolhido seja uma amostra representativa dentre os tubos mais utilizados comercialmente na faixa de radiodiagnóstico. Este tubo apresenta um pré-condicionamento (“amacramento”) por parte do fabricante, o que confere ao mesmo uma rugosidade inerente inicial^[21]. Desta forma, neste trabalho, a carga de trabalho inicial já incorpora este envelhecimento que não pode ser quantificado, pertencente ao processo de fabricação.

4.2 Carga de trabalho

O trabalho foi baseado na aplicação de cargas, que promoveram o envelhecimento do tubo de raios X, e medição de parâmetros quantitativos que pudessem refletir os efeitos provocados por este envelhecimento.

Uma hipótese assumida neste trabalho, é que a distribuição de cargas de trabalho em radiologia diagnóstica é um levantamento estatístico que pode variar muito entre as realidades de diversos países. Esta distribuição normalmente é representada por um gráfico que ilustra a carga (produto mA-minuto por paciente) em relação à distribuição da tensão de aceleração do tubo de raios X em kilovolts. Simpkin^[22] em 1996 publicou nos Estados Unidos o primeiro trabalho, baseado na realidade norte-americana, sobre estudo da distribuição das cargas de trabalho. No entanto, a distribuição das cargas de trabalho no Brasil difere dos dados de Simpkin^[22], como mostra o trabalho de Pereira et al. (2006)^[23]. Como o intuito deste trabalho foi o de avaliar o envelhecimento do tubo de raios X com base na realidade brasileira, utilizamos os dados dentro da nossa realidade. As distribuições podem ser verificadas conforme apresentado na Figura 21.

Figura 21. Distribuição das cargas de trabalho levantadas nos EUA por Simpkin^[22] e no Brasil por Pereira et al.^[23]

Com esta distribuição é possível estabelecer um cronograma de aplicação de cargas levando em conta o número de pacientes submetidos a exames diariamente por um mesmo tubo de raios X. Para simular uma condição representativa de utilização do tubo de raios X em radiologia diagnóstica no Brasil, foi adotado o número de 80 pacientes/dia, com duas radiografias em

média por paciente^[23]. Isto corresponde ao valor médio aproximado de pacientes atendidos a cada 24 horas dentro de pronto-socorros públicos, de acordo com informações de Furquim, T. A. C. da Seção Técnica de Aplicações em Diagnóstico por Imagem do IEE/USP, dentro de sua experiência de vários anos no controle de qualidade de equipamentos de radiologia diagnóstica no setor público e privado no estado de São Paulo.

Para aplicação das cargas dentro de cada faixa de tensão o foco fino foi configurado fornecendo corrente anódica de 160 mA e foco grosso fornecendo corrente anódica de 320 mA. Foi considerada neste trabalho uma distribuição uniforme das cargas entre os dois focos do tubo de raios X para avaliação dos efeitos produzidos por diferentes densidades de corrente, sendo assim, o produto corrente tempo nas duas configurações de foco foi selecionado em 100 mAs. O gráfico da Figura 22 ilustra a distribuição de cargas de trabalho mensal dos focos, compondo uma distribuição de cargas bimestral do tubo de raios X.

Figura 22. Distribuição bimestral calculada das cargas de trabalho aplicadas ao tubo de raios X em estudo

As cargas acima de 95 kV foram incluídas em um único grupo de cargas com a máquina selecionada em 96 kV devido às limitações do sistema gerador e a sobreaquecimentos observados em testes preliminares com outros tubos equivalentes ao tubo utilizado no ensaio.

4.2.1 Controle de cargas e aquisição de dados

Com a distribuição de cargas ilustradas na Figura 22, pode-se verificar que o número de cargas necessárias para se completar cada bimestre é extremamente elevado (10674 disparos por foco), não sendo viável a aplicação

de carga e o monitoramento dos resultados por um operador. Outro fato é que as cargas que equivalem a um bimestre de utilização do tubo nas condições estabelecidas devem ser executadas no mínimo tempo possível, para viabilizar o maior número de dados obtidos dentro da proposta deste trabalho, no entanto, os tempos de resfriamento do tubo de raios X e do conjunto emissor de radiação X devem ser sempre respeitados.

Este panorama motivou o desenvolvimento de um sistema eletrônico de controle de aplicação de cargas e aquisição de dados, para operar em conjunto com o gerador de raios X.

4.2.1.1 Divisor de alta tensão invasivo

O monitoramento dos parâmetros aplicados ao tubo de raios X foi efetuado por meio de um divisor de alta tensão invasivo marca Radcal, modelo Dynalyzer III, conectado ao sistema de aquisição. Este monitoramento é necessário uma vez que a reprodutibilidade dos dados do gerador de raios X não pode ser garantida (seção 4.1.1).

O divisor de alta tensão consiste basicamente em uma malha resistiva capaz de operar em alta tensão, não indutiva, montado em um reservatório com um meio isolante de alta tensão que pode ser um gás ou óleo mineral. Este circuito divisor pode ser ativo ou passivo, ou seja, com ou sem compensação eletrônica e circuitos amplificadores integrados ao sistema. A vantagem do sistema ativo é que a resposta em frequência normalmente já é efetuada pelo circuito eletrônico, não sendo necessária a correção da informação de saída do divisor. Em alguns casos, no emprego do circuito passivo, os resistores apresentam comportamento indutivo em determinadas faixas de frequência. Nestes casos são utilizados capacitores para alta tensão em conjunto com a malha resistiva para compensação em frequência.

Neste trabalho, o divisor de alta tensão invasivo de referência utilizado foi um Radcal Dynalyzer III com as seguintes características:

- Razão nominal para tensão: 1 V:20000 V;
- Exatidão da razão da tensão: 1% até 75 kV por canal (anodo ou catodo);
- Ganho de resposta em frequência: ≈ 1 ($f \leq 10$ kHz);

- Razão nominal para corrente: 1 mV:1 mA (modo Radiografia);
- Exatidão da razão da corrente: 2% até 1000 A

4.2.1.2 Sistema de aquisição de cargas

O sistema de aquisição desenvolvido consiste de um kit de desenvolvimento comercial da CNZ Engenharia e Informática LTDA para microcontroladores da família 8051^[24] e um circuito amplificador com conversão A/D (analógico-digital) desenvolvido para trabalhar em conjunto com a unidade de processamento. O kit de desenvolvimento é ilustrado na Figura 23, o circuito conversor A/D na Figura 24 e sua montagem na Figura 25.

Figura 23. Kit didático 8051 MX – CNZ Engenharia e Informática LTDA

Figura 24. Circuito do sistema amplificador e conversor A/D

Figura 25. Sistema amplificador e conversor A/D montado em placa universal

O sistema de aquisição apresenta as seguintes características:

- Ganho nominal para o canal de tensão de aceleração: 1;
- Ganho nominal para o canal de corrente anódica: 0,125;
- Frequência de aquisição por canal: 3,5 kS/s;
- Número de amostras (S) por canal: 10000;
- Resolução digital: 8 bits;
- Tensão de referência do conversor: 0 a +5 V;
- Exatidão da tensão de referência: 0,025 V;

O sistema amplificador possui ainda a interface para o disparo da máquina de raios X. Devido aos comandos de preparo e disparo do equipamento de raios X operarem com tensões relativamente elevadas, uma adaptação para garantir a isolamento do sistema das partes sob tensão da máquina de raios X foi efetuada e é ilustrada na Figura 26.

Figura 26. Isolador do sistema de preparo e disparo do gerador de raios X

Um programa em linguagem Assembler para microcontroladores da família 8051 foi desenvolvido para controlar todo o sistema e foi compilado com auxílio do programa ASM51^[25]. O programa oferece entrada do número de

disparos a serem efetuados por técnica (limitado ao máximo de 999 disparos) e do tempo total de aplicação de carga que leva em conta o preparo do tubo de raios X (rotação de anodo e elevação de tensão do filamento). A rotina estabelece tempos de resfriamento dentro das especificações técnicas do fabricante, para garantir a integridade do tubo de raios X durante a aplicação de cargas. Para esta aplicação específica, o tempo de espera programado foi de um minuto entre cada disparo, após a transferência de dados do sistema de aquisição ao microcomputador PC. Além deste tempo de resfriamento, um tempo adicional de cinco minutos foi estabelecido a cada vinte disparos sequenciais efetuados, de forma a preservar os circuitos internos de acionamento do gerador de raios X.

O programa controla o disparo da máquina de raios X com a seqüência de preparo (3 segundos) e disparo (de acordo com o tempo programado) necessárias para correta operação do gerador de alta tensão e efetua a aquisição pelo conversor A/D, enviando os dados por padrão serial RS232 a um microcomputador PC conectado ao sistema, que recebe e armazena os dados de cada disparo. A cada seqüência de dados, o programa busca o valor máximo da alta tensão fornecida pelo gerador de alta tensão, baseado na forma de onda de alta tensão coletada, o valor médio da corrente anódica e o tempo de irradiação, baseados na forma de onda da corrente anódica coletada. Com estes dados é possível caracterizar cada carga aplicada ao tubo de raios X sob ensaio. A calibração do sistema de aquisição é detalhada no Apêndice 1, e uma avaliação comparativa de sua resposta em frequência em relação ao sistema de aquisição padrão do IEE/USP, detalhado na seção 4.3.3.4.2, é dada no Apêndice 5.

Cada conjunto de cargas aplicadas ao tubo foi processado para que se pudesse avaliar a real distribuição por período e total das cargas de trabalho utilizadas, já que o gerador está sujeito a variações de parâmetros (seção 4.1.1).

Devido ao grande número de disparos e às correções aplicadas a calibração do sistema de aquisição, um programa descrito no Apêndice 2 foi desenvolvido com a finalidade de processar as informações das cargas aplicadas ao tubo de raios X em cada período.

4.3 Parâmetros de análise

Para avaliação em longo prazo das características do tubo de raios X relacionadas à carga de trabalho foi necessária a medição de parâmetros que pudessem representar de forma quantitativa o envelhecimento do tubo de raios X, estando relacionados principalmente ao desgaste do anodo. Esta medição indireta do desgaste do anodo levou à escolha de quatro parâmetros, alguns deles normalmente empregados na prática de controle de qualidade de equipamentos de radiologia diagnóstica:

1. Primeira e segunda camada semi-redutora (CSR)
2. Dimensões dos pontos focais
3. Medida não-invasiva do PPV
4. Espectrometria de raios X

Estes parâmetros foram medidos inicialmente e após cada aplicação de carga pertinente e, para garantir a confiabilidade dos resultados, condições de reprodutibilidade foram estabelecidas para cada parâmetro de avaliação.

4.3.1 Primeira e segunda camadas semi-redutoras

A camada semi-redutora (CSR) é um parâmetro importante na determinação da qualidade dos feixes radiológicos. A primeira CSR é definida como a espessura de material absorvedor, alumínio no caso deste trabalho, necessária para reduzir a intensidade da radiação à metade do valor inicial (sem material) e a segunda CSR é a espessura adicional de material absorvedor necessária para reduzir a intensidade da radiação a um quarto do valor inicial [11,13]. Com a primeira e segunda CSR's é possível estabelecer ainda o coeficiente de homogeneidade do feixe de raios X de acordo com a equação (4.1)^[26,27].

$$h = \frac{1^a CSR}{2^a CSR} \quad (4.1)$$

De acordo ainda com a Norma IEC 61267^[27] a primeira CSR é a espessura de material absorvedor necessário para reduzir a taxa de kerma no ar à metade do valor sem este absorvedor e a segunda CSR é a quantidade de material adicional para reduzir a taxa de kerma no ar a um quarto deste valor.

Neste trabalho, as leituras efetuadas com a câmara de ionização foram da grandeza taxa de exposição, devido à instrumentação utilizada, detalhada na seção 4.3.1.2. O procedimento para determinação da primeira e segunda CSR's consiste basicamente na leitura de taxa de exposição inicial sem interposição de materiais absorvedores (I_0) com o objetivo de se inferir as taxas de exposição referentes à $\frac{1}{2}$ ($I_0/2$) e $\frac{1}{4}$ ($I_0/4$) da taxa de exposição inicial, respectivamente. Posteriormente são interpostos filtros ao feixe de raios X para que se possa estabelecer a curva de taxa de exposição por espessura de material absorvedor para determinação das CSR's.

4.3.1.1 Geometria para determinação da primeira e segunda CSR's

O valor das CSR's e consequentemente do coeficiente de homogeneidade estão diretamente ligados às características intrínsecas do tubo de raios X e dos materiais que compõem o conjunto emissor de radiação X^[1]. A Norma IEC61267^[27] define uma geometria de feixe estreito para determinação das qualidades dos feixes na faixa de radiologia diagnóstica, que foi adotada neste trabalho. O desenho da Figura 27 mostra as dimensões ilustradas pela Norma.

Figura 27. Recomendações de geometria para medição da qualidade do feixe segundo a Norma IEC61267^[27]

Podemos observar que as seguintes distâncias devem ser respeitadas:

- Distância ponto focal - colimador: 200 mm a 300 mm
- Distância ponto focal – câmara de ionização: ≥ 500 mm
- Distância câmara de ionização – piso: ≥ 450 mm

Para atender aos requisitos da Norma IEC 61267 a seguinte geometria foi adotada nas medições das CSR's neste trabalho:

- Distância ponto focal - diafragma: 250 mm
- Distância diafragma – câmara de ionização: 635 mm
- Distância câmara de ionização – piso: 475 mm

Filtros auxiliares não foram empregados já que a intenção era avaliar a mudança da filtração inerente por meio da variação das CSR's.

4.3.1.2 Materiais e instrumentos utilizados na determinação das CSR's

Para executar o procedimento de levantamento da curva de taxa de exposição por espessura de material absorvedor para determinação da primeira e segunda CSR's segundo a geometria estabelecida na seção 4.3.1.1 foram utilizados os materiais e instrumentos listados na Tabela 1.

Tabela 1 – Materiais, equipamentos e instrumentos utilizados nas medições da primeira e segunda CSR's.

Descrição	Marca / Modelo	Características Técnicas ⁽¹⁾
Armação metálica para ensaio	Fabricado no IEE-USP	-
Suporte acrílico para câmara e filtros	Radcal	-
Régua de precisão	Kawasa	<ul style="list-style-type: none"> Tipo: metálica Comprimento: 1000 mm
Medidor digital de ângulos	Bosch / DNM 60L	<ul style="list-style-type: none"> Faixa: 0 a 90° Resolução: 0,01°
Filmadora digital	Sony / Digital HIPER HAD	<ul style="list-style-type: none"> Comunicação protocolo TCP-IP
Estação meteorológica	Oregon Scientific / BA928	<ul style="list-style-type: none"> Temperatura – 50,0°C a + 70,0°C Umidade relativa: 25% a 95% Pressão atmosférica: 795 a 1050 hPa
Diafragmas de chumbo superpostos	Fabricados no IEE/USP	<ul style="list-style-type: none"> 3 mmPb Dimensões diafragma 1: abertura 70 mm Dimensões diafragma 2: abertura 90 mm
Divisor de alta tensão invasivo	Radcal / Dynalyzer III	<ul style="list-style-type: none"> Razão (anodo + catodo): 20000:1 Exatidão por canal: 0,1 % Compensação em frequência: ≈1 até 10 kHz
Câmara de ionização	Radcal Corporation – 10X5-6	<ul style="list-style-type: none"> Volume: 6 cm³ Resolução: 0,5% ou 0,01 µGy Dependência pela taxa de dose: ± 5%, (3,5 µGy/s até 0,7Gy/s) Dependência energética: ± 5%, (20 keV até 1300 keV)
Monitor da câmara de ionização	Radcal Corporation – 1515	<ul style="list-style-type: none"> Faixa de taxa de exposição: 0,01 mR/h a 180 kR/min ⁽²⁾
Colimador de chumbo e aço inox	-	<ul style="list-style-type: none"> Espessura: 16 mm Diâmetro de abertura: 21 mm
Filtros de alumínio	Radcal	Espessuras e graus de pureza em Al: <ul style="list-style-type: none"> 0,1 mm: 99,45%; 0,5 mm: 99,5%; 1,0 e 2,0 mm: 99,0%

⁽¹⁾ Dados obtidos dos manuais técnicos dos materiais, equipamentos e instrumentos utilizados.

⁽²⁾ O instrumento utilizado não possui a indicação em unidade do Sistema Internacional (gray – J/kg).

4.3.1.3 Condições de reprodutibilidade

A Figura 28 mostra a geometria de ensaio para levantamento da curva de taxa de exposição por espessura de material absorvedor.

O suporte acrílico e a armação metálica do sistema de medição são posicionados inicialmente, em relação ao eixo do feixe de raios X, com orientação visual. Estes dois acessórios garantem a reprodutibilidade do posicionamento da altura da câmara de ionização e do suporte dos filtros absorvedores em relação ao diafragma e ao piso.

Figura 28. Geometria para levantamento da curva de intensidade por espessura de material absorvedor

A reprodutibilidade do posicionamento do tubo de raios X e do alinhamento da câmara de ionização com relação ao feixe de raios X é garantida pelos procedimentos relacionados nas seções 4.3.1.3.1 e 4.3.1.3.2.

4.3.1.3.1 Posicionamento do tubo de raios X

O tubo de raios X é posicionado no suporte tipo coluna com braço móvel indicado na Figura 28. Neste suporte o tubo apresenta três graus de liberdade, ilustrados na Figura 29: movimento vertical para ajuste da altura e movimento horizontal para ajuste longitudinal (representados pelas setas azuis), movimento circular perpendicular ao eixo anodo-catodo e movimento circular

paralelo ao eixo anodo-catodo (representados pelas linhas pontilhadas e setas vermelhas).

Figura 29. Graus de liberdade da cúpula radiológica montada em seu suporte de ensaio. Setas azuis indicam os movimentos longitudinal e de altura. Setas vermelhas indicam os movimentos circulares paralelo e perpendicular ao eixo anodo-catodo.

O posicionamento do tubo de raios X perpendicular ao plano vertical do sistema de medição da Figura 28 é obtido com o medidor digital de ângulos posicionado junto à janela do tubo de raios X, e atuando no movimento circular perpendicular ao eixo anodo-catodo e movimento circular paralelo ao eixo anodo-catodo.

A altura do tubo de acordo com os dados estabelecidos na seção 4.3.1.1 é obtida com o uso da régua metálica calibrada.

4.3.1.3.2 Alinhamento da câmara de ionização em relação ao feixe de raios X

O alinhamento da câmara de ionização foi efetuado com auxílio de uma filmadora digital posicionada dentro da sala radiológica e um écran posicionado sob a câmara de ionização, garantindo a irradiação de toda área da câmara na condição de feixe estreito estabelecida pela Norma IEC61267. A Figura 30 mostra o posicionamento do écran e sua sensibilização pelo feixe de raios X, capturados pela filmadora digital.

Figura 30. Posicionamento da câmara de ionização em relação ao feixe de raios X

Com o alinhamento da câmara de ionização, o suporte de filtros absorvedores, que é parte integrante do suporte acrílico de posicionamento da câmara de ionização, fica automaticamente alinhado ao feixe de raios X.

4.3.1.3.3 Preparo do gerador de alta tensão do gerador de raios X

O gerador de alta tensão do gerador de raios X foi operado no modo de fluoroscopia para que se atingisse maior estabilidade e condições mais adequadas de reprodutibilidade das medições das CSR's. Neste modo de operação, as correntes do gerador de alta tensão são reduzidas, trazendo duas vantagens: menor ondulação da alta tensão e maior tempo de irradiação aos quais o tubo pode ser submetido. Estas condições produzem menor flutuação da intensidade do feixe de raios X, possibilitando leituras em taxa com o sistema dosimétrico, reduzindo de forma significativa as incertezas associadas ao procedimento.

Para viabilizar a utilização do foco grosso no modo fluoroscopia, uma adaptação no gerador de raios X Heliophos 4B foi efetuada, individualizando os circuitos de alimentação de filamentos. A Figura 31 mostra as chaves adaptadas para operação de circuitos de foco fino e grosso separadamente no modo fluoroscopia. A desvantagem da adaptação para o modo de fluoroscopia com foco grosso é que as correntes anódicas atingidas são muito pequenas, melhorando a estabilidade, mas dificultando as leituras das taxas de exposição quando próximo dos valores relativos à 2ª CSR, principalmente nas técnicas de menor tensão de aceleração.

Como forma de garantir a reprodutibilidade das medidas, o seguinte critério para seleção de corrente foi adotado: menor corrente anódica possível em foco fino e maior corrente anódica possível em foco grosso. Isto se deve ao fato do circuito de alimentação no modo de fluoroscopia do gerador utilizado ser preparado apenas para o filamento de foco fino, que apresenta menor consumo de corrente que o filamento do foco grosso. Assim, para compensar a queda de corrente no filamento em foco grosso, esta foi levada ao máximo, aumentando a taxa de dose aplicada e viabilizando uma leitura mais estável do sistema dosimétrico.

Figura 31. Adaptação para chaveamento dos circuitos de foco fino e grosso operarem independentemente em modo de fluoroscopia

Além destas condições, a tensão máxima aplicada ao tubo de raios X, sua ondulação média, e a corrente anódica durante cada ensaio foi registrada. Com esta monitoração foi possível minimizar efeitos de variação de rede que interferem diretamente na intensidade do feixe de raios X deste gerador.

4.3.1.3.4 Método para determinação da camada semi-redutora

Diversas metodologias podem ser adotadas para a determinação da CSR's em feixes com espectro contínuo^[11,28,29], todas elas, no entanto, constituem basicamente no ajuste de uma função matemática que possa descrever o comportamento da relação entre a intensidade do feixe (ou número de fótons) de radiação X e espessura de material absorvedor.

O ajuste de funções matemáticas exige, no entanto, várias considerações relacionadas à qualidade do resultado (teste de χ^2 , avaliação de resíduos ponderados, etc.) para que se possa confiar nos resultados posteriormente interpolados. Isso normalmente demanda tempo, exige muitas vezes ferramentas complexas de ajuste e implica em maior complexidade na determinação das incertezas dos valores encontrados. Além disso, exige grande esforço na criação de metodologias que reduzam as dificuldades de padronização dos métodos.

Desta forma, a maneira encontrada para reduzir o tempo de ensaio e padronizar o método da melhor forma possível, garantindo sua reprodutibilidade nos intervalos de medição, foi o emprego de uma função de interpolação entre

dois pontos mais próximos aos valores desejados de CSR's ou espessuras equivalentes.

Este processo pode ser feito por uma interpolação linear simples ou interpolação logarítmica^[30], o que permitiu a elaboração de um programa computacional detalhado no Apêndice 3, envolvendo os dois processos de ajuste de forma fácil e rápida, garantindo a reprodutibilidade da metodologia de cálculo e ainda o tratamento das fontes de incerteza envolvidas no processo^[31,32].

Para que estes métodos apresentem valores confiáveis, no entanto, alguns critérios de levantamento da curva de atenuação do feixe de raios X devem ser adotados^[32]:

- Geometria reprodutível e que garanta a menor diferença angular possível entre os filtros e o eixo anodo-catodo do tubo de raios X;
- Refinamento nas camadas de material absorvedor (0,1 mmAl) que avizinham as taxas de exposição de interesse para determinação das CSR's;
- Uso do mesmo conjunto de filtros nos procedimentos;
- Medição dentro de um tempo razoavelmente curto para que não sejam necessárias correções de temperatura e pressão atmosférica;

Estes requisitos podem ser atendidos quando trabalhamos dentro das condições propostas no item 4.3.1.3, adotando uma sistemática de medida rápida e reprodutível, com a utilização de um mesmo conjunto de filtros (garantindo a mesma pureza e espessuras) em todo o decorrer do trabalho.

4.3.2 Dimensões dos pontos focais

Uma característica importante que está diretamente relacionada à definição da imagem que pode ser obtida com um equipamento de radiologia diagnóstica é a dimensão do ponto focal. A medição das dimensões do ponto focal é um procedimento normalmente empregado no controle de qualidade de equipamentos de raios X, e visa avaliar a conformidade das dimensões com as Normas IEC 60336^[33] e NEMA XR5^[34].

O alargamento do ponto focal está diretamente relacionado com a carga de trabalho aplicada ao tubo de raios X^[35]. Várias metodologias para a determinação das dimensões do ponto focal de tubo de raios X são empregadas na prática de controle de qualidade de equipamentos de radiologia diagnóstica, como o uso de padrões de barras e miras estelares^[34]. Estes métodos convencionais fazem uso de imagens em filmes radiográficos e normalmente estão sujeitas à interpretação do operador, além de apresentarem incertezas elevadas devido a vários fatores que compõem o processo^[35].

Nersissian (2004)^[35] propôs em sua tese de doutorado uma nova metodologia de avaliação das dimensões dos pontos focais por meio de imagens digitais obtidas de uma fenda micrométrica e de um procedimento eletrônico de cálculo. Esta alternativa proporciona maior exatidão e incertezas muito menores do que os métodos convencionalmente aplicados, além de proporcionar menor subjetividade durante a manipulação dos dados e condições de reprodutibilidade.

Neste trabalho, o método de Nersissian^[35] para medida de dimensões dos pontos focais foi empregado para que se pudessem garantir as condições de reprodutibilidade necessárias e para que fosse possível avaliar com maior sensibilidade as mudanças durante o processo de envelhecimento do tubo.

4.3.2.1 Geometria para medida do ponto focal

A geometria empregada na medição do ponto focal é ilustrada na Figura 32 a) e o sistema mecânico de alinhamento desenvolvido por Nersissian é mostrado na Figura 32 b).

a)

b)

Figura 32. a) Geometria para medida de ponto focal de um tubo de raios X; b) Sistema mecânico para alinhamento da fenda com o detector (objeto-detector)^[35].

A geometria empregada apresenta as seguintes características:

- Distância foco-objeto (foco fino/grosso): 212 mm;
- Distância foco-objeto (foco grosso): 401 mm;
- Distância objeto-detector: 427 mm.

A distância objeto detector foi fixada pela mínima distância possível de ser obtida com o sistema mecânico de alinhamento. As distâncias foco-objeto foram escolhidas para que os requisitos de magnificação de imagem de 2,0 para foco fino e grosso^[35] e adicionalmente 1,0 para foco-grosso^[33] fossem atendidos.

4.3.2.2 Materiais e instrumentos utilizados na medida de ponto focal

Os materiais e instrumentos empregados na medição das dimensões do ponto focal são indicados na Tabela 2.

Tabela 2 – Materiais, equipamentos e instrumentos utilizados nas medições das dimensões dos pontos focais.

Descrição	Marca / Modelo	Características Técnicas ⁽¹⁾
Fenda micrométrica	Industriegüter Import-export GmbH / EURO-PIN	<ul style="list-style-type: none"> • Largura: $(10 \pm 1) \mu\text{m}$ • Espessura: 1,5 mm
Dispositivo de alinhamento	Nuclear Associates – EUA	<ul style="list-style-type: none"> • Cilindro de acrílico com 55,5 mm de diâmetro e 12,1 mm de altura contendo 5 esferas de tungstênio alinhadas
Sistema mecânico de alinhamento	Desenvolvido por Nersissian ^[35]	-
Sensor CCD com software de aquisição	Sens-a-Ray	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensões: 41 x 22 x 8 mm • Área sensível: 26,0 x 17,3 mm • Matriz: 576 x 385 pixel (45 x 45 μm) • Resolução: melhor que 10 pares de linha/mm
Régua de precisão	Kawasa	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo: metálica • Comprimento: 1000 mm
Medidor digital de ângulos	Bosch / DNM 60L	<ul style="list-style-type: none"> • Faixa: 0 a 90° • Resolução: 0,01°

⁽¹⁾ Dados obtidos dos manuais técnicos dos materiais, equipamentos e instrumentos utilizados.

O dispositivo de alinhamento do sistema em relação ao tubo de raios X consiste de um cilindro de acrílico de 55,5 mm de diâmetro por 12,1 mm de altura, formado por cinco esferas de tungstênio, quatro delas posicionadas como vértices de um quadrado em uma das faces do cilindro e a quinta, na outra face, centralizada em relação a elas. O dispositivo foi perfurado nas posições de 0° e 90° com a finalidade de posicioná-lo na parte superior do sistema mecânico de alinhamento^[35]. O dispositivo marca Nuclear Associates – EUA é ilustrado na Figura 33.

Figura 33. Dispositivo de alinhamento Nuclear Associates - EUA, utilizado para o alinhamento do sistema de medição das dimensões dos pontos focais^[35].

4.3.2.3 Condições de reprodutibilidade

4.3.2.3.1 Alinhamento do sistema

O sistema mecânico garante a reprodutibilidade do posicionamento da altura da fenda em relação ao sensor digital CCD. Para o posicionamento do tubo de raios X segue-se o mesmo critério estabelecido na seção 4.3.1.3.1, com a altura para se atingir as condições da seção 4.3.2.1 estabelecida com auxílio da régua calibrada. A garantia do alinhamento do sistema mecânico em relação ao tubo de raios X é obtida por uma metodologia que emprega o dispositivo ilustrado na Figura 33.

4.3.2.3.2 Critério da técnica radiográfica utilizada

Para que o contraste obtido nas imagens digitais fosse o mais parecido possível nas medidas efetuadas entre os intervalos de aplicação de carga, algumas técnicas com tensão, produto corrente-tempo e corrente anódica foram selecionadas para aplicação durante o procedimento de medidas:

- Foco fino – Imagem Ortogonal: 85 kV/25 mAs/80 mA
- Foco fino – Imagem Paralela: 85 kV/20 mAs/80 mA
- Foco grosso – Imagem Ortogonal: 102 kV/25 mAs/80 mA
- Foco grosso – Imagem Paralela: 102 kV/20 mAs/320 mA

Mesmo com este critério, devido à variação nos parâmetros durante aplicação de carga, como abordado na seção 4.1.1, variações nos contrastes das imagens são inevitáveis e foram investigadas para que pudessem ser estimadas suas influências na reprodutibilidade e incerteza do método.

4.3.2.4 Adaptação do método de medida de ponto focal

O método estabelecido por Nersissian utiliza a metade do comprimento da imagem digital obtida com uso da fenda^[33,34] para o traçado de um perfil no sentido da largura da imagem obtida. Isto implica em remover da imagem uma matriz coluna (vetor), e com os dados desta matriz coluna efetua-se o ajuste de uma função gaussiana dupla por meio de um procedimento eletrônico. Esta metodologia é razoável na prática de controle de qualidade, no entanto, produz resultados com incertezas grandes, mesmo que ainda muito melhores que resultados obtidos por imagens radiográficas. Esse fato infelizmente compromete as condições de reprodutibilidade necessárias para os objetivos deste trabalho.

Desta forma, uma adaptação do procedimento eletrônico desenvolvido foi efetuada, removendo-se da imagem digital obtida com uso da fenda uma sub-matriz mais abrangente, e deduzindo desta um vetor de valores médios das intensidades para posterior ajuste da função que descreve o perfil da imagem. Este procedimento utiliza uma amostragem maior de pixels, produzindo redução da incerteza na determinação do perfil da imagem, melhoria das condições de reprodutibilidade e facilita ainda a remoção do ruído atribuído ao fundo da imagem digital capturada.

4.3.3 Medida não-invasiva do PPV

4.3.3.1 Medidores não invasivos de tensão de aceleração

Medidores não invasivos de tensão de aceleração são instrumentos empregados na prática de controle de qualidade, manutenção e calibração de equipamentos radiológicos. Estes instrumentos são capazes de medir a tensão de aceleração do tubo de raios X de maneira não invasiva, por meio da interposição no feixe de raios X. Isto é possível pela aplicação de diferentes filtrações em seus sensores de radiação (fotodiodos), que produzem assim diferentes potenciais para um mesmo feixe incidente. Pela aplicação de um fator de calibração à diferença de potencial medida nestes sensores, é possível determinar a diferença de potencial elétrico aplicada ao tubo de raios X.

Um grande número de grandezas foi definido e amplamente empregado para determinação do potencial aplicado ao tubo de raios X, no

entanto uma padronização destes parâmetros entre os diversos fabricantes dos medidores não invasivos nunca foi possível, o que sempre dificultou a rastreabilidade metrológica e a padronização no trabalho com estes instrumentos. Desde a publicação da Norma IEC61676 em 2002, estes medidores devem apresentar valores de tensão de aceleração em PPV^[3,4], o que requer inclusão de novas rotinas de cálculo, já que os vários outros parâmetros normalmente apresentados pelos medidores comercialmente disponíveis continuam sendo empregados. Devido ao PPV ser determinado com base na forma de onda da tensão aplicada ao tubo de raios X, no entanto, as saídas digitais ou analógicas disponíveis nestes instrumentos podem ainda ser acopladas a sistemas de aquisição de dados e processadas para o cálculo do PPV.

Normalmente, os medidores não invasivos de alta tensão apresentam baixa dependência com a filtração total do feixe, sendo assim, pouco sensíveis a alterações significativas no espectro de radiação. Numa faixa de 1,5 a 4,0 mmAl a variação percentual máxima observada para energias do feixe entre 60 e 150 kV é menor que 2%^[36]. No entanto, o envelhecimento do tubo de raios X pode provocar alterações de espectro diferente das alterações provocadas pela interposição de filtros de alumínio na simulação do aumento da filtração total^[6].

Um dos pontos importantes da avaliação do envelhecimento do tubo de raios X é sua influência nos instrumentos utilizados em controle de qualidade. Conforme mencionado no capítulo 1, esta influência pode ser determinante no incremento de erros de acordo com simulações já estudadas anteriormente^[6]. Um dos objetivos da medida do PPV por meio de medidores não invasivos^[5] é compreender melhor a real influência do envelhecimento do tubo de raios X no resultado das medições com estes instrumentos.

A calibração de medidores não invasivos de tensão de aceleração utiliza como padrão de referência um divisor de alta tensão invasivo^[5], conforme descrito na seção 4.2.1.1.

4.3.3.2 Geometria utilizada para medição não invasiva do PPV

A geometria utilizada para medição não invasiva do PPV é bastante simples, e requer apenas que as condições de referência de distância e taxa de dose estabelecidas pelo fabricante do medidor não invasivo sejam respeitadas. Para o medidor não invasivo utilizado, as seguintes condições devem ser atendidas^[5]:

- Taxa de dose entre 20 e 200 mGy/s;
- Distância foco-detector entre 32 e 60 cm;

Com auxílio de uma câmara de ionização e uma régua calibrada foi possível estabelecer se as técnicas empregadas para a medição não invasiva do PPV estariam dentro das prescrições estabelecidas. Assim, a seguinte geometria foi encontrada para que estes requisitos pudessem ser cumpridos:

- Distância ponto focal - colimador: 12 cm;
- Distância ponto focal – medidor: 50 cm (Foco Fino) e 75.5 cm (Foco Grosso);

Para estar em conformidade com estas condições os seguintes produtos corrente-tempo foram estabelecidos:

- Técnicas em foco fino: 25 mAs (80 mA);
- Técnicas em foco grosso: 64 mAs (320 mA).

4.3.3.3 Materiais e instrumentos utilizados para medição não invasiva do

PPV

A geometria estabelecida para a medida do PPV exige a utilização dos materiais, equipamentos e instrumentos indicados na Tabela 3.

Tabela 3 – Materiais, equipamentos e instrumentos utilizados nas medições não invasivas do PPV.

Descrição	Marca / Modelo	Características Técnicas ⁽¹⁾
Divisor de alta tensão invasivo	Radcal / Dynalyzer III	<ul style="list-style-type: none"> Razão (anodo + catodo): 20000:1 Exatidão por canal: 0,1 % Resposta em frequência: ≈ 1 até 10 kHz
Sistema de aquisição (Figura 24)	-	<ul style="list-style-type: none"> Resolução: 8 bits (tensão de referência 0 a 5 Vdc) – 19,6 mV Frequência de amostragem: 7 kHz (10 kS)
Osciloscópio digital	Tektronix / TDS5104	<ul style="list-style-type: none"> Frequência de amostragem: 62,5 kHz (25 kS) Resolução: 0,1 mV
Medidor não invasivo de tensão de tubos de raios X	Radcal / 9095 com detector 4082	<ul style="list-style-type: none"> Saída analógica 50 kV / 1 V Exatidão: 1%
Armação metálica para ensaio	Fabricado no IEE-USP	-
Régua de precisão	Kawasa	<ul style="list-style-type: none"> Tipo: metálica Comprimento: 1000 mm
Medidor digital de ângulos	Bosch / DNM 60L	<ul style="list-style-type: none"> Faixa: 0 a 90° Resolução: 0,01°
Diafragmas de chumbo superpostos	Fabricados no IEE/USP	<ul style="list-style-type: none"> 3 mmPb Dimensões diafragma 1: abertura 70 mm Dimensões diafragma 2: abertura 90 mm
Colimador de chumbo tipo fenda (diafragma)	-	<ul style="list-style-type: none"> Espessura: 13 mm Dimensões da abertura: 61 x 15 mm
Filmadora digital	Sony / Digital HIPER HAD	<ul style="list-style-type: none"> Comunicação protocolo TCP-IP
Câmara de ionização	Radcal Corporation - 10X5-6	<ul style="list-style-type: none"> Volume: 6 cm³ Resolução: 0,5% ou 0,01 μGy Dependência pela taxa de dose: $\pm 5\%$, (3,5 μGy/s até 0,7Gy/s) Dependência energética: $\pm 5\%$, (20 keV até 1300 keV)
Monitor da câmara de ionização	Radcal Corporation – 1515	<ul style="list-style-type: none"> Faixa de taxa de exposição: 0,01 mR/h a 180 kR/min ⁽²⁾

⁽¹⁾ Dados obtidos dos manuais técnicos dos materiais, equipamentos e instrumentos utilizados.

⁽²⁾ O instrumento utilizado não possui a indicação em unidade do Sistema Internacional (gray – J/kg).

Para medição do PPV foi utilizado um sistema de referência, consistindo de um divisor de alta tensão invasivo, de acordo com as recomendações da Norma IEC 61676, detalhado na seção 4.2.1.1. Ao sistema de referência foram conectados dois sistemas de aquisição de dados

simultaneamente, o sistema de aquisição de dados desenvolvido, detalhado na seção 4.2.1.2 e um sistema de referência empregado na calibração de medidores não invasivos. Este sistema de aquisição de referência consiste num osciloscópio digital Tektronix TDS5104 com rastreabilidade pela Rede Brasileira de Calibração (RBC). O medidor não invasivo empregado na medida do PPV foi um Radcal 9095 com detector 4082, que não apresenta incerteza relacionada ao erro indicado em seu certificado de calibração.

Os dados foram coletados simultaneamente em três sistemas: medidor não invasivo com sistema de aquisição de referência, divisor de alta tensão invasivo com sistema de aquisição de referência e divisor de alta tensão invasivo com sistema de aquisição desenvolvido. A Figura 34 mostra a conexão dos sistemas.

Figura 34. Conexão dos sistemas de aquisição ao equipamento de raios X.

A medição com o sistema desenvolvido permitiu avaliar o desempenho deste para o trabalho com o gerador monofásico de dois pulsos com relação à taxa de amostragem, número de amostras e resolução em tensão.

4.3.3.4 Condições de reprodutibilidade

4.3.3.4.1 Alinhamento do sistema

A armação metálica do sistema de medição, a exemplo da medição das CSR's, garante a reprodutibilidade do posicionamento da altura do instrumento em relação ao diafragma. Nenhuma exigência se faz para a distância do instrumento em relação ao piso, mas esta reprodutibilidade também é garantida aqui.

Para o posicionamento do tubo de raios X segue-se o mesmo critério estabelecido na seção 4.3.1.3.1, com a altura para se atingir as condições da seção 4.3.3.2 estabelecida com auxílio da régua calibrada. O alinhamento do sensor do medidor não invasivo em relação ao feixe de raios X é efetuado com auxílio da filmadora digital como na seção 4.3.1.3.2. A Figura 35 mostra o alinhamento do detector com auxílio da filmadora digital e écran.

Figura 35. a) alinhamento sobre écran com sala iluminada; b) visualização do alinhamento por meio de irradiação da área de interesse, em sala escura, com auxílio do écran.

Este alinhamento garante a irradiação da área sensível do detector dentro da geometria estabelecida.

4.3.3.4.2 Critérios para aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados desenvolvido foi calibrado inicialmente e verificado durante os intervalos de aplicação de carga para que fosse possível avaliar seu comportamento durante o período de utilização. O procedimento de calibração é descrito no Apêndice 1.

No caso do sistema de aquisição de dados de referência, medidor de tensão de aceleração não invasivo e divisor de alta tensão invasivo, as calibrações ocorrem de forma periódica, atendendo aos requisitos metrológicos aos quais está sujeito o laboratório da Seção Técnica de Desenvolvimento Tecnológico em Saúde do IEE/USP, onde os mesmos estão alocados. Além deste fato, nenhum ajuste foi efetuado nestes instrumentos durante o período de aplicação de cargas ao tubo de raios X e medição de parâmetros. Mesmo com essas condições, para que fosse possível garantir a reprodutibilidade dos dados coletados com o sistema de aquisição de referência (Osciloscópio Tektronix TDS 5104), o seguinte critério de configuração do mesmo foi estabelecido:

- Frequência de aquisição: 62,5 kS/s;
- Número de amostras: 25000;
- escala 500 mV/div para as tensões de 40 a 70 kV;
- escala 1 V/div para as tensões de 80 a 100 kV.

Estas condições foram estabelecidas tanto para as medições em foco fino como para as medições em foco grosso.

4.3.3.4.3 Método para o cálculo do PPV

O método para o cálculo do PPV é estabelecido pela Norma IEC 61676. Este método exige o processamento matemático de todas as formas de onda de tensão de aceleração coletada pelos sistemas de aquisição descritos na seção 4.3.3.3, levando em conta os fatores de calibração de cada componente deste sistema. Para que fosse possível viabilizar o cálculo do PPV de acordo com a Norma IEC 61676, em um número elevado de formas de ondas, garantindo condições de reprodutibilidade, foi necessário o desenvolvimento de um programa computacional que pudesse processar esta informação e auxiliasse ainda na determinação da exatidão dos sistemas envolvidos. O programa é detalhado no Apêndice 4.

4.3.4 Espectrometria de raios X

A espectrometria consiste em sua essência na medição da distribuição de energia de um feixe de radiação incidente^[37]. Neste trabalho, a radiação incidente é proveniente de um tubo de raios X para diagnóstico, descrito na seção 4.1.2. Para esta finalidade, duas características são fundamentais na escolha de um detector adequado para a espectrometria: resolução em energia e eficiência.

A resolução em energia é a capacidade de o detector discriminar energias provenientes de uma fonte de radiação. Esta resolução de um detector é definida como a largura à meia altura de um fotopico (FWHM) dividida pela localização de seu centróide (H_0) em um espectro diferencial, considerando o fotopico proveniente de uma fonte monoenergética. Desta forma, a resolução em energia de um detector é adimensional e é normalmente expressa em valores percentuais^[37].

Os detectores de radiação, em princípio, irão originar um pulso de saída para cada quantum de radiação incidente que interage com seu volume ativo^[37]. No entanto, esta eficiência na coleção de cargas por parte do detector não é idealmente atingida, devido a vários fatores limitantes. Com isso, a eficiência é normalmente menor que 100%, o que leva à necessidade de correção da eficiência do detector em sua aplicação prática para reconstrução do espectro original.

Para o propósito da espectrometria de raios X, normalmente são utilizados detectores de semicondutores como Germânio ou Silício, que apresentam boa resolução em energia e boa eficiência de detecção. No entanto, estes detectores exigem uma estrutura física considerável para que possam ser empregados, incluindo refrigeração por meio de nitrogênio líquido. Com estas limitações, surgiram detectores mais compactos como os detectores de Telureto de Cádmio e Zinco (CZT) e Telureto de Cádmio (CdTe), que vêm sendo amplamente utilizados onde a disponibilidade e estrutura para utilização de detectores de germânio hiperpuro (HPGe) é inviável. Estes detectores apresentam eficiência relativamente alta e bom comportamento quando utilizados em espectrometria de feixes de raios X na faixa de energia de diagnóstico^[38]. Apesar de algumas desvantagens como maior fragilidade e menor resolução em energia, a portabilidade e a não necessidade de resfriamento com nitrogênio líquido são características que tornam seu uso mais simples que o HPGe.

4.3.4.1 Considerações iniciais para medida de espectros

Para que fosse possível estabelecer uma metodologia que viabilizasse a avaliação das diferenças de comportamento espectral relacionadas à carga de trabalho aplicada ao tubo de raios X, um mapeamento da variação de espectros no eixo paralelo ao eixo anodo-catodo foi realizado. Esta avaliação foi feita sem colimação do feixe emergente e sem filtrações adicionais para que fosse possível ter maior sensibilidade na detecção dos espectros.

Uma idéia inicial do comportamento das intensidades do feixe pode ser obtida por simulação pelo método de Monte Carlo GEANT4^[39], do conjunto emissor de raios X, dentro da geometria inicialmente proposta, para que se pudesse estabelecer um ponto de partida para o alinhamento dentro dos ângulos

de incidência do feixe emergente, delimitando as medições dentro da área não comprometida pelo efeito *Heel* ou penumbras causadas pelos materiais constituintes da janela da cúpula de raios X. Os resultados podem ser verificados na Figura 36.

Figura 36. Simulação da projeção das intensidades (densidade de energia dos fótons), obtido por meio de simulação pelo método de Monte Carlo GEANT4 do tubo de raios X com alvo de 12°, com tensão de aceleração de 50 kV. Eixos com escala em mm.

Esta avaliação preliminar orientou uma metodologia de varredura dos espectros em alguns ângulos mais representativos das variações de intensidades do feixe. Os dados coletados nesta configuração inicial de trabalho serviram para estabelecer as técnicas aplicadas na medição de cada espectro, obedecendo aos limites de detecção do espectrômetro utilizado.

O interesse particular da avaliação no eixo paralelo ao eixo anodo-catodo se dá pelo fato do efeito *Heel*^[13] poder ser detectado neste eixo, delimitando assim a geometria de medida com o espectrômetro na região anterior a este efeito.

Para esta medição inicial, a distância de 3 metros em relação ao ponto-focal foi escolhida, levando em conta o espaço disponível do laboratório e o controle de intensidade de corrente permitido pela máquina, associado ao conjunto de colimadores disponível no sistema espectrométrico associado. A Figura 37 ilustra o plano inicial de medida de espectros.

Figura 37. Plano inicial de referência para determinação dos pontos para espectrometria de raios X.

Para viabilizar o levantamento de espectros de forma contínua, sem a necessidade de constantes paralisações do sistema espectrométrico devido às altas taxas produzidas pelo gerador no modo radiográfico, este foi configurado para operar no modo de fluoroscopia, da mesma forma como estabelecido na seção 4.3.1.3.3.

Na varredura dos espectros medidos no eixo anodo-catodo, algumas posições relativas a diferentes ângulos de incidência do feixe de raios X puderam ser avaliadas. Estas informações levaram à escolha da geometria final adotada neste trabalho para medida de espectros.

4.3.4.2 Geometria para medida de espectros

Com os dados iniciais apresentados na seção 4.3.4.1 foi possível estabelecer a seguinte geometria para medida de espectros:

- Feixe central;
- Lado do cátodo: 7,6° em relação ao feixe central;
- Lado do ânodo: 5,7° em relação ao feixe central.

A Figura 38 mostra a disposição da geometria para medida de espectros. O conjunto emissor de raios X foi posicionado com o ponto-focal a 1 metro do chão conforme indicado na Figura 38 a) pela seta vermelha, com sua janela centralizada pelo laser posicionado no fundo da sala de ensaios (indicado pela seta azul na Figura 38 b). A Figura 38 ilustra ainda o plano de referência colado junto ao piso do laboratório (indicado pelas setas verdes), utilizado para garantir a reprodutibilidade do alinhamento como será detalhado na seção 4.3.4.4.

a)

b)

Figura 38. Geometria para espectrometria de raios X: a) Vista do conjunto emissor de raios X (seta vermelha) alinhado com o plano de referência (seta verde); b) Vista do detector do espectrômetro (seta amarela) alinhado com o plano de referência (seta verde) e o laser de referência ao fundo do laboratório (seta azul).

4.3.4.3 Materiais e instrumentos utilizados para medição de espectros

Para se garantir a geometria e condições de reprodutibilidade do alinhamento e parâmetros do gerador de alta tensão, foram utilizados os materiais, equipamentos e instrumentos indicados na Tabela 4.

Tabela 4 – Materiais, equipamentos e instrumentos utilizados nas medições de espectros.

Descrição	Marca / Modelo	Características Técnicas ⁽¹⁾
Espectrômetro CdTe	AMPTEK / XR-100T-CdTe	<ul style="list-style-type: none"> Detector: diodo CdTe (3 x 3 mm) Pré – Amplificador: 0.82 mV/keV
Analizador multicanal	AMPTEK / MCA8000A	<ul style="list-style-type: none"> 16k canais de aquisição, linearidade integral 0,02%, linearidade diferencial 0,6%
Amplificador condicionador de sinal para espectrômetro	AMPTEK / PX2T	<ul style="list-style-type: none"> Sensibilidade: 6 a 60 mV/keV
Conjunto de colimadores	AMPTEK	<ul style="list-style-type: none"> Colimadores de tungstênio com aberturas de 100, 200, 400, 700 e 2000 μm Colimador de cobre e chumbo de 3 mm
Divisor de alta tensão invasivo	Radcal / Dynalyzer III	<ul style="list-style-type: none"> Razão (anodo + catodo): 20000:1 Exatidão por canal: 0,1 % Resposta em frequência: ≈ 1 até 10 kHz
Osciloscópio digital	Tektronix / TDS5104	<ul style="list-style-type: none"> Frequência de amostragem: 62,5 kHz (25 kS) Resolução: 0,1 mV
Régua de precisão	Kawasa	<ul style="list-style-type: none"> Tipo: metálica Comprimento: 1000 mm
Medidor digital de ângulos	Bosch / DNM 60L	<ul style="list-style-type: none"> Faixa: 0 a 90° Resolução: 0,01°
Trena eletrônica	Bosch / DLE 150	<ul style="list-style-type: none"> Faixa: 0,3 a 150 m Resolução: 0,001 m
Nível de bolha e prumo	-	-
Laser para alinhamento	-	Posicionado a 1 m do piso no fundo do laboratório (Figura 38 b)
Plano de orientação	-	Posicionado no piso do laboratório (Figura 38)

⁽¹⁾ Dados obtidos dos manuais técnicos dos materiais, equipamentos e instrumentos utilizados.

4.3.4.4 Condições de reprodutibilidade

A reprodutibilidade da espectrometria de raios X é baseada essencialmente no alinhamento do sistema no laboratório de ensaios e na seqüência de programação e monitoramento dos parâmetros de aplicação de carga. O alinhamento do sistema é a parte mais trabalhosa do procedimento de espectrometria de raios X, consistindo basicamente no posicionamento e alinhamento do plano de referência, alinhamento do conjunto emissor de raios X em relação ao plano de referência e ao fundo do laboratório de ensaios, alinhamento do detector do espectrômetro em relação ao conjunto emissor de raios X e plano de referência e alinhamento dos colimadores no detector.

4.3.4.4.1 Plano de referência

O primeiro passo para o alinhamento do sistema é o posicionamento do plano de orientação dos ângulos de referência. Este plano consiste num diagrama impresso, fixado ao piso do laboratório. A fixação é orientada pelo laser posicionado ao fundo do laboratório, com auxílio de cilindros acrílicos que funcionam como lentes para projeção do laser em linha no piso. A orientação do plano é mostrada na Figura 39.

Figura 39. Figura ilustrativa da projeção do laser no piso e parede do laboratório de ensaio com auxílio da lente cilíndrica. A projeção no piso é utilizada para alinhar o diagrama geométrico de medição de espectros.

Para que a linha traçada pelo laser coincida com o centro da sala, um anteparo no fundo da sala (alvo traçado com auxílio de um prumo) com marcação paralela à projeção da linha é utilizado para auxiliar o posicionamento do cilindro acrílico. Com o plano alinhado inicialmente, marcações foram efetuadas no mesmo e no piso, para que a reprodutibilidade do alinhamento deste plano nas medidas subseqüentes pudesse ser reproduzida com maior confiabilidade. Já que estas medidas podem ser consideradas relativas a partir da primeira, esta prática garantiu a reprodutibilidade das medições posteriores, eliminando os erros de posicionamento associados ao uso da metodologia inicial de projeção de linha central no laboratório.

4.3.4.4.2 Conjunto emissor de raios X

O segundo passo no processo de alinhamento é alinhar o tubo paralelamente ao fundo do laboratório, a 1 metro do chão, utilizando como orientação o plano de referência por meio de prumo fixado junto ao ponto focal, o feixe do laser, a trena eletrônica e o medidor digital de ângulos. Este alinhamento é de difícil reprodutibilidade e segue alguns passos detalhados a seguir.

Primeiramente é efetuado um posicionamento inicial do conjunto emissor de raios X junto ao plano de referência com auxílio do prumo fixado na marcação de ponto focal da parte inferior da cúpula radiológica. A Figura 40 ilustra o alinhamento do conjunto emissor de raios X com o plano de referência fixado ao piso, com o detalhe do auxílio do prumo e de uma das marcações de referência para alinhamento do plano junto ao piso (linha tracejada vermelha). O alinhamento ainda é auxiliado pelo posicionamento do centro da janela da cúpula radiológica com o laser de referência, como mostra a seta vermelha na Figura 40.

Figura 40. Alinhamento do conjunto emissor de raios X em relação ao plano de referência com detalhe do prumo e marcação de referência.

Após o alinhamento inicial, um alinhamento horizontal com auxílio do medidor digital de ângulos é efetuado em dois graus de liberdade possíveis como mostra a Figura 41.

Figura 41. Alinhamento horizontal do conjunto emissor de raios X.

Com o alinhamento horizontal estabelecido, um posicionamento mais fino do ponto focal do tubo de raios X a um metro do piso com auxílio do feixe laser é efetuado, centralizando o tubo de raios X com auxílio dos parafusos de fixação da janela que estão alinhados paralela e perpendicularmente ao eixo anodo-catodo do tubo de raios X segundo sua fixação na cúpula radiológica. O feixe laser incidindo no centro da janela pode ser visualizado na Figura 40.

Depois do alinhamento horizontal e centralização inicial, é necessário efetuar o alinhamento paralelo ao fundo do laboratório. Esse alinhamento é efetuado com auxílio de uma trena eletrônica orientada a parede do fundo do

laboratório, com sua base apoiada nas extremidades opostas do eixo anodo-catodo da cúpula radiológica. A Figura 42 mostra o posicionamento da trena eletrônica em uma das extremidades.

Figura 42. Alinhamento do conjunto emissor de raios X paralelo ao fundo do laboratório de ensaios.

O ajuste é efetuado manualmente em todas estas etapas, com auxílio da instrumentação apresentada. Depois deste alinhamento paralelo é necessário um reajuste do alinhamento junto ao plano de referência com auxílio do prumo e laser, combinado com reajustes do posicionamento paralelo ao fundo do laboratório.

4.3.4.4.3 Detector do espectrômetro

Concluído o alinhamento do conjunto emissor de raios X um terceiro passo é efetuado, o alinhamento do detector do espectrômetro. O espectrômetro apresenta-se montado em uma caixa de aço inoxidável, com seu elemento detector envolvido por um cilindro de aço em forma de ponta conforme mostra o desenho da Figura 43. Esta ponta irá suportar e posicionar os colimadores de tungstênio e o colimador de cobre e chumbo.

Este alinhamento é auxiliado por um prumo alinhado com a posição do detector dentro da ponta de aço. O prumo irá ajudar a orientar o espectrômetro nas diversas posições de medida central e em ângulos. O alinhamento do espectrômetro em relação ao plano horizontal é auxiliado por um nível de bolha em forma de mira. A Figura 43 mostra o posicionamento da linha do prumo alinhada com o posicionamento do detector na ponta de aço (indicado pela

marcação com um ponto vermelho na ponta – seta vermelha) e o nível de bolha posicionado sobre o conjunto do detector do espectrômetro.

Figura 43. Alinhamento do detector do espectrômetro: a) Linha do prumo alinhada com a marcação do centro da janela do detector; b) Nível de bolha sobre o conjunto do detector do espectrômetro para alinhamento no plano vertical.

A Figura 44 mostra os pontos vermelhos marcados na lateral do conjunto do detector que representam o posicionamento do centro do detector dentro do conjunto e são utilizados para ajuste da altura do detector (a 1 metro do piso) com auxílio da régua calibrada.

Figura 44. Alinhamento do detector do espectrômetro: Detalhe das marcas de referência para altura.

Na parte superior do conjunto do detector foram marcados pontos de referência para a orientação do centro deste com o ponto focal do tubo de raios X. Estes pontos são marcados com base no eixo central do detector (Figura 45 – setas vermelhas). A orientação é obtida por um fio (Figura 45 – seta azul) fixado ao ponto focal do conjunto emissor de raios X e esticado sobre estes pontos, promovendo um alinhamento confiável e reproduzível nas diversas posições pertinentes.

Figura 45. Alinhamento do detector do espectrômetro: Detalhe das marcas de referência superiores e linha.

Com estes recursos é possível: direcionar o detector ao ponto focal do tubo de raios X em qualquer ângulo; estabelecer a coincidência de alturas do detector e ponto focal; garantir o ângulo desejado para medida. A Figura 46 mostra o auxílio do prumo para obtenção de posições de medida no centro do feixe e em ângulo.

Figura 46. Alinhamento do detector do espectrômetro em relação ao plano de referência com auxílio do prumo.

4.3.4.4 Posicionamento dos colimadores

Para que todos os espectros fossem obtidos com a mesma geometria, adotou-se o posicionamento dos colimadores na ponta de aço do detector seguindo o seguinte critério:

- Colimador de 2000 μm no fundo da ponta de aço, junto à janela do detector;
- Colimador de cobre e chumbo a frente do colimador de 2000 μm ;
- Colimadores empregados em cada técnica de espectrometria posicionados na parte frontal da ponta de aço.

A troca dos colimadores frontais foi combinada com cada técnica selecionada no gerador de alta tensão do gerador de raios X. Cada troca de colimadores frontais durante o procedimento de espectrometria requer a remoção da tampa frontal da ponta de aço, sendo necessária uma verificação do alinhamento do sistema após cada troca para garantia da reprodutibilidade.

4.3.4.4.5 Preparo do gerador de alta tensão do gerador de raios X

Conforme discutido na seção 4.3.4.1, o gerador foi operado no modo fluoroscopia com os seguintes critérios para aplicação de cargas:

- Seleção da tensão de pico disponível no gerador de alta tensão;
- Ajuste da corrente anódica aplicada em cada tensão para cada configuração de ensaio, buscando atingir o mesmo valor máximo do potencial aplicado ao tubo de raios X, a mesma ondulação da alta tensão e taxa de contagem do detector;

Este procedimento foi auxiliado pelo uso do Divisor de alta tensão invasivo e do osciloscópio digital. Com estes dados combinados com a seleção de colimadores foi possível estabelecer um diagrama da configuração do sistema para cada medida de espectro. Este diagrama é representado pela Tabela 5 para foco fino e Tabela 6 para foco grosso.

Tabela 5 – Configurações do sistema de espectrometria – Foco Fino.

kV	mA	Alinhamento (°)	Col. Front. (um)	Contagem	kV medido	Ondulação (kV)
40	2,0	0	200	540	39,2	11,8
50	1,5	0	200	1100	49,9	7,8
60	1,3	0	200	1300	60,0	6,5
70	2,0	0	100	650	69,1	10,5
80	2,0	0	100	760	79,0	10,1
90	1,8	0	100	680	88,2	6,9
100	1,8	0	100	900	97,4	7,3
110	2,0	0	100	1250	110,2	8,4
40	3,0	7,6 (Catodo)	200	750	38,2	16,8
50	1,5	7,6 (Catodo)	200	1108	49,4	8,0
60	3,0	7,6 (Catodo)	100	850	59,0	17,4
70	2,5	7,6 (Catodo)	100	1080	68,4	14,0
80	2,0	7,6 (Catodo)	100	1080	78,4	9,6
90	1,6	7,6 (Catodo)	100	854	88,0	6,8
100	1,9	7,6 (Catodo)	100	1090	97,6	6,8
110	2,0	7,6 (Catodo)	100	1500	109,2	7,6
40	3,0	5,7°(Anodo)	200	550	37,9	16,5
50	1,5	5,7°(Anodo)	200	730	49,0	8,6
60	3,5	5,7°(Anodo)	100	645	59,4	20,2
70	2,5	5,7°(Anodo)	100	589	69,1	13,9
80	2,0	5,7°(Anodo)	100	588	79,2	10,0
90	2,0	5,7°(Anodo)	100	855	88,8	9,6
100	2,0	5,7°(Anodo)	100	950	98,4	8,4
110	1,8	5,7°(Anodo)	100	1100	109,2	7,6

Tabela 6 – Configurações do sistema de espectrometria – Foco Grosso.

kV	mA	Alinhamento (°)	Col. Front. (um)	Taxa	kV medido	Ondulação (kV)
40	0,6	0	400	422	39,8	2,5
50	0,8	0	400	800	50,1	2,4
60	0,8	0	400	800	60,1	1,7
70	0,8	0	400	877	69,4	1,8
80	1,0	0	400	913	78,5	1,7
90	1,0	0	400	630	89,4	1,6
100	1,1	0	400	650	99,0	1,2
110	1,3	0	400	1000	110,6	1,4
40	0,6	7,6 (Catodo)	400	363	40,8	2,5
50	0,8	7,6 (Catodo)	400	807	49,8	2,5
60	0,8	7,6 (Catodo)	400	990	61,5	1,7
70	0,9	7,6 (Catodo)	200	606	68,8	2,6
80	1,0	7,6 (Catodo)	200	855	78,8	2,6
90	1,2	7,6 (Catodo)	200	1130	87,2	3,8
100	1,1	7,6 (Catodo)	200	1090	98,4	2,2
110	1,3	7,6 (Catodo)	200	1030	112,0	2,4
40	0,5	5,7°(Anodo)	400	289	40,7	2,1
50	0,8	5,7°(Anodo)	400	650	50,7	2,2
60	0,8	5,7°(Anodo)	400	690	60,9	1,8
70	0,8	5,7°(Anodo)	400	698	69,2	1,7
80	0,9	5,7°(Anodo)	400	888	78,8	1,7
90	1,0	5,7°(Anodo)	400	899	88,2	1,3
100	1,1	5,7°(Anodo)	400	763	97,4	1,4
110	1,3	5,7°(Anodo)	400	890	109,8	1,4

Dentro das flutuações do sistema gerador de alta tensão, foi possível selecionar cada técnica abordada. Flutuações de rede durante o processo de levantamento de espectros, no entanto, não puderam ser controladas, uma vez que este controle só pode ser efetuado manualmente e durante a aplicação de carga não é possível atuar no sistema do gerador de alta tensão.

4.3.4.4.6 Calibração em energia e correção dos espectros

Espectrômetros empregados em detecção de radiação apresentam normalmente resultados em espectros diferenciais^[37], onde são indicadas contagens de eventos por canais. Normalmente a informação que se pretende extrair dos resultados é a intensidade de fótons detectados em função da energia. Para isso é necessário realizar calibrações do espectrômetro, tanto em relação à correspondência entre canal e energia (calibração de energia), quanto em relação à intensidade detectada (calibração de eficiência).

A calibração em energia do espectrômetro consiste em estabelecer a relação de canais com energia em keV de acordo com o ganho selecionado no instrumento. Para que a calibração seja efetuada, são empregadas fontes radioativas padrão, com espectros de energia conhecidos, abrangendo a faixa de energia que se deseja efetuar o levantamento dos espectros. Com a relação canal-energia é possível estabelecer uma curva de calibração do espectrômetro. O estabelecimento desta relação é dado por cada fotopico relevante que pode ser ajustado por meio de interpolação de funções analíticas que levam também em conta efeitos de má coleção de cargas dos detectores^[40,41,42]. A padronização do método de calibração para o estabelecimento de um procedimento foi possível por meio de programa computacional capaz de processar os ajustes dos fotopicos dentro de um critério de reprodutibilidade^[43]. Neste trabalho foram utilizadas fontes de ²⁴¹Am, ¹³³Ba e ¹⁵²Eu para realizar as calibrações de energia. Utilizou-se o método dos mínimos quadrados para ajustar uma função linear do tipo:

$$Energia = a_0 + a_1 \times canal \quad (4.2)$$

Após a calibração em energia, realiza-se a correção dos espectros para que se possam avaliar alguns parâmetros quantitativos provenientes dos espectros como energia média e camadas semi-redutoras. Usualmente os espectros são corrigidos pela função de resposta obtida com o levantamento da curva de eficiência intrínseca do detector^[37] para uma faixa de energia de interesse. Este processo, conhecido como *stripping*^[38], não contempla a propagação de erros necessária para que se possa quantificar parâmetros obtidos do espectro reconstruído, ou corrigido. Para atender a este requisito, foi empregado neste trabalho um processo de correção dos espectros utilizando o método dos mínimos quadrados.

Segue-se uma descrição resumida do processo de correção dos espectros empregado. Maiores detalhes podem ser encontrados no trabalho de Moralles et al. (2006)^[44].

Um espectro produzido pelo sistema de aquisição multicanal pode ser representado pelo vetor $\mathbf{d} = d_1, d_2, \dots, d_n$, e está relacionado ao espectro discreto das fontes de radiação, $\mathbf{s} = s_1, s_2, \dots, s_m$, pela expressão:

$$\mathbf{d} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{s} \quad (4.3)$$

onde $\mathbf{R}$ é a matriz de dimensões $n \times m$ que representa a função resposta do detector para n elementos de $\mathbf{d}$ e m elementos de $\mathbf{s}$.

Neste trabalho utilizou-se o método dos mínimos quadrados^[45] para obter uma estimativa $\mathbf{s}'$ do espectro das fontes, usando a expressão:

$$\mathbf{s}' = (\mathbf{R}^t \cdot \mathbf{V}_d^{-1} \cdot \mathbf{R})^{-1} \cdot \mathbf{R}^t \cdot \mathbf{V}_d^{-1} \cdot \mathbf{d} \quad (4.4)$$

A matriz das covariâncias de $\mathbf{s}'$ é calculada por:

$$\mathbf{V}_{\mathbf{s}'} = (\mathbf{R}^t \cdot \mathbf{V}_d^{-1} \cdot \mathbf{R})^{-1} \quad (4.5)$$

onde a matriz de covariância de $\mathbf{d}$, $\mathbf{V}_d$, é diagonal com elementos $V_{d,i,i} = \sigma_i^2 = d_i$.

Sabe-se que a solução da equação (4.4) apresenta grandes oscilações e, em muitos casos, o procedimento de inversão não pode ser realizado devido a matrizes singulares. Para estes casos, a regularização ou truncamento podem ser aplicados^[46,47]. Neste trabalho utilizou-se truncamento da matriz $\mathbf{R}$, através da escolha de um valor de $m < n$.

No processo de correção, a função resposta do detector CdTe foi calculada pelo método de Monte Carlo, utilizando-se o código GEANT4^[39]. Espectros com canais com largura de 0,2 keV foram simulados para incidência de radiação monocromática de 5 keV a 150 keV em passos de 0,2 keV. Os espectros experimentais foram relocados^[48] também para canais com 0,2 keV de largura. O truncamento foi realizado de forma que o espectro corrigido possuísse canais com 0,4 keV de largura. Portanto, neste processo de truncamento, os valores das dimensões da matriz $\mathbf{R}$ foram $n \times n/2$.

A realocação tem a função de transformar o espectro experimental num espectro com a mesma correspondência de energia por canal dos elementos da matriz resposta do detector. Neste caso, os espectros experimentais foram relocados para que cada canal tivesse largura de 0,2 keV. A realocação

empregada neste trabalho segue um procedimento que mantém a independência estatística dos dados no espectro realocado^[48,49].

Dois parâmetros para avaliação dos dados foram calculados com base no espectro corrigido s' : a energia média e a primeira e segunda CSR's.

4.3.4.4.7 Cálculo da energia média

Para o cálculo da energia média por meio do espectro corrigido, monta-se o vetor $\mathbf{e} = e_1, e_2, \dots, e_m$, onde cada elemento e_i contém o valor da energia do canal i do espectro corrigido $\mathbf{s}'$. A energia média é calculada pela expressão:

$$\langle E \rangle = \mathbf{e}^t \cdot \mathbf{s}' \cdot \mathbf{A}^{-1} \quad (4.6)$$

e sua variância é obtida por:

$$\sigma_{\langle E \rangle}^2 = \mathbf{V}_{\langle E \rangle} = \mathbf{e}^t \cdot \mathbf{V}_{\mathbf{s}'} \cdot \mathbf{e} \cdot \mathbf{A}^{-2} \quad (4.7)$$

onde A é a soma de todos os elementos de $\mathbf{s}'$.

4.3.4.4.8 Cálculo da camada semi-redutora

O kerma no ar de um feixe monoenergético com energia E e fluência Φ é definido por:

$$K_{ar} = \Phi \cdot E \cdot \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{ar} \quad (4.8)$$

onde $(\mu_{tr}/\rho)_{ar}$ é o coeficiente de transferência de energia em massa para o ar, considerando fótons de energia E , tendo unidade cm^2/g .

O espectro de fótons discreto na forma de multicanal consiste de um conjunto de N valores $(E_i, Y_i, \sigma(Y_i))$, onde, para cada canal i , E_i é a energia, Y_i é o número de contagens ou a frequência de ocorrência de fótons de energia E_i , e $\sigma(Y_i)$ é a incerteza do valor Y_i . Considerando que o feixe é homogêneo em energia, a fluência de fótons de energia E_i pode ser substituída pelo valor de Y_i . Para se obter a fluência, multiplica-se Y_i pela intensidade do feixe e divide-se pela

área correspondente ao campo do feixe. Então o kerma no ar de um feixe com espectro conhecido é calculado por:

$$K_{ar} = \phi \sum_{i=1}^N Y_i \cdot E_i \cdot \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{ar, E_i} \quad (4.9)$$

Para determinar a CSR, é necessário atenuar o feixe com uma certa espessura x de um material, como por exemplo alumínio (Al), então calcula-se o kerma no ar deste feixe atenuado e compara-se com o kerma no ar do feixe original. Se o novo kerma no ar for a metade do original, então encontrou-se a primeira CSR. A atenuação do feixe original se faz por meio de coeficientes de atenuação de massa (*mass attenuation coefficient*), que também dependem do material, e da energia. Estes coeficientes para os elementos puros e diversos materiais compostos foram obtidos da base de dados do *Evaluation Photon Data Library* (EPDL97)^[50]. Como o feixe de raios X não é monoenergético, a solução não é analítica, então o problema é resolvido numericamente, por sucessivas interações com espessuras de alumínio, onde se escolhe um intervalo ao redor de 0,5 para o kerma no ar atenuado, com tolerância de $\pm 0,3\%$, para que o resultado seja satisfeito. O valor escolhido do incremento das camadas de alumínio é sempre inferior à tolerância para convergência.

A segunda CSR é calculada pelo mesmo processo, colocando-se o espectro atenuado pela espessura da primeira CSR no lugar do espectro original, obtendo-se assim a camada adicional de alumínio para reduzir o kerma no ar a $\frac{1}{4}$ de seu valor inicial.

5 RESULTADOS

Os resultados apresentados no presente trabalho abrangem as condições de reprodutibilidade de cada parâmetro de análise relacionado na seção 4.3, a determinação de cada grandeza proposta para análise e as incertezas envolvidas em cada processo. Para avaliação ao longo do tempo de cada parâmetro de análise proposto, foram calculadas inicialmente as cargas de trabalho acumuladas por período e ilustrados os dados em função destas cargas.

5.1 Resultado das cargas de trabalho aplicadas

Cada série de cargas obtidas com o sistema de aquisição e controle de cargas descrito na seção 4.2.1.2 foi processada por meio do programa WAnalyzer, detalhado no Apêndice 2 para que os resultados reais da distribuição de carga de trabalho aplicada ao tubo de raios X pudessem ser avaliados.

Desta forma, um resultado das cargas de trabalho parciais distribuídas nas tensões aplicadas ao tubo de raios X correspondentes a cada foco foi calculado, com suas incertezas combinadas com nível de confiança de 68,3%. As incertezas consideradas no processo de aquisição de cargas de trabalho foram obtidas com base nos dados das retas de calibração do sistema de aquisição para tensão de aceleração, corrente anódica e tempo de aplicação de carga, conforme detalhado no Apêndice 1, e dados das retas de calibração do divisor de alta tensão para tensão de aceleração e corrente anódica. As incertezas do divisor de alta tensão invasivo foram obtidas com base em seus dados de calibração que é efetuada internamente no IEE/USP, de acordo com os procedimentos 2005LG01PR017Y e 2005LG01PR020Y da Seção Técnica de Desenvolvimento Tecnológico em Saúde, para corrente anódica e tensão entre anodo e catodo respectivamente.

A Figura 47 ilustra a distribuição de carga aplicada com a simulação de 24 meses de utilização do tubo de raios X nas condições mencionadas na seção 4.2 e a distribuição prevista para os mesmos 24 meses. Dentro deste período, as cargas foram distribuídas uniformemente entre os focos, resultando em 12 meses de simulação de carga aplicada por foco. A incerteza para o intervalo de tensão

apresentou valores menores que 0,2% e para o produto corrente tempo acumulado foi menor que 0,01%, ambas com um nível de confiança de 68,3%, dados obtidos por meio do programa WAnalyzer.

Figura 47. Distribuição das cargas de trabalho aplicadas, divididas por foco, totalizando 24 meses de cargas de trabalho aplicadas ao tubo de raios X.

As cargas de trabalho totais de cada etapa de envelhecimento do tubo são indicadas na Figura 48, juntamente com o valor previsto baseado na distribuição estabelecida na seção 4.2.

Figura 48. Cargas de trabalho aplicadas ao tubo de raios X, acumuladas por período e por foco, e carga prevista por foco de acordo com a distribuição indicada na seção 4.2 totalizando 24 meses de cargas aplicadas ao tubo de raios X.

Para verificação do número de disparos programados por período por foco do tubo de raios X, o programa de processamento das cargas de trabalho (Apêndice 2) relaciona estas informações, indicando ainda os disparos inválidos, ou seja, disparos que não fornecem energia ao tubo de raios X. Estes disparos são provenientes de falhas no sistema eletromecânico do gerador de raios X que não responde aos comandos do sistema de controle e aquisição de cargas de trabalho.

O critério de rejeição é baseado na forma de onda de corrente, conforme detalhado no Apêndice 2. Neste trabalho, o limiar de 10 mA foi utilizado como critério para rejeição. A Tabela 7 ilustra os dados dos disparos efetuados por período, lembrando que os ajustes dos parâmetros de cada seqüência de disparos por faixa de tensão e foco, são efetuados manualmente.

Tabela 7 – Relação de número de disparos válidos e inválidos por período

Período (meses)	nº disparos válidos		nº disparos inválidos	
	Foco Fino	Foco Grosso	Foco Fino	Foco Grosso
01	6671	6662	0	9
03	10726	10677	0	27
06	15317	16679	19	0
08	10673	10649	1	21
10	10634	10566	40	108
12	10649	10520	0	105

As diferenças no número total de disparos por períodos, proporcionalmente, se dá pela programação manual do sistema de controle e aquisição de cargas, sujeita a pequenos desvios por parte do operador no decorrer do período.

O número de disparos inválidos foi menor que 1% em todos os períodos para ambos os focos.

5.2 Resultado da medição da primeira e segunda camadas semi-redutoras

Na determinação das CSR's, os dados de incerteza são colocados como entradas no programa HVLCalc, descrito no Apêndice 3. As incertezas abordadas aqui envolvem basicamente as espessuras dos filtros e os dados de incerteza da câmara de ionização pertinentes à medição das CSR's, que podem ser consideradas como medidas relativas de intensidade. Assim, incertezas como fator de calibração, exatidão do sistema, correção para temperatura e pressão ou mesmo distância normalmente são desprezadas^[31,32].

Neste trabalho foram incluídas incertezas relativas à dependência energética e de taxa de exposição, que não deveriam ser desprezadas segundo Nagel (1984)^[21] e seriam da ordem de 0,1% para estas condições de medida¹. Também foram incluídas incertezas relacionadas à flutuação de rede que influem diretamente na intensidade do feixe de raios X para o gerador Heliophos 4B. Desta forma, um levantamento do coeficiente de variação da intensidade inicial com a flutuação de rede foi levantado para cada faixa de tensão em cada foco, e utilizado como componente de incerteza no processo de medição das CSR's.

Para garantir que a temperatura e a pressão atmosférica não exercessem influência nos resultados, durante as medições estes parâmetros foram monitorados, e não foi detectada variação no intervalo de medição das CSR's para cada tensão de aceleração de interesse, confirmando as constatações de Gregory (2006)^[31].

Para cada tensão de aceleração, de 40 a 110 kV, nos focos fino e grosso, foram medidas as primeiras e segundas CSR's, sendo estas analisadas uma a uma para verificação da variação em relação à carga de trabalho.

¹ Comunicação particular: Dr. Büermann L. do *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB – Alemanha).

Recentes estudos de Mattos et al. (2006)^[51], sobre o crescimento da rugosidade em uma dimensão, a partir de um método estocástico, definem o comportamento da rugosidade no tempo, $\omega(t)$, por um processo contínuo, onde se observa que:

$$\omega \approx t^\beta \quad (5.1)$$

sendo β o expoente de crescimento. Para o caso unidimensional, os valores de β variam tipicamente entre 0,25 e 0,5, conforme o modelo de crescimento adotado. A rugosidade apresenta rápido crescimento inicialmente, que diminui tendendo a um valor de saturação ω_{sat} .

Os resultados das CSR's e da energia média, conforme será abordado na seção 5.5, são consistentes com o comportamento de rápido crescimento inicial e tendência de saturação, mostrando-se coincidentes com as observações de Nagel^[21]. Se considerarmos estes parâmetros proporcionais à rugosidade do anodo do tubo de raios X^[21], e que a grandeza Carga de Trabalho, W , determina o tempo de uso do tubo de raios X (vida útil), podemos, em analogia à equação (5.1), definir uma função com este comportamento para os parâmetros em questão:

$$CSR(W) = CSR_0 + \alpha_C \cdot W^{\beta_C} \quad (5.2)$$

onde CSR_0 é a CSR inicial, β_C o expoente de crescimento e α_C o parâmetro de ajuste das unidades. Um modelo utilizando a equação (5.2) foi empregado para avaliação deste comportamento, sendo ajustado por meio do programa Microcal™ Origin© versão 6.0.

Os gráficos da Figura 49 à Figura 52 ilustram alguns exemplos dos resultados obtidos para a primeira CSR's no foco fino e para a primeira e segunda CSR's em foco grosso, em relação à carga de trabalho. As barras de erros representam as incertezas combinadas calculadas para as CSR's, com nível de confiança de 68,3%.

Figura 49. Resultados das medidas da primeira CSR em foco fino para tensão de 50 kV em função da carga de trabalho com ajuste representado pela curva contínua. Os dados do ajuste são indicados no quadro junto ao gráfico.

Figura 50. Resultados das medidas da primeira CSR em foco fino para tensão de 110 kV em função da carga de trabalho com ajuste representado pela curva contínua. Os dados do ajuste são indicados no quadro junto ao gráfico.

Figura 51. Resultados das medidas da primeira CSR em foco grosso para tensão de 110 kV em função da carga de trabalho com ajuste representado pela curva contínua. Os dados do ajuste são indicados no quadro junto ao gráfico.

Figura 52. Resultados das medidas da segunda CSR em foco grosso para tensão de 110 kV em função da carga de trabalho com ajuste representado pela curva contínua. Os dados do ajuste são indicados no quadro junto ao gráfico.

Os dados obtidos em outras energias apresentam similaridade com os dados ilustrados, o que também ocorre nas segundas CSR's, já que seu cálculo é dependente das primeiras CSR's, porém com variações menos pronunciadas.

Além dos ajustes, uma avaliação das taxas de variação das CSR's para cada faixa de tensão e foco foi efetuada, por meio da diferença percentual, relativa à carga de trabalho (equação (5.3)), entre as medições efetuadas após cada série de aplicação de cargas em relação ao estado inicial do tubo de raios X.

$$\dot{CSR}_i(\%) = \frac{CSR_i - CSR_0}{CSR_0 \cdot W} \cdot 100 \quad (5.3)$$

onde $i = 1, 2, \dots, 6$ séries de carga de trabalho aplicadas ao tubo de raios X e CSR_0 é a CSR medida no estado inicial do tubo de raios X.

Desta forma, foi possível sintetizar as informações das taxas de variação das primeiras e segundas CSR's com a carga de trabalho em função da tensão de aceleração para cada foco. Alguns resultados são apresentados na Tabela 8 para as taxas de variação da primeira CSR relativas à primeira e sexta (última) série de cargas. Os valores entre parênteses indicam a incerteza da taxa percentual com nível de confiança de aproximadamente 68,3%. Para a faixa de tensão de aceleração de 60 kV, em foco fino, os dados não são apresentados devido a erros ocorridos na medição da primeira e segunda CSR's no estado inicial do tubo de raios X. Os resultados para a segunda CSR apresentam comportamento semelhante como já discutido anteriormente.

Tabela 8 – Taxa de variação percentual da primeira CSR em relação à carga de trabalho, W, para os dois focos em diversas tensões de aceleração.

Tensão [kV]	Foco Fino $\dot{CSR}_1(\%)$	Foco Grosso $\dot{CSR}_1(\%)$	Foco Fino $\dot{CSR}_6(\%)$	Foco Grosso $\dot{CSR}_6(\%)$
40	0,290(587)	-0,116(968)	0,048(48)	-0,024(94)
50	0,150(406)	0,211(571)	0,087(40)	0,038(62)
60	-	0,183(494)	-	0,055(48)
70	1,000(303)	0,187(336)	0,097(29)	0,053(31)
80	0,252(123)	0,498(477)	0,051(16)	0,050(26)
90	0,117(311)	0,179(276)	0,037(32)	0,071(28)
100	0,158(312)	0,075(178)	0,086(32)	0,116(20)
110	0,657(273)	0,874(242)	0,099(23)	0,153(24)

5.3 Resultados das medições das dimensões dos pontos focais

Os resultados da medição das dimensões dos pontos focais são apresentados para as posições paralela e ortogonal dos focos fino e grosso, com as magnificações de 2,0 para foco fino e grosso^[35], e ainda 1,0 para foco grosso, seguindo as recomendações da Norma IEC 60336. As dimensões apresentadas na Figura 53 à Figura 56 foram obtidas pelo método adaptado indicado na seção 4.3.2.4 em função da carga de trabalho acumulada por período.

Figura 53. Resultados da medida das dimensões dos pontos focais em função da carga de trabalho acumulada, para foco fino na posição paralela, com magnificação 2,0.

Figura 54. Resultados da medida das dimensões dos pontos focais em função da carga de trabalho acumulada, para foco fino na posição ortogonal, com magnificação 2,0

Figura 55. Resultados da medida das dimensões dos pontos focais em função da carga de trabalho acumulada, para foco grosso na posição paralela, nas magnificações de 1,0 (M01) e 2,0 (M02)

Figura 56. Resultados da medida das dimensões dos pontos focais em função da carga de trabalho acumulada, para foco grosso na posição ortogonal, nas magnificações de 1,0 (M01) e 2,0 (M02)

Uma segunda adaptação do método de Nersissian^[35] foi efetuada com o intuito de atender às prescrições da edição de 2006 da Norma IEC 60336^[52], que determina a medição, já por meios digitais, das dimensões dos pontos focais a 15% da amplitude máxima das intensidades da projeção da imagem da fenda e não a 50% como efetuado primeiramente neste trabalho^[33,35]. Este trabalho foi efetuado com o intuito de avaliar possíveis variações dos métodos com relação a valores das dimensões dos pontos focais e flutuações das dimensões com a carga de trabalho.

Os resultados obtidos a 15% da amplitude máxima das intensidades da projeção da imagem da fenda são ilustrados na Figura 57 à Figura 60.

Figura 57. Resultados da medida das dimensões dos pontos focais em função da carga de trabalho acumulada, para foco fino na posição paralela, com magnificação 2,0 a 15% da amplitude máxima das intensidades da projeção da imagem da fenda^[52].

Figura 58. Resultados da medida das dimensões dos pontos focais em função da carga de trabalho acumulada, para foco fino na posição ortogonal, com magnificação 2,0 a 15% da amplitude máxima das intensidades da projeção da imagem da fenda^[52].

Figura 59. Resultados da medida das dimensões dos pontos focais em função da carga de trabalho acumulada, para foco grosso na posição paralela, nas magnificações de 1,0 (M01) e 2,0 (M02) a 15% da amplitude máxima das intensidades da projeção da imagem da fenda^[52].

Figura 60. Resultados da medida das dimensões dos pontos focais em função da carga de trabalho acumulada, para foco grosso na posição ortogonal, nas magnificações de 1,0 (M01) e 2,0 (M02) a 15% da amplitude máxima das intensidades da projeção da imagem da fenda^[52].

As barras de erro em todos os processos de medição indicam a incerteza combinada calculada para cada medição com um nível de confiança de 68,3%, de acordo com o método de Nersissian^[35] adaptado pelo filtro de médias indicado na seção 4.3.2.4, levando em conta também a contribuição da incerteza da variação do contraste.

As incertezas obtidas para as leituras a 50% da amplitude máxima das intensidades da projeção da imagem da fenda foram inferiores a 4,0% e 2,1% para posição paralela em foco fino e foco grosso respectivamente, na magnificação 2,0. Os mesmos resultados são observados na posição ortogonal para os mesmos focos nesta magnificação. Na magnificação 1,0 para o foco grosso, sob o mesmo critério de referência de medição, as incertezas para posição paralela foram menores que 3,0% e para posição ortogonal menores que 2,1%.

Para as leituras a 15% da amplitude máxima das intensidades da projeção da imagem da fenda as incertezas foram inferiores a 3,0% e 1,6% para as posições paralela e ortogonal em foco fino e foco grosso respectivamente, na magnificação 2,0, e inferiores a 2,1% e 1,5% para as posições paralela e ortogonal em foco fino e foco grosso respectivamente, na magnificação 1,0.

5.4 Resultados das medições de PPV

Os resultados das medições do PPV são dados para algumas tensões de referência que vão de 40 a 100 kV. Para cada uma das tensões de referência, foram efetuadas três leituras comparativas entre o sistema padrão de referência do IEE/USP (seção 4.3.3.3) e o medidor não invasivo, obtendo-se incertezas estatísticas (tipo A^[53]) que foram combinadas em cada sistema de leitura com as incertezas relativas à exatidão fornecida pelo programa desenvolvido em linguagem Java, e com a resolução dos sistemas. O sistema desenvolvido, abordado na seção 4.2.1.2, foi utilizado durante as medições para comparação da sua capacidade de resposta em frequência e validação da calibração para utilização como coletor de dados de cargas de trabalho, conforme é mostrado no Apêndice 1 e Apêndice 5. Desta forma, os dados obtidos com o sistema de aquisição desenvolvido não são apresentados nos resultados para avaliação do medidor não invasivo.

Para avaliação do medidor não invasivo, o Máximo Erro Intrínseco Relativo^[5] foi adotado, conforme indicado na equação (5.4).

$$|I| = \left| \frac{\hat{U}_{meas} - \hat{U}_{true}}{\hat{U}_{true}} \right| \leq 0,02 \quad (5.4)$$

onde $\hat{U}_{meas}$ é o valor medido pelo corpo de prova, ou seja, pelo medidor não invasivo; $\hat{U}_{true}$ é o valor verdadeiro convencional, medido pelo sistema de referência. O erro intrínseco relativo não deve ultrapassar o limite de 0,02.

Os gráficos da Figura 61 e da Figura 62 mostram o comportamento do erro intrínseco relativo para o foco fino de acordo com o período de aplicação de carga de trabalho ao tubo de raios X. A Figura 61 mostra os dados para tensões até 60 kV, valores próximos ao limiar de leitura do PPV por instrumentos não invasivos. A Figura 62 mostra o comportamento para as tensões superiores a 60 kV.

Figura 61. Resultados de medida do erro intrínseco relativo na medida de PPV para tensões de referência até 60 kV em foco fino.

Figura 62. Resultados de medida do erro intrínseco relativo na medida de PPV para tensões de referência maiores que 60 kV em foco fino.

Da mesma forma, para o foco grosso, os gráficos indicados na Figura 63 e Figura 64 mostram o comportamento do erro intrínseco relativo para o foco grosso de acordo com o período de aplicação de carga de trabalho ao tubo de raios X.

Figura 63. Resultados de medida do erro intrínseco relativo na medida de PPV para tensões de referência até 60 kV em foco grosso.

Figura 64. Resultados de medida do erro intrínseco relativo na medida de PPV para tensões de referência maiores que 60 kV em foco grosso.

As barras de erros representam a incerteza da determinação do erro intrínseco relativo com um nível de confiança de aproximadamente 68,3%. As incertezas apresentam valores relativamente elevados, pois levam em conta as incertezas do medidor não invasivo e são provenientes de apenas três valores e tensão aplicada ao tubo de raios X.

5.5 Resultados da espectrometria de raios X

A partir dos espectros corrigidos pelo método estabelecido por Morales et al. (2006)^[44], duas informações relevantes foram escolhidas como parâmetros para quantificar os resultados obtidos: a primeira e a segunda camadas semi-redutoras e a energia média.

Com o resultado da primeira e segunda CSR's é possível avaliar a qualidade da correção, comparando os resultados obtidos por meio do espectro com os resultados obtidos por meio da utilização da câmara de ionização (seção 4.3.1). Ilustrações desta comparação são dadas na Figura 65 e Figura 66 para os focos fino e grosso respectivamente. Nota-se que as incertezas obtidas com este método são maiores do que as obtidas com a câmara de ionização.

Figura 65. Resultados da medida da primeira e segunda CSR em foco fino pelo método da IEC 61267 (seção 4.3.1) e pelo espectro corrigido.

Figura 66. Resultados da medida da primeira e segunda CSR em foco grosso pelo método da IEC 61267 (seção 4.3.1) e pelo espectro corrigido.

As incertezas das CSR's obtidas por meio do espectro corrigido são da ordem de 3%, calculadas pela propagação das incertezas dos valores de coeficientes de absorção do material (alumínio). Este valor foi baseado em documentação do EPDL97^[50], onde se encontram que as seções de choque de fotoionização para sólidos no intervalo de energia de 5 a 100 keV têm incerteza máxima de 2% e no intervalo de 100 keV a 10 MeV, incertezas máximas entre 1% e 2%. Nesta documentação, não há muitos comentários sobre outros processos além da fotoionização. Como o principal mecanismo de interação nos espectros medidos é o fotoelétrico, assumimos que ele seria responsável por uma incerteza de aproximadamente 2% e consideramos, de forma conservativa, que outros processos podem contribuir com mais 1%, totalizando 3%. Os erros indicados consideram apenas a propagação de erro dos coeficientes de absorção. Erros sistemáticos, inerentes ao processo de correção, não foram incluídos devido à complexidade de sua estimativa.

Além da medida no eixo perpendicular ao eixo anodo-catodo, medidas em ângulos adjacentes ao eixo central do ponto focal foram realizadas, tanto no sentido do catodo como do anodo, conforme indicado na Tabela 5 e Tabela 6 da seção 4.3.2.3. Estas medições forneceram mais parâmetros para a avaliação dos resultados. Alguns espectros relocados^[48,49], corrigidos e normalizados (área total = 100), são ilustrados na Figura 67 a Figura 70 em diferentes etapas de aplicação de carga, para diferentes ângulos de medição, tensões de aceleração e foco. Para verificação da variação inicial e final, conforme abordado na seção 5.2, são ilustrados os espectros das medições iniciais e espectros obtidos após a primeira e última série de cargas. As barras de erro nos gráficos representam a incerteza com nível de confiança de aproximadamente 68,3%.

Figura 67. Espectros de três estados de aplicação de cargas, relocados, corrigidos e normalizados pela área total, para tensão de aceleração de 40 kV em foco grosso, obtidos no eixo central de medição (0°). O gráfico inferior ilustra o espectro inicial subtraído do espectro obtido após a última série de cargas.

Figura 68. Espectros de três estados de aplicação de cargas, relocados, corrigidos e normalizados pela área total, para tensão de aceleração de 70 kV em foco fino, obtidos no eixo central de medição (0°). O gráfico inferior ilustra o espectro inicial subtraído do espectro obtido após a última série de cargas.

Figura 69. Espectros de três estados de aplicação de cargas, relocados, corrigidos e normalizados pela área total, para tensão de aceleração de 90 kV em foco fino, obtidos no ângulo de $5,7^\circ$ em relação ao feixe central (lado do anodo). O gráfico inferior ilustra o espectro inicial subtraído do espectro obtido após a última série de cargas.

Figura 70. Espectros de três estados de aplicação de cargas, relocados, corrigidos e normalizados pela área total, para tensão de aceleração de 110 kV em foco grosso, obtidos no ângulo de $7,6^\circ$ em relação ao feixe central (lado do catodo). O gráfico inferior ilustra o espectro inicial subtraído do espectro obtido após a última série de cargas.

De forma análoga ao processo estabelecido pela metodologia de apresentação dos resultados obtidos com câmara de ionização (seção 5.2), a função indicada na equação (5.2) foi empregada para avaliação das CSR's nos diversos ângulos de medição dos espectros. Entretanto, as incertezas das variações nas CSR's obtidas com este método apresentaram valores da mesma ordem que as próprias variações. Este fato não permitiu a realização de uma análise semelhante à que foi feita para a taxa de variação da CSR com a expressão da equação (5.3) da seção 5.2.

Uma maior sensibilidade, no entanto, é obtida pelos valores de energia média obtida por meio da correção dos espectros^[44]. Utilizando a função indicada na equação (5.5), análoga à equação (5.2), foi possível avaliar o comportamento da variação da energia média nas várias configurações de tensão de aceleração, foco e ângulos de medição dos espectros.

$$EM(W) = EM_0 + \alpha_E \cdot W^{\beta_E} \quad (5.5)$$

Resultados para algumas energias em diferentes ângulos de medição, nos focos fino e grosso, são ilustrados na Figura 71 a Figura 77.

Figura 71. Variação da energia média em relação à carga de trabalho para foco fino, para tensão de 40 kV, na posição de medição central de 0° (Tabela 5), com ajuste representado pela curva contínua. Os dados do ajuste são indicados no quadro junto ao gráfico.

Figura 72. Variação da energia média em relação à carga de trabalho para foco fino, para tensão de 70 kV, na posição de medição central de 0° (Tabela 5), com ajuste representado pela curva contínua. Os dados do ajuste são indicados no quadro junto ao gráfico.

Figura 73. Variação da energia média em relação à carga de trabalho para foco fino, para tensão de 70 kV, na posição de medição inclinada para o anodo em 5,7° (Tabela 5), com ajuste representado pela curva contínua. Os dados do ajuste são indicados no quadro junto ao gráfico.

Figura 74. Variação da energia média em relação à carga de trabalho para foco fino, para tensão de 70 kV, na posição de medição inclinada para o catodo em 7,6° (Tabela 5), com ajuste representado pela curva contínua. Os dados do ajuste são indicados no quadro junto ao gráfico.

Figura 75. Variação da energia média em relação à carga de trabalho para foco fino, para tensão de 110 kV, na posição de medição central de 0° (Tabela 5), com ajuste representado pela curva contínua. Os dados do ajuste são indicados no quadro junto ao gráfico.

Figura 76. Variação da energia média em relação à carga de trabalho para foco grosso, para tensão de 40 kV, na posição de medição inclinada para o catodo em 7,6° (Tabela 5), com ajuste representado pela curva contínua. Os dados do ajuste são indicados no quadro junto ao gráfico.

Figura 77. Variação da energia média em relação à carga de trabalho para foco grosso, para tensão de 70 kV, na posição de medição inclinada para o anodo em 5,7° (Tabela 6), com ajuste representado pela curva contínua. Os dados do ajuste são indicados no quadro junto ao gráfico.

Uma avaliação das taxas de variações das energias médias foi efetuada para cada faixa de tensão de aceleração e focos, nos diferentes ângulos de medição dos espectros, por meio da diferença percentual, relativa à carga de trabalho (equação (5.6)), analogamente ao processo efetuado com as CSR's (seção 5.2).

$$\dot{EM}_i(\%) = \frac{EM_i - EM_0}{EM_0 \cdot W} \cdot 100 \quad (5.6)$$

onde $i = 1, 2, \dots, 6$ séries de carga de trabalho aplicadas ao tubo de raios X, e EM_0 é a energia média calculada no estado inicial do tubo de raios X.

Os resultados das diferenças percentuais são apresentados na Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11 para as taxas de variação da energia média relativas à primeira e sexta (última) série de cargas. Os valores em parênteses indicam a incerteza da taxa percentual com nível de confiança de aproximadamente 68,3%.

Tabela 9 – Taxa de variação percentual da energia média em relação à carga de trabalho, W, para os dois focos em diversas tensões de aceleração na posição de medição central de 0°.

Tensão [kV]	Foco Fino $\dot{EM}_1(\%)$	Foco Grosso $\dot{EM}_1(\%)$	Foco Fino $\dot{EM}_6(\%)$	Foco Grosso $\dot{EM}_6(\%)$
40	0,144(31)	0,057(29)	0,024(3)	0,011(3)
50	0,160(26)	0,091(25)	0,021(3)	0,017(2)
60	0,174(23)	0,083(23)	0,023(2)	0,007(2)
70	0,069(22)	0,023(22)	0,007(2)	0,016(2)
80	0,121(22)	0,020(22)	0,010(2)	0,029(2)
90	0,113(22)	-0,109(23)	0,015(2)	0,010(2)
100	0,101(23)	-0,153(22)	0,016(2)	0,011(2)
110	0,128(23)	-0,098(23)	0,028(2)	0,014(2)

Tabela 10 – Taxa de variação percentual da energia média em relação à carga de trabalho, W, para os dois focos em diversas tensões de aceleração na posição de medição inclinada para o anodo em 5,7°.

Tensão [kV]	Foco Fino $\dot{EM}_1(\%)$	Foco Grosso $\dot{EM}_1(\%)$	Foco Fino $\dot{EM}_6(\%)$	Foco Grosso $\dot{EM}_6(\%)$
40	0,120(31)	0,170(29)	0,018(3)	0,012(3)
50	0,238(26)	0,098(25)	0,019(3)	0,020(2)
60	0,199(25)	0,151(23)	0,021(2)	0,033(2)
70	0,201(23)	0,229(23)	0,026(2)	0,028(2)
80	0,153(22)	0,233(23)	0,025(2)	0,032(2)
90	0,200(22)	0,232(23)	0,015(2)	0,022(2)
100	0,179(22)	0,182(23)	0,017(2)	0,021(2)
110	0,180(23)	0,105(23)	0,025(2)	0,022(2)

Tabela 11 – Taxa de variação percentual da energia média em relação à carga de trabalho, W , para os dois focos em diversas tensões de aceleração na posição de medição inclinada para o catodo em $7,6^\circ$.

Tensão [kV]	Foco Fino $\dot{EM}_1$ (%)	Foco Grosso $\dot{EM}_1$ (%)	Foco Fino $\dot{EM}_6$ (%)	Foco Grosso $\dot{EM}_6$ (%)
40	0,132(32)	0,079(29)	0,023(3)	0,014(3)
50	0,162(26)	0,149(26)	0,027(3)	0,011(2)
60	0,298(25)	0,171(24)	0,031(2)	0,026(2)
70	0,388(23)	0,115(24)	0,039(2)	0,027(2)
80	0,388(23)	0,001(23)	0,039(2)	0,025(2)
90	0,436(23)	0,027(22)	0,046(2)	0,024(2)
100	0,409(24)	0,037(23)	0,050(2)	0,023(2)
110	0,401(24)	-0,022(24)	0,050(2)	0,029(2)

6 DISCUSSÃO

Os resultados das cargas de trabalho acumuladas mostram um grande stress sofrido pelo equipamento de raios X empregado nos testes, que acarretou mudança no desempenho durante a evolução do processo, ilustrado na distribuição de cargas geral (Figura 47 na seção 5.1) que contempla a simulação de 24 meses de carga aplicada ao tubo de raios X.

As dimensões dos pontos focais não apresentam variação que possa ser quantificada. Levando em conta as incertezas adicionais relativas ao contraste, observa-se uma redução da sensibilidade do método, dificultando uma análise mais precisa dos dados. Mesmo com incertezas relativamente elevadas, é possível verificar que o tamanho do ponto focal não apresenta tendência de aumento, o que também não consta na literatura. A avaliação a 15% da amplitude do perfil da imagem digital^[52] mostrou uma indicação de valores mais próximos aos valores nominais dos focos, o que mostra realmente uma melhoria em relação à medição a 50%^[33,35]. Entretanto, grandes variações também são notadas com esta metodologia, o que indica a contribuição de erros na metodologia proposta por Nersissian^[35], supostamente relacionados ao alinhamento, que precisam ser melhor avaliados.

Muitas vezes o tamanho do ponto focal pode ser alterado por deformações no filamento ou mesmo derretimento da pista do anodo do tubo de raios X, provocados por mau uso ou defeitos. Com as condições de operação do tubo de raios X sendo seguidas rigorosamente pelo sistema de aplicação de cargas, estes eventos dificilmente ocorrem.

Os medidores não invasivos de tensão de aceleração dos tubos de raios X apresentam normalmente baixa sensibilidade à filtração, principalmente às pequenas alterações da filtração inerente. Os resultados com estes medidores mostraram pouca precisão na determinação do PPV para tensões menores ou iguais a 60 kV de pico. Isto se deve principalmente à insensibilidade do detector em tensões inferiores a 40 kV (níveis de detecção mínimos).

Para tensões superiores a 60 kV, o instrumento apresenta bom comportamento, e as alterações da filtração inerente, que se acredita serem produzidas principalmente pelo aumento da rugosidade do anodo^[6], parecem não

influenciar muito nos resultados indicados pelo instrumento quando comparados com um padrão de referência. Inicialmente ocorre um aumento do erro intrínseco relativo que se mantém estável com a evolução das cargas de trabalho. Este comportamento é observado em ambos os focos do tubo de raios X.

A avaliação das CSR's mostra uma real tendência de aumento com a carga de trabalho. Com uma primeira aproximação por uma função de potência foi possível visualizar o comportamento da taxa de aumento da primeira e segunda CSR's em função da carga de trabalho, sendo esta taxa maior inicialmente e menor ao longo do tempo, tendendo a um comportamento de saturação. Na 2ª CSR o aumento é menos pronunciado, não sendo possível no caso das tensões menores, afirmar a ocorrência de alterações se levarmos em conta as incertezas envolvidas no processo. As taxas de variação percentual da 1ª CSR também mostram de forma clara este comportamento, tanto para o foco fino como para o foco grosso.

É possível verificar ainda, a tendência do comportamento de saturação previsto por Nagel^[21], confirmando a aplicabilidade da função baseada nas simulações de Mattos et al.^[51]. A qualidade dos ajustes da função proposta foi razoável dentro do conjunto de dados coletados, no entanto, as incertezas envolvidas na metodologia de medição das CSR's são relativamente altas, o que contribui para o aumento significativo nos erros dos parâmetros ajustados. Em muitos casos a flutuação dos dados é muito grande, ocorrendo inclusive variações negativas das taxas de aumento em função da carga de trabalho. Isso mostra que a metodologia empregada não apresenta boa precisão para esta avaliação, ou que, mesmo buscando o maior refinamento possível das fontes de incertezas associadas ao sistema de geração e medição, outras fontes de incerteza, provavelmente relacionadas ao sistema, não foram levadas em conta.

A avaliação preliminar das taxas de variação percentuais globais das CSR's, feita com base na diferença entre a sexta (última) carga acumulada e o estado inicial do tubo de raios X em estudo, levando em conta o comportamento de saturação, mostra uma taxa de variação maior nas tensões maiores, principalmente no foco grosso.

As taxas de variação inicial entre os focos são coincidentes, levando em conta as incertezas envolvidas, não sendo possível avaliar a dependência relacionada à densidade de corrente no alvo (que é maior para o foco fino) que

levaria a uma maior taxa de aumento de rugosidade, conforme observado por Nowotny e Meghtzifene^[6], levando em conta que a carga de trabalho aplicada aos focos foi semelhante (seção 5.1). Um fato interessante é que a taxa de aumento das CSR's e conseqüentemente da filtração inerente, torna-se maior, quanto maior a tensão de aceleração, diferentemente dos resultados da simulação da alteração na filtração, também proposta por Nowotny e Meghtzifene^[6], onde ocorreria redução da filtração inerente nas energias maiores.

Um ponto importante é que a taxa de aumento das CSR's é relativamente pequena, conforme observado por Nagel^[21], Nowotny e Meghtzifene^[6], se considerarmos a carga aplicada ao tubo de raios X efetuada neste trabalho, que segue condições extremas de utilização do gerador de alta tensão e do tubo de raios X, e que provavelmente são superiores às cargas dentro da realidade européia^[6].

A espectrometria de raios X mostra que as variações mais sensíveis se dão pela energia média do feixe, conforme observado também por Nowotny e Meghtzifene^[6]. As CSR's obtidas por meio dos espectros foram utilizadas somente para verificação da qualidade da correção utilizando o método de Moralles et al.^[44], já que as incertezas envolvidas neste processo inviabilizam a análise de tendência dos dados. Os erros encontrados consideram a propagação de erro dos coeficientes de absorção apenas (3%). Erros sistemáticos, que também estão presentes no processo de correção, não puderam ser levados em conta.

Os espectros corrigidos ilustrados nos resultados mostram informações interessantes relacionadas ao aumento da carga de trabalho acumulada, como sutil aumento dos fótons de maior energia e redução das intensidades dos fótons de *Bremsstrahlung*, efeitos menos pronunciados, aumento considerável dos fótons de raios X característicos da liga tungstênio-rênio (W nas faixas de 59 e 67 keV, Re nas faixas de 61 e 69 keV), evidente nos espectros obtidos nas maiores tensões de aceleração, e aumento também considerável dos fótons de raios X característicos do molibdênio (Mo, faixa de 17 keV), que por informação do fabricante do tubo de raios X^[14] estaria atrás de uma camada de aproximadamente 1 mm de liga W+Re.

Os gráficos de energia média em função da carga de trabalho (Figura 71 a Figura 77), com ajuste da função proposta na equação (5.5), mostram com

mais clareza a tendência de saturação do efeito de envelhecimento do tubo de raios X. No entanto, fica evidente pela flutuação dos dados maior que os erros apresentados nos gráficos, que incertezas envolvidas na metodologia de medição e correção dos espectros não foram levadas em conta. Isso mostra que a metodologia também não apresenta precisão ótima para esta avaliação, mesmo mostrando maior sensibilidade que a metodologia de medição das CSR's indicada na seção 4.3.1.

Novamente, uma rápida elevação da energia média e rápida estagnação após este aumento são observadas. Nas medições efetuadas a 0° em relação ao eixo perpendicular ao eixo anodo-catodo, as taxas de variação percentuais iniciais e globais (consideradas pela diferença da última série de medições em relação ao estado inicial do tubo de raios X) mostram-se estáveis em relação às tensões de aceleração para ambos os focos. No foco fino, fica evidente que as taxas de variação percentuais iniciais são maiores, sendo que a menor variação observada no foco grosso provavelmente está relacionada à menor densidade de carga por área, o que faz com que a saturação (aumento da rugosidade) seja mais lenta, coincidindo com a taxa de aumento de rugosidade observada por Nowotny e Meghtzifene (2002)^[6].

Nas medidas efetuadas com ângulo de $5,7^\circ$ para o lado do anodo do tubo de raios X, onde o ângulo do anodo decrescido da inclinação de medida dos espectros representaria um alvo com inclinação de $6,3^\circ$ para o foco grosso e $10,3^\circ$ para o foco fino (Figura 73), as taxas de variação percentuais, iniciais e globais, são similares entre os focos em relação à tensão de aceleração. Não são evidenciadas neste ângulo grandes diferenças das taxas de variação entre energias maiores e menores nos focos.

No ângulo de $7,6^\circ$ para o lado do catodo do tubo de raios X (Figura 74), as taxas de variação percentuais, iniciais e globais, são diferentes em relação à tensão de aceleração, principalmente no foco fino. Nesta posição o ângulo do anodo acrescido da inclinação de medida dos espectros, representaria um alvo com inclinação de $23,6^\circ$ para o foco fino e $19,6^\circ$ para o foco grosso.

As taxas de variação percentuais, inicial e global, são nitidamente maiores, para os dados obtidos no foco fino, quanto maior a tensão de aceleração do tubo de raios X. Novamente, fica claro uma maior taxa inicial para uma maior densidade de carga no alvo^[6].

Em alguns casos, variações negativas são observadas, nas taxas de variação iniciais do foco grosso, mostrando existência de fontes de incertezas que não foram possíveis de serem levadas em conta no processo.

A determinação do melhor ângulo de medição dos efeitos do envelhecimento do tubo de raios X, conforme observado nos resultados, não pode ser concluída de forma clara; no entanto, a visualização das diferenças nos espectros, principalmente em altas energias, e os dados relativos à taxa de variação percentual da energia média, indicam que haverá uma maior possibilidade de visualização de alterações em função da carga de trabalho no ângulo de medição do lado do catodo.

De qualquer forma, os resultados mostram tendências similares às observadas nas medidas das CSR's, com o mesmo comportamento de saturação, e maiores diferenças quanto maior a tensão de aceleração aplicada ao tubo de raios X.

As menores variações da energia média em relação às medições iniciais são da ordem de 0,4 keV para foco fino e 0,3 keV para foco grosso, considerando as incertezas envolvidas, e são normalmente maiores que 1 keV para as maiores tensões de aceleração em ambos os focos, chegando a atingir aproximadamente 2,8 keV quando medidas com ângulo de $7,6^\circ$ do lado do catodo no foco fino.

É importante salientar ainda, que o tubo de raios X utilizado neste trabalho é um tubo de alta qualidade, e representa uma amostra significativa dentre os grandes fabricantes mundiais de tubos de raios X. Outros tubos normalmente empregados em clínicas e hospitais brasileiros, principalmente pelo baixo custo oferecido, não podem ser considerados na comparação com os dados deste trabalho. Vale ressaltar, que os limites de operação e ciclos de carga do tubo de raios X foram rigorosamente respeitados neste trabalho.

7 CONCLUSÕES

A complexidade da análise dos resultados de cada processo de avaliação intermediária do tubo de raios X exigiu o desenvolvimento de três softwares para análise de dados, facilitando e padronizando as metodologias de análise de resultados, incluindo as incertezas envolvidas em cada processo. Além dos softwares desenvolvidos foi necessário a adaptação de métodos de um programa computacional, desenvolvido por Nersissian^[35], em plataforma Mathcad 5.0™, para determinação digital de dimensões de pontos focais.

O uso de um sistema automático de disparo e aquisição de dados garantiu a confiabilidade dos resultados das cargas acumuladas por período e totais, o que seria inviável ou sujeito a grande número de erros por parte dos operadores do equipamento. Mesmo com o sistema empregado, foi possível verificar falhas na programação do equipamento durante a execução das cargas, conforme indicam os resultados de número de disparos por foco na Tabela 7 da seção 5.1. No entanto, a carga acumulada por período aproximou-se muito dos valores previstos por foco, mesmo com esta instabilidade constatada (Figura 48 na seção 5.1).

Os procedimentos de reprodutibilidade desenvolvidos e implementados em cada metodologia de medição de parâmetros não invasivos do tubo de raios X, além do tratamento das incertezas de cada parâmetro com o máximo de informações possíveis de serem abordadas, garantiram a confiabilidade dos resultados apresentados neste trabalho. Porém, ficou evidente que existem algumas componentes de incertezas relacionadas aos métodos empregados que não foram possíveis de ser incluídas por serem desconhecidas.

O estudo do envelhecimento do tubo de raios X por métodos não invasivos, levando em conta a carga de trabalho aplicada ao tubo de raios X mostrou que dentre as metodologias escolhidas, a medição das dimensões do ponto focal e a medição não invasiva da tensão de aceleração, são procedimentos pouco recomendados, já que mostraram ser métodos muito pouco sensíveis para este propósito.

Um dado interessante é que em condições normais de operação, respeitando as curvas de aquecimentos e resfriamento dos tubos de raios X, o

envelhecimento do tubo de raios X parece não influenciar significativamente os instrumentos utilizados para medição da tensão de aceleração^[5] em controle de qualidade e manutenção de equipamentos de raios X.

No caso da medição das dimensões dos pontos focais, ficou evidente que existem fontes de incertezas relacionadas ao processo de medição que não foram consideradas por serem desconhecidas, o que exige um estudo mais aprofundado desta metodologia.

As medições das CSR's, principalmente a primeira, mostraram relativa sensibilidade para avaliação dos efeitos de envelhecimento do tubo de raios X, mas sem dúvidas, a alteração da energia média em função da carga de trabalho, representou a metodologia mais sensível dentro das propostas deste trabalho, levando em conta ainda as incertezas de medição de cada processo. Nenhum método empregado, no entanto, apresenta grande precisão para a avaliação proposta.

Maiores variações, tanto das energias médias, como das CSR's, podem ser verificadas nas maiores tensões de aceleração aplicadas ao tubo de raios X, contrariando recentes simulações analíticas^[6].

Estes resultados podem ser considerados preliminares, já que o tubo de raios X avaliado não chegou ao final de sua vida útil. Mesmo com resultados preliminares, o modelo de saturação proposto pela função de potência, que tenta descrever as constatações de Nagel^[21] e simulações efetuadas por Mattos et al.^[51], é consistente com os efeitos das mudanças dos parâmetros avaliados.

A aplicação de cargas ao tubo de raios X, até o final de sua vida útil, sem dúvida seria uma proposta interessante de continuidade deste trabalho, já que os 24 meses propostos não foram suficientes para esta finalidade. Espera-se, contudo, que não hajam grandes alterações dentro das tendências mostradas pelos dados apresentados até o momento.

No caso de novos estudos, seria interessante acompanhar de forma mais detalhada, por meio das CSR's e da energia média, o início do envelhecimento do tubo de raios X, com valores menores de carga de trabalho aplicada, para que se possa levantar melhor o início da curva de saturação.

Outro fator interessante seria a possibilidade de utilização de um detector com função resposta mais regular (por exemplo HPGe) de forma a minimizar erros decorrentes das correções aplicadas aos espectros medidos.

Infelizmente, este estudo só pôde ser aplicado a uma amostra significativa. Desta forma, a simulação da rugosidade por método de Monte Carlo, levando em conta as considerações observadas por Mattos et al.^[51], seria um complemento a este trabalho, podendo-se por fim, levantar o comportamento, com maior detalhamento, de vários tubos de raios X, com diferentes características construtivas e aplicações.

Avaliar os efeitos do envelhecimento de um tubo de raios X por métodos não invasivos é uma tarefa difícil com as metodologias normalmente empregadas para caracterização de feixes. Avaliar variações nas CSR's e energia média são os métodos mais promissores, porém deve-se investir para melhorar a precisão de seus resultados.

APÊNDICE 1 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE CARGAS

Para garantir a rastreabilidade e conformidade do sistema de aquisição desenvolvido, detalhado na seção 4.2.1.2, foram necessários um procedimento de calibração e um procedimento de avaliação da resposta em frequência deste sistema.

O sistema de aquisição é composto de um conversor Analógico/Digital (A/D) com dois canais de leitura de tensão conectados a dois amplificadores condicionadores de sinais com ganhos diferentes, utilizados para leitura de tensão de aceleração e corrente anódica (fornecida por meio de uma razão tensão/corrente), provenientes das respectivas saídas analógicas do divisor de alta tensão descrito na seção 4.2.1.1. A informação do tempo de aplicação de carga é obtida de acordo com as prescrições da Norma NBR IEC 60601-2-7^[7], baseada no sinal correspondente a corrente anódica.

O procedimento de calibração do sistema de aquisição consistiu de três etapas:

- Calibração do canal de leitura de alta tensão;
- Calibração do canal de leitura de corrente anódica;
- Calibração da medição de tempo de aplicação de carga.

Para calibração destes três parâmetros foi utilizada uma fonte de tensão padrão programável Keithley 2400 e um Osciloscópio digital Tektronix TDS5104 como padrão para medição de tempo. Estes instrumentos foram calibrados em laboratórios pertencentes a Rede Brasileira de Calibração (RBC).

A calibração do ganho de tensão dos dois canais de leitura foi efetuada com a fonte padrão programável (tensão em corrente contínua) em diversas faixas de utilização, com leitura dos dados resultantes de tensão máxima e corrente média^[7], para os canais de leitura de tensão de aceleração e corrente anódica respectivamente, estabelecendo-se as razões de conversão de tensão e de corrente. A Figura 78 ilustra o sistema de calibração do ganho de tensão dos dois canais do sistema de aquisição.

Figura 78. Sistema de calibração do ganho em tensão dos canais de leitura de tensão de aceleração e corrente anódica do sistema de aplicação de cargas e aquisição de dados

O sistema de aquisição foi calibrado em duas etapas diferentes, com diferentes ganhos do canal de leitura de corrente anódica. Isso foi necessário porque os valores de pico da corrente anódica na operação do gerador de raios X em foco grosso (corrente anódica de 320 mA) estavam muito próximos aos limites de referência do conversor A/D do sistema.

A calibração dos canais de leitura de tensão de aceleração e corrente anódica resultou em curvas de calibração de ganho de cada canal, ajustadas por meio do programa de domínio público Gnuplot 4.0 © for Windows TM^[54], levando em conta as incertezas relacionadas à exatidão, resolução e calibração da fonte padrão e incertezas relacionadas à exatidão, não linearidade e resolução digital do sistema de aquisição. Para o tempo de aplicação de carga, o osciloscópio digital foi utilizado como referência, ligado à fonte de tensão padrão programada para diversos intervalos de pulso de tensão em corrente contínua. A medição do tempo de aplicação de carga efetuada pelo sistema é baseada em posições de memória utilizadas para o armazenamento da forma de onda de corrente, assim, a calibração deste parâmetro resultou em uma curva de calibração da relação entre o tempo padrão e o número de posições de memória contendo o sinal de corrente acima de um limiar mínimo de 20 mA, ajustadas também por meio do programa de domínio público gnuplot 4.0 © for Windows TM. Os ajustes levam em conta as incertezas relacionadas à exatidão, resolução e calibração da base de tempo do osciloscópio digital e incertezas relacionadas à resolução em posições

de memória do sistema de aquisição. Um exemplo de curva de calibração da medição do tempo de aplicação de carga é indicada na Figura 79.

Figura 79. Curva de calibração da relação entre o tempo padrão e o número de posições de memória contendo o sinal de corrente. A equação utilizada e os dados dos parâmetros ajustados, bem como da qualidade do ajuste são indicados no gráfico.

Estes dados foram utilizados para avaliação das cargas de trabalho aplicadas ao tubo de raios X de acordo com os resultados indicados na seção 5.1 e no cálculo do PPV, conforme detalhado na seção 4.3.3.3. Alguns resultados da comparação por medição simultânea com o sistema de aquisição desenvolvido e o sistema de referência abordado na seção 4.3.3.3 são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Medição do PPV pelo sistema desenvolvido e pelo sistema de referência do IEE/USP. O erro calculado pelo programa PPVCalc representa a exatidão de cada sistema para uma forma de onda de entrada, com nível de confiança de aproximadamente 68,3%.

Tensão de referência (kV)	Sistema desenvolvido (PPV)	Erro (PPV)	Sistema referência (PPV)	Erro (PPV)
40	39,64	0,2320	40,41	0,0016
50	46,34	0,2842	47,00	0,0020
60	54,00	0,3653	54,58	0,0027
70	63,22	0,3507	63,80	0,0026
80	72,94	0,4063	73,30	0,0030
90	78,51	0,4412	78,90	0,0032
100	87,49	0,4911	87,81	0,0036

Os resultados foram obtidos por meio do programa PPVCalc descrito no Apêndice 4. O erro intrínseco relativo em relação ao padrão é menor que 2% para toda faixa de operação e a exatidão do sistema desenvolvido é da ordem de 0,5% conforme ilustrado na Tabela 12, atendendo às exigências da Norma IEC 61676^[5] para este parâmetro.

Os dados referentes à tensão de aceleração coletados pelo sistema de controle e aquisição de cargas, no entanto, são do valor máximo de tensão aplicado ao tubo de raios X (kVp máximo^[2]), que é coincidente com o comando do gerador de raios X utilizado (seção 4.1.1), e ainda é o parâmetro mais utilizado nos painéis de comando dos geradores de alta tensão de geradores de raios X. Para este parâmetro, que representa maior interesse na aplicação proposta neste trabalho, resultados da comparação por medição simultânea com o sistema de aquisição desenvolvido e o sistema de referência são apresentados na Tabela 13. Os resultados também foram obtidos por meio do programa PPVCalc descrito no Apêndice 4.

Tabela 13 – Medição do kVp máximo^[2] pelo sistema desenvolvido e pelo sistema de referência do IEE/USP. O erro calculado pelo programa PPVCalc representa a exatidão de cada sistema para uma forma de onda de entrada, com nível de confiança de aproximadamente 68,3%.

Tensão de referência (kV)	Sistema desenvolvido (kV)	Erro (kV)	Sistema referência (kV)	Erro (kV)
40	42,82	0,0755	43,38	0,0699
50	50,37	0,0804	50,98	0,0821
60	59,50	0,0899	60,02	0,0967
70	69,83	0,1041	70,59	0,1137
80	81,75	0,1234	82,28	0,1326
90	88,90	0,1360	89,29	0,1234
100	99,63	0,1558	100,29	0,1616

Para este parâmetro o erro intrínseco relativo máximo em relação ao padrão é de 1,3% em toda faixa de operação e a exatidão de ambos os sistemas é melhor que 0,2%. Com estes resultados, é possível verificar a adequação do sistema desenvolvido para os propósitos deste trabalho, como coletor de cargas aplicadas ao tubo de raios X.

APÊNDICE 2 PROGRAMA PARA ANÁLISE DAS CARGAS DE TRABALHO

As cargas de trabalho aplicadas ao tubo de raios X neste trabalho foram numerosas, o que gera grande dificuldade em sua quantificação e análise. Para viabilizar a análise de resultados das cargas de trabalho que influenciam todos os dados de análise propostos por este trabalho foi desenvolvido um programa em linguagem Java^[55] na plataforma de desenvolvimento de domínio público NetBeans 4.1^[56].

O programa de controle e aquisição de cargas de trabalho detalhado na seção 4.2.1.2 armazena dados em forma de arquivo texto sem formatação em um microcomputador PC. Estes dados são armazenados em caracteres hexadecimais que representam sequencialmente o valor médio da corrente anódica, pico máximo da tensão de aceleração e tempo de aplicação de carga baseado na forma de onda de corrente^[7]. Esta seqüência de dados é armazenada em cada disparo efetuado pelo controlador.

Desta forma, o programa desenvolvido para análise das cargas de trabalho, denominado WAnalyzer (WAnalyzer.jar), processa esses dados, totalizando a carga estabelecida em produto corrente-tempo (mAs) e distribuindo esta em intervalos de tensão de cinco em cinco kilovolts. O programa ainda separa as cargas de trabalho por focos, por meio do limiar de corrente entre focos fino e grosso, pré-estabelecido como parâmetro de entrada, e conta o número de cargas que não foram aplicadas ao tubo de raios X durante o processo de envelhecimento com base em outro limiar de admissão, que também está disponível como entrada de dados do programa. Outra vantagem do programa é o processamento de um número ilimitado de arquivos contendo dados que podem totalizar 1000000 linhas individualmente, margem que garante o processamento dos dados aplicados ao tubo de raios X em sua totalidade.

A Figura 80 mostra a tela de entrada do programa, com os dados dos limiares de entrada situados ao lado direito superior, e os comandos de processamento dos dados na parte inferior, bem como os indicadores de resultados.

Figura 80. Tela de entrada do programa WAnalyzer utilizado para processamento e análise dos dados das cargas aplicadas ao tubo de raios X.

O programa executa ainda a propagação de erros, de acordo com a regra geral de propagação de erros^[57], utilizando para isso, dados de entrada da calibração efetuada no sistema de aquisição de dados conforme descrito no Apêndice 1, e dados de entrada da calibração do sistema de medição de tensão de aceleração e corrente anódica detalhado na seção 4.2.1.1. Para esta finalidade, foram criadas três classes de entradas de erros dos sistemas utilizados para medição dos parâmetros de aplicação de carga. Um exemplo de tela de entrada de parâmetros de erro para corrente anódica é dado na Figura 81. É possível verificar pelas equações (Ap 2.1) à (Ap 2.4) que os dados de entrada de erros podem ser dados em forma de fatores ou curvas de calibração, permitindo assim quatro possibilidades de combinação das incertezas relacionadas aos sistemas, para cada ponto obtido da forma de onda de tensão relativa à corrente:

$$U_i = Sis \cdot Div \quad (\text{Ap 2.1})$$

$$U_i = (a \cdot V_o + b) \cdot Div \quad (\text{Ap 2.2})$$

$$U_i = a \cdot Sis + b \quad (\text{Ap 2.3})$$

$$U_i = a_{Div} \cdot (a_{Sis} \cdot V_o + b_{Sis}) + b_{Div} \quad (\text{Ap 2.4})$$

Arquivo

Divisor

Razão Nominal mA/mV

Correção

U95 corr. k

Exatidão

Resolução

a = ±

b = ±

cov(a,b)

☐ Reta Calibração

Sistema Aquisição

Ganho Nominal

Correção/FC ☐ Correção

U95 k

Resolução Exatidão

$V_{in}(X) = a V_{out} + b$

a = ± cov(a,b)

b = ±

☐ Reta Calibração

Atualizar

Divisor Sistema

± ±

Figura 81. Tela de entrada de erros relacionado a medida de corrente anódica do programa WLanalyzer.

A mesma sistemática aplicada a medição da corrente anódica é aplicada a medição de alta tensão.

Para o tempo de aplicação de carga, as entradas de erros se referem apenas ao sistema de aquisição, já que a resposta em frequência nominal do divisor invasivo de alta tensão é muito próxima de um.

Como não existem registros de calibração ou verificação desta resposta em frequência, nem mesmo rastreabilidade nacional para a mesma, nenhuma avaliação deste parâmetro com relação ao divisor de alta tensão foi considerada na propagação de erros.

Os dados de entradas de erros podem ser gravados em arquivos de texto sem formatação, podendo ser utilizados posteriormente no caso de avaliação de outras séries de cargas. O mesmo ocorre com os resultados de saída das distribuições de cargas em mAs acumulado por faixa de tensão que podem ser abertos posteriormente em outros programas para análise e trabalho final com os dados. Os erros de saída indicados apresentam nível de confiança de 68,3% para a carga e faixas de tensão utilizadas na distribuição.

APÊNDICE 3 PROGRAMA PARA DETERMINAÇÃO DAS CSR'S.

Diversas metodologias podem ser adotadas para a determinação da CSR's ^[11,28,29], todas elas, no entanto, constituem basicamente no ajuste de uma função matemática que possa descrever o comportamento da relação entre a intensidade do feixe (ou número de fótons) de radiação X e espessura de material absorvedor.

O ajuste de funções matemáticas exige, no entanto, várias considerações relacionadas à qualidade do resultado (teste de χ^2 , avaliação de resíduos ponderados, etc.) para que se possa confiar nos resultados posteriormente interpolados. Isso normalmente demanda tempo, exige muitas vezes ferramentas complexas de ajuste e implica em maior complexidade na determinação das incertezas dos valores encontrados.

A determinação da CSR proposta neste trabalho exige resultados confiáveis que possam ser automatizados para reprodutibilidade do método de determinação da CSR e das incertezas de medição associadas. O ajuste de funções matemáticas complexas normalmente implica em aumento de tempo de ensaio e grande esforço na criação de metodologias que reduzam as dificuldades de padronização dos métodos. Desta forma, a maneira encontrada para atender a estes requisitos foi o emprego de uma função de interpolação entre dois pontos mais próximos aos valores desejados de CSR's ou espessuras equivalentes. Este processo pode ser feito por uma interpolação linear simples ^[31,32] ou interpolação logarítmica ^[30], o que permitiu a elaboração de um programa computacional envolvendo os dois processos de ajuste, garantindo a reprodutibilidade da metodologia de cálculo e ainda o tratamento das fontes de incerteza envolvidas no processo.

Para que fosse possível viabilizar as metodologias de cálculo das CSR's foi desenvolvido um programa em linguagem Java, na plataforma de domínio público Netbeans 4.1 intitulado HVLCalc (HVLCalc.jar). A Figura 82 mostra a tela de entrada do programa.

Figura 82. Tela de entrada do programa HVLCalc utilizado para determinação da primeira e segunda CSR's.

O programa trabalha com arquivos de dados de taxas de exposição e espessuras de material atenuador para estabelecimento das curvas de atenuação em dois formatos possíveis:

- **Primeiro formato:** Uso de espessuras determinadas ponto a ponto.

Formato:

<Espessura (mm)> <Incerteza espessura (mm)> <Intensidades na unidade leitura>

Exemplo

:

0.0	0.0	456.3	456.3	456.4	456.9
0.52	0.08	329.5	328.5	329.9	328.5
0.61	0.089	300.4	300.6	300.0	299.5

- **Segundo formato:** Utilizando a codificação dos filtros.

Esta codificação segue uma regra de utilização do número seqüencial dos filtros precedidos de letras "C" maiúsculas (Código).

Formato:

<Código filtro> <Intensidades (unidade leitura)>

Exemplo:

C0	456.3	456.3	456.4	456.9
C1C2C3	329.5	328.5	329.9	328.5
C8C1	300.4	300.6	300.0	299.5

No primeiro formato, as incertezas das espessuras são provenientes do arquivo de entrada (este deve apresentar as incertezas combinadas dos filtros com fator de abrangência $k=1$). No segundo formato, as incertezas serão combinadas com as informações dos filtros que são inseridas e também podem ser gravadas no programa.

Em sua tela inicial é possível visualizar a entrada de dados do menu Arquivo, onde os arquivos com os dados armazenados são carregados. Vários arquivos podem ser carregados ao mesmo tempo para que os cálculos possam ser efetuados e os mesmos são apresentados em uma lista para que se possa garantir que os arquivos selecionados são os de interesse.

Uma entrada de erros é disponibilizada pelo programa como pode ser visto na Figura 83 e apresenta todas entrada de dados de filtros (caso utilizado o modelo de entrada de arquivo codificado) e do sistema dosimétrico, onde os dados para os cálculos de incerteza podem ser indicados em percentual ou em unidade de leitura. Todas essas informações podem ser gravadas para preservar as configurações adotadas em cada ensaio.

Arquivo

Dados dos Filtros

Espessura dos Filtros				Incerteza ($k = 1$)				Espessura dos Filtros				Incerteza ($k = 1$)			
C1	0.1	mmAl	±	0.01	mmAl	C11	1.0	mmAl	±	0.01	mmAl				
C2	0.1	mmAl	±	0.01	mmAl	C12	1.0	mmAl	±	0.01	mmAl				
C3	0.1	mmAl	±	0.01	mmAl	C13	0.0	mmAl	±	0.0	mmAl				
C4	0.1	mmAl	±	0.01	mmAl	C14	0.0	mmAl	±	0.0	mmAl				
C5	0.1	mmAl	±	0.01	mmAl	C15	0.0	mmAl	±	0.0	mmAl				
C6	1.0	mmAl	±	0.01	mmAl	C16	0.0	mmAl	±	0.0	mmAl				
C7	1.0	mmAl	±	0.01	mmAl	C17	0.0	mmAl	±	0.0	mmAl				
C8	0.5	mmAl	±	0.01	mmAl	C18	0.0	mmAl	±	0.0	mmAl				
C9	0.5	mmAl	±	0.01	mmAl	C19	0.0	mmAl	±	0.0	mmAl				
C10	2.0	mmAl	±	0.01	mmAl	C20	0.0	mmAl	±	0.0	mmAl				

Dados Sistema Dosimétrico

Unidade de leitura: mR/min Resolução: 1.0 $k = 0.75688772$

Grandeza Influência	Incerteza	$k =$	Grandeza Influência	Incerteza	$k =$
Exatidão	4.0	% 0.75688772		0.0	ul 2.0
Dependência Energética	0.5	% 0.75688772			
Dependência Taxa	0.5	% 0.75688772			
	0.0	% 0.75688772			
	0.0	% 0.75688772			

Figura 83. Tela de entrada de erros relacionados a determinação das CSR's efetuadas pelo programa HVLCalc.

Ao final de todos os cálculos, uma lista com os valores finais das CSR's e incertezas combinadas relacionadas a seus respectivos arquivos é exibida. Estes dados são armazenados no programa, podendo ser salvos em um arquivo de saída por meio do menu Arquivo.

A propagação de erros segue a regra geral de propagação de erro^[57], com os resultados indicados dentro de um nível de confiança de 68,3%.

As duas metodologias de interpolação (linear e logarítmica) apresentam resultados equivalentes dentro das incertezas calculadas, desde que o critério de interposição de maior número de filtros com espessuras menores nas áreas de interesse seja seguido^[32].

APÊNDICE 4 PROGRAMA PARA CÁLCULO DO PPV

O grande número de informações provenientes das medidas intermediárias do PPV, descritas na seção 4.3.3, a complexidade do cálculo do PPV e consequentemente da propagação de erro, tanto no sistema invasivo de referência (seção 4.3.3.3) e sistema invasivo desenvolvido (seção 4.2.1.2), como no sistema não invasivo sob ensaio, motivou o desenvolvimento de outro programa neste trabalho, garantindo a padronização e reprodutibilidade do método de cálculo.

O programa intitulado PPVCalc (PPVCalc.jar) foi desenvolvido em linguagem Java, na plataforma de domínio público Netbeans 4.1. Este programa trabalha com arquivos de dados de tensão de aceleração capturados pelos sistemas de aquisição que são acoplados ao divisor de alta tensão e dados gerados pelo medidor não invasivo, conforme mostrado na Figura 34.

A Figura 84 apresenta a tela principal do programa onde é possível visualizar que vários arquivos podem ser carregados ao mesmo tempo.

Figura 84. Tela principal programa PPVCalc.jar.

Os cálculos podem ser efetuados para formas de onda de equipamentos utilizados na faixa de diagnóstico e CT ou Mamografia, sendo para este último necessário a indicação na tela inicial da opção “Mamográfico”.

Neste trabalho, o interesse é voltado apenas às formas de onda obtidas de um equipamento de diagnóstico, mas o programa foi preparado de forma a abranger todas as possibilidades relacionadas na Norma IEC 61676^[5]. Para adequação ao coletor de dados apresentado na seção 4.2.1, que transmite dados em palavras hexadecimais de oito bits em uma seqüência específica estabelecida (Apêndice 2), a opção “Dados Hexa” é disponibilizada no programa. Existe ainda a opção de correção da resposta em frequência que será detalhada no Apêndice 5.

Anteriormente a qualquer cálculo efetuado pelo programa, os dados armazenados em cada arquivo são condicionados para que se possa eliminar o conjunto de dados que não fazem parte do sinal, mas que foram armazenados pelo sistema, como pode ser visualizado no exemplo da Figura 85. O programa incorpora a classe SignCond.java, que contém o método “SignalCond”, que retorna um vetor de dados filtrados, ignorando a parte dos dados em que não existe informação do potencial aplicado ao tubo de raios X. Seu resultado pode ser visualizado na Figura 86.

Figura 85. Sinal de tensão de aceleração armazenado originalmente em 10000 posições de memória em uma frequência de aquisição de aproximadamente 3,5 kHz.

Figura 86. Vetor de saída do método “SignalCond” da classe SignCond.java para o sinal de entrada da Figura 85.

O cálculo do PPV é efetuado com base no vetor de dados já filtrado. Este filtro acelera o processo de cálculo do PPV e de sua incerteza. Para uma dada probabilidade de ocorrência $p(U_i)$ de um valor de tensão no intervalo $[U_i - \Delta U/2, U_i + \Delta U/2]$, o PPV ($\hat{U}$) pode ser dado por:

$$\hat{U} = \frac{\sum_{i=1}^n p(U_i) \cdot w(U_i) \cdot U_i}{\sum_{i=1}^n p(U_i) \cdot w(U_i)} \quad (\text{Ap 4.1})$$

onde, conforme estabelecido pela norma IEC 61676^[5], U_i é dado em unidades de tensão e $w(U_i)$ segue as funções de ponderação para aplicação em raios X diagnóstico convencional, dentário, CT e fluoroscopia ou as funções de ponderação para aplicação em mamografia.

Quando utilizamos uma taxa amostragem constante, o que ocorre com quase a totalidade dos sistemas de aquisição, a probabilidade $p(U_i)$ pode ser admitida como sendo 1, assim, podemos resumir a equação (Ap 4.1):

$$\hat{U} = \frac{\sum_{i=1}^n w(U_i) \cdot U_i}{\sum_{i=1}^n w(U_i)} \quad (\text{Ap 4.2})$$

Para implementação do cálculo do PPV, foi desenvolvido o método “PPVC”, dentro da classe PPVCalc.java. Este método carrega o vetor de dados filtrado e as entradas de correção e/ou curvas de calibração do sistema de entrada de erros. Para isso, um sistema de entrada de dados para propagação de erros foi desenvolvido, como mostra a Figura 87, onde todos os fatores de calibração suas respectivas incertezas podem ser inseridas, gravadas e recuperadas, de forma a possibilitar a personalização de cada aplicação.

Dentro do sistema de entrada de erros do divisor de alta tensão / medidor não invasivo (kVp meter) é possível estabelecer a razão nominal, a correção desta razão dada normalmente pela calibração do divisor, a incerteza da calibração e seu fator de abrangência (dados disponibilizados pelo certificado de calibração do divisor), sua exatidão declarada e ainda sua resolução nominal. No sistema de aquisição podemos dar entrada dos dados de seu ganho nominal, seu fator de calibração ou correção, a incerteza deste fator com seu grau de abrangência, sua exatidão declarada e sua resolução nominal.

Tanto para o divisor/kVp meter e sistema de aquisição, é possível entrar com dados de retas de calibração, já que os fatores de calibração normalmente não são os mesmos em toda a faixa de utilização. Os erros dos parâmetros e suas covariâncias também devem ser inseridos para que se possa propagar o erro do sistema de forma correta.

The screenshot shows a software window titled "Arquivo" with a menu bar and a toolbar. It is divided into two main panels: "Divisor/kVp meter" on the left and "Sistema Aquisição" on the right. Both panels contain input fields for various parameters and checkboxes for calibration curves. At the bottom, there is an "Atualizar" button and summary fields for "Divisor" and "Sistema".

Divisor/kVp meter section:

- Razão Nominal: 20000.0
- Correção: 0.0
- U95 corr.: 0.0 k 2.0
- Exatidão: 0.0
- Resolução: 0.0
- a = 1.0 ± 0.0
- b = 0.0 ± 0.0
- cov(a,b): 0.0
- ☐ Reta Calibração

Sistema Aquisição section:

- Ganho Nominal: 1.0
- Correção/FC: Valor 1.0 ☐ Correção
- U95: 0.0 k 2.0
- Resolução: 0.0 Exatidão: 0.0
- Vin(X) = a Vout + b
- a = 1.0 ± 0.0 cov(a,b): 0.0
- b = 0.0 ± 0.0
- ☐ Reta Calibração

Bottom section:

- Atualizar button
- Divisor: 20000.0 ± 0.0
- Sistema: 1.0 ± 0.0

Figura 87. Entrada de dados dos sistemas de aquisição e divisor de alta tensão / medidor não invasivo.

Com estes dados o método “PPVC” pode trabalhar com as seguintes possibilidades:

1. Fator de calibração do divisor de alta tensão e fator de calibração do sistema de aquisição;
2. Fator de calibração do divisor de alta tensão e curva de calibração do sistema de aquisição;
3. Curva de calibração do divisor de alta tensão e fator de calibração do sistema de aquisição;
4. Curva de calibração do divisor de alta tensão e curva de calibração do sistema de aquisição.

Para cada opção, as seguintes equações podem ser empregadas, sendo Sis o fator de calibração associada ao sistema de aquisição e Div o fator de calibração associado ao divisor de alta tensão, V_o é a tensão indicada pelo sistema de aquisição:

Caso 1:

$$U_i = Sis \cdot Div \quad (\text{Ap 4.3})$$

Caso 2:

$$U_i = (a \cdot V_o + b) \cdot Div \quad (\text{Ap 4.4})$$

Caso 3:

$$U_i = a \cdot Sis + b \quad (\text{Ap 4.5})$$

Caso 4:

$$U_i = a_{Div} \cdot (a_{Sis} \cdot V_o + b_{Sis}) + b_{Div} \quad (\text{Ap 4.6})$$

A propagação de cada uma das equações dentre os casos acima, (Ap 4.3) à (Ap 4.6), é efetuada segundo a regra geral de propagação de erro^[57]. Cada valor de erro σU_i para um ponto do vetor de tensão de entrada U_i , irá compor um elemento do vetor de coeficientes de sensibilidade indicado na equação (Ap 4.7), ou seja, as derivadas parciais obtidas da equação de cálculo do PPV (Ap 4.2).

$$\frac{\partial \hat{U}}{\partial U_i} = \left[\frac{[w'(U_i) \cdot U_i + w(U_i)] \cdot \left[\sum_{i=1}^n w(U_i) \right] - \left[\left(\sum_{i=1}^n w(U_i) \cdot U_i \right) \cdot w'(U_i) \right]}{\left[\sum_{i=1}^n w(U_i) \right]^2} \right] \quad (\text{Ap 4.7})$$

Cada expressão $w'U_i$ representa as derivadas parciais das funções de ponderação $w(U_i)$ estabelecidas para cada aplicação de acordo com a norma IEC 61676^[5]. Estes dados de propagação de erro são executados pelo método “PPVE” dentro da classe PPVCalc.java. Os erros para cada forma de onda processada é indicado pelo programa dentro de um nível de confiança de 68,3%.

Os resultados com os nomes dos arquivos contendo as formas de onda, seu valor em PPV e o erro propagado com um nível de confiança de 68,3% podem ser salvos para posterior análise e organização dos dados. Adicionalmente, são incluídos nos arquivos, os valores calculados das máximas tensões de aceleração para cada forma de onda de entrada, com seus respectivos erros, também propagados com um nível de confiança de 68,3%. Este cálculo implementado no método PPVCalc.java, foi utilizado para validação do sistema de aquisição de cargas de trabalho, conforme descrito no Apêndice 1.

APÊNDICE 5 ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

O programa para o cálculo do PPV, PPVCalc, descrito no Apêndice 4, apresenta a possibilidade de correção da resposta em frequência do sistema de medição. Esta correção normalmente é necessária quando o divisor de alta tensão não apresenta resposta de ganho constante, ou muito próximo a um valor constante, na faixa de frequência de operação do gerador de alta tensão do gerador de raios X. No caso deste trabalho, dentro da faixa de frequência do gerador utilizado (seção 4.1.1), o divisor de alta tensão apresenta resposta praticamente constante como indicado na seção 4.2.1.1. Além deste parâmetro, a frequência de amostragem dos sistemas de aquisição devem ser de pelo menos duas vezes o valor da maior harmônica de interesse do gerador de alta tensão do gerador de raios X, de acordo com o teorema de Shannon-Nyquist^[58], desde que o sinal seja periódico, o que pode ser facilmente alcançado com os dois sistemas de aquisição ligados ao divisor de alta tensão (sistema de referência detalhado na seção 4.3.3.4.2 e sistema desenvolvido detalhado na seção 4.2.1.2) pelas características do gerador de alta tensão utilizado (monofásico 60 Hz, com retificação de onda completa – 120 Hz).

Uma das entradas do programa PPVCalc é a entrada de dados de resposta em frequência do sistema como mostra a Figura 88. Nesta entrada de dados é possível estabelecer a curva de resposta em frequência do divisor de alta tensão ou sistema, os erros dos parâmetros de correção e suas covariâncias para que as incertezas desta correção possam ser corretamente propagadas. Estas informações também podem ser inseridas, gravadas e recuperadas, de forma a possibilitar a personalização de cada aplicação. Apesar dos dados de entrada de propagação de erro já estarem disponíveis no programa PPVCalc, este método ainda não foi concluído, uma vez que seu uso não seria necessário no sistema empregado para o cálculo do PPV para o gerador em questão.

Para que o sistema efetue a correção de forma adequada, deve-se informar a frequência de amostragem dos dados, e no caso de se desejar um arquivo de espectro das magnitudes, deve-se estabelecer a frequência da última harmônica que se deseja apresentar. Esta informação não influencia a correção da resposta em frequência para o cálculo do PPV, mas é interessante quando

queremos avaliar a capacidade dos vários sistemas em obter a informação relevante para o cálculo do PPV.

Arquivo

Frequência de Amostragem ... 3500.0 ☐ Gerar Arquivo de espectro

Frequência última harmônica ... 2400.0

Função de correção

$A + B1 \cdot X + B2 \cdot X^2 + B3 \cdot X^3 + B4 \cdot X^4 + B5 \cdot X^5 + B6 \cdot X^6$

Onde: $X = \text{Log10 Frequência}$

Covariâncias

	A	B1	B2	B3	B4	B5	B6
A	1.0						
B1	0.0	1.0					
B2	0.0	0.0	1.0				
B3	0.0	0.0	0.0	1.0			
B4	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0		
B5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	
B6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0

Atualizar

Figura 88. Entrada de dados para correção da resposta em frequência e geração de espectro de magnitude das formas de onda.

Se a opção de geração de espectro for acionada, a cada arquivo calculado, uma interrupção para que os dados de saída do espectros de magnitude em função da frequência sejam gravados é apresentada.

Após o condicionamento do sinal, este pode ser ou não corrigido pelo procedimento de Transformada Discreta de Fourier (DFT). No caso de existir a necessidade de correção da resposta em frequência, é preciso efetuar a DFT. Para isso foi desenvolvida a classe FFTcalc.java que apresenta os métodos “DFTcorrect” e “FSpectra”.

Os coeficientes obtidos pela transformada de Fourier de um sinal não periódico podem ser descritos pelo método de senos e cossenos^[59]. Para que se possa efetuar o cálculo com estes dados, é necessário um duplo vetor de entrada, com os dados de tempo e amplitude. Isto dificulta e torna mais complexa a rotina de programação, e, como na maioria dos dados armazenados por sistemas de aquisição a única informação apresentada é um vetor de amplitudes, é necessária uma adaptação do método, o que já existe em rotinas computacionais em linguagem C++^[60].

Os dois métodos, um para correção e outro para geração de espectro de saída de magnitude em função da frequência, respectivamente, utilizam da

DFT como base de cálculo, através de uma rotina em linguagem JAVA, adaptada da rotina desenvolvida por Alves e Borba (2002)^[60]. Esta adaptação para o processamento matemático computacional, com o uso de um vetor de dados de amplitude apenas, é muito utilizada na prática de tratamento de sinais elétricos e imagens^[61], sendo necessário apenas, que a taxa de amostragem do sistema apresente variações desprezíveis, o que normalmente é alcançado por sistemas microcontrolados que constituem praticamente a totalidade dos sistemas de aquisição. Esta informação no método “FSpectra” compõe um vetor duplo de magnitudes e frequências respectivamente, que podem ser gravados para visualização em qualquer ferramenta gráfica disponível.

A correção da resposta em frequência é dada por:

$$f(X) = A + B1 \cdot X + B2 \cdot X^2 + B3 \cdot X^3 + B4 \cdot X^4 + B5 \cdot X^5 + B6 \cdot X^6 \quad (\text{Ap 5.1})$$

onde:

$$X = \text{Log}_{10} \text{ Frequência};$$

Foram avaliados os dois sistemas de aquisição de sinais, padrão (seção 4.3.3.4.2) e desenvolvido (seção 4.2.1.2). O divisor de alta tensão foi empregado com os dois sistemas de aquisição de dados simultaneamente (Figura 34) para avaliação da capacidade de resposta do sistema desenvolvido.

Considerando o erro da base de tempo dos dois sistemas desprezível, podemos avaliar inicialmente a resposta em frequência dos mesmos. Para que se possa efetuar uma avaliação mais detalhada da capacidade de resposta em frequência dos dois sistemas, as saídas de magnitude em função da frequência são apresentadas na Figura 89 e Figura 90, com análise até a 20^a harmônica de 60 Hz. O método “FSpectra”, conforme descrito anteriormente, não está completamente desenvolvido, então os erros das magnitudes ainda não são exibidos nesta primeira versão do programa PPVCalc.jar.

Figura 89. Espectro de magnitudes de tensão em função da frequência para o sistema de referência descrito na seção 4.3.3.4.2.

Figura 90. Espectro de magnitudes de tensão em função da frequência para o sistema desenvolvido descrito na seção 4.2.1.2.

É possível perceber, que para a frequência de operação do gerador de alta tensão do gerador de raios X utilizado no processo, os dois sistemas apresentam praticamente as mesmas respostas, sendo o sistema desenvolvido aceitável para aquisição dos dados neste gerador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ¹ INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Medical radiology - Terminology**. Pergamon Press, New York, 1984 (IEC-788).
- ² F.N. Ranallo. Doctor Thesis: **The Non invasive Mesurement of X-Ray Tube Potencial**, University of Wisconsin-Madison, (1993).
- ³ H.M. Kramer, H.J. Selbach, W.J. Iles. **The practical peak voltage of diagnostic X-ray generators**. Br. J. Radiol. 71, 200-209 (1998).
- ⁴ Y. Baorong, H.M. Kramer, H.J. Selbach, B. Lange. **Experimental determination of practical peak voltage**. Br. J. Radiol. 73, 641-649 (2000).
- ⁵ INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Dosimetric instruments for non-invasive measurement of X-ray tube voltage in diagnostic radiology**. Pergamon Press, New York, 2002 (IEC-61676).
- ⁶ R. Nowotny, K. Meghzifene. **Simulation of the effect of anode surface roughness on diagnostic x-ray spectra**. Phys. Med. Biol. 47, 3973-3983 (2002).
- ⁷ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Equipamento eletromédico – Parte 2-7: Prescrições particulares para segurança de geradores de alta tensão de geradores de raio X para diagnóstico médico**. ABNT, Rio de Janeiro, 2001 (NBR IEC 60601-2-7).
- ⁸ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Equipamento eletromédico – Parte 2-28: Prescrições particulares para segurança aplicáveis aos conjunto-fontes de radiação X e aos conjunto-emissores de radiação X para diagnóstico médico**. ABNT, Rio de Janeiro, 2001 (NBR IEC 60601-2-28).
- ⁹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Equipamento eletromédico – Parte 1: Prescrições gerais de segurança 3. Norma Colateral: Prescrições gerais para proteção contra radiação de equipamentos de raios X para fins diagnósticos**. ABNT, Rio de Janeiro, 2001 (NBR IEC 60601-1-3).
- ¹⁰ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Equipamento eletromédico – Parte 2-32: Prescrições particulares para segurança dos equipamentos associados aos equipamentos de raios X**. ABNT, Rio de Janeiro, 2001 (NBR IEC 60601-2-32).
- ¹¹ H. E. Johns. **The Physics of Radiology**. 4^a ed. Charles C Thomas – Publisher, Springfield, Illinois, USA, 1983.
- ¹² P. Sprawls. **Physical Principles of Medical Imaging**. Medical Physics

Publishing, Wisconsin, Madison, USA, 1995.

¹³ A.B. Wolbarst. **Physics of Radiology**. Appleton & Lange, Norwalk, Connecticut, USA, 1993.

¹⁴ E.A Hoxter. **Introdução à Técnica Radiográfica**. Edgard Blücher, Siemens A. G., 1977.

¹⁵ J. Sun, X. Ding, M. Nakaoka and H. Takano. **Series resonant ZCS-PFM DC-DC converter with multistage rectified voltage multiplier and dual-mode PFM control scheme for medical-use high-voltage X-ray power generator**. IEE Proc.-Electr. Power Appl., 147, 527-534, (2000).

¹⁶ W.T. Sobol. **High frequency x-ray generator basics**. Medical Physics. 29, 132-143, (2002).

¹⁷ T.S. Curry, J.L. Dowdey, R.C. Murry Jr., **Christensen's Physics of Diagnostic Radiology**. 3^a ed., Lea & Febiger, Philadelphia, USA, 1984.

¹⁸ R.F. Mould. **A Century of X-Rays and Radioactivity in Medicine with Emphasis on Photographic Records of the Early Years**. INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING, Bristol, 1993.

¹⁹ P. Rastello. **Global Tube Engineering - X-Ray TUBE TRAINING (GE)**. GCO-Buc - Rev 02 - 2001. Disponível em: <http://www.e-radiography.net/radtech>. Acesso em: 05 nov. 2006.

²⁰ INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION. **Electrical, thermal and loading characteristics of rotating anode X-ray tubes for medical diagnosis**. Geneva, Switzerland, 1998 (IEC 60613).

²¹ H.D. Nagel. **Limitations in the determination of total filtration of x-ray tube assemblies**. Phys. Med. Biol., 2, 271-289 (1988).

²² D. Simpkin. **Evaluation of NCRP Report No 49 Assumptions on Workloads and Use Factors in Diagnostic Radiology Facilities**. Medical Physics 23, 577-584 (1996).

²³ P.A.A. Pereira, T.A.C. Furquim, P.R. Costa. **Avaliação da dose na entrada da pele em equipamentos de diagnóstico por imagens utilizando distribuições de cargas de trabalho**. Anais do XI Congresso Brasileiro de Física Médica, Ribeirão Preto - SP, Brasil, 2006.

²⁴ Intel Corporation. **MCS® 51 Microcontroller Family User's Manual**. Literature Sales, P.O. BOX 7641, 1994.

²⁵ MetaLink Corporation. **8051 Cross Assembler User's Manual**. P.O. BOX 1329, Chandler, Arizona, 1989.

-
- ²⁶ ICRU 17. ***Radiation Dosimetry: X Rays Generated at Potentials of 5 to 150 kV***. Washington: ICRU, 39 p. 1970.
- ²⁷ INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. ***Medical diagnostic X ray-equipment – Radiation Conditions for use in the determination of characteristics***. Geneva, Switzerland, 2005 (IEC-61267)
- ²⁸ B.R. Archer, J.I.Thornby, S.C. Bushong. ***Diagnostic X-Ray Shielding Design Based on an Empirical Model of Photon Attenuation***. Health Phys. 44, 507-517 (1983).
- ²⁹ C.C. Guimarães. ***Monitoração individual externa: Experimentos e simulações com o método de Monte Carlo***. Tese (doutorado em Física) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo. 211 p. (2005).
- ³⁰ AMERICAN COLLEGE OF RADIOLOGY. ***Mammography quality control manual***. ACR – Committee on Quality Assurance in Mammography, 1999.
- ³¹ K.J. Gregory, J.E. Pattison, G. Bibbo. ***Uncertainties of exposure-related quantities in mammographic x-ray unit quality control***. Med Phys. 33, 687-698 (2006).
- ³² B.G. Gilmore, K. Cranley. ***Errors in the determination of total filtration of diagnostic x-ray tubes by the HVL method***. Phys. Med. Biol. 35, 999-1015 (1990).
- ³³ INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. ***X-ray assemblies for medical diagnosis – Characteristics of focal spots***. IEC 60336, 3rd edition; Genève, 1993.
- ³⁴ NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION. ***Measurement of Dimensions and Properties of Focal Spots of Diagnostic X-Ray Tubes***. Publication n° XR5, 1992.
- ³⁵ D.Y. Nersissian. ***Determinação das dimensões do ponto focal de tubos de raios X utilizando um sensor CCD e o método das funções de transferência*** 2004. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energética e Nucleares, São Paulo
- ³⁶ J.G.P. Peixoto, H.J. Selbach, H.M. Kramer, B. Lange. ***Tentative type test of a non-invasive high-voltage meter with respect to the quantity of practical peak voltage***. PTB-Bericht Dos-38. Braunschweig, (2001).
- ³⁷ G.F. Knoll. ***Radiation Detection and Measurement***. 3rd ed., New York, NY: John Wiley & Sons, Inc. 2000.
- ³⁸ S. Myajima and K. Imagawa. ***CdZnTe detector in diagnostic x-ray spectroscopy***. Medical Physics. 29, 1421-1429 (2002).

-
- ³⁹ S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako et al. **Geant4: a simulation toolkit**. Nucl. Instr. Meth. A 506, 250 (2003).
- ⁴⁰ H.H. Jorch and J. L. Campbell. **On the analytic fitting of full energy peaks from Ge(Li) and Si(Li) photon detectors**. Nucl. Instr. Meth. 143, 551-559 (1977).
- ⁴¹ V. Zobel, J. Eberth, U. Eberth and E. Eube. **²²⁶Ra as calibration standard for Ge(Li) spectrometers**. Nucl. Instr. Meth. 141, 329-336 (1977).
- ⁴² J.Y. Zevallos-Chávez, M.T.F. da Cruz, M.N. Martins, V.P. Likhachev, C.B. Zamboni, S.P. Camargo, F.A. Genezini, J.A.G. Medeiros, M.M. Hindi. **Response function of a germanium detector to photon energies between 6 and 120keV**. Nucl. Instr. Meth. In Phys. Res. A 457, 212-219 (2001).
- ⁴³ M. Bottaro, M. Morales. **Ajuste de fotopicos em espectros obtidos com detectores de Telureto de Cádmio e Zinco (CZT) e Telureto de Cádmio (CdTe)**. XI Congresso Brasileiro de Física Médica, Ribeirão Preto – SP, 2006.
- ⁴⁴ M. Morales, D.A.B. Bonifácio, M. Bottaro, M.A.G. Pereira. **Monte Carlo and least squares methods applied in unfolding of X ray spectra measured with cadmium telluride detectors**. 10th International Symposium on Radiation Physics, Portugal (2006). Aceito para publicação no periódico Nuclear Instruments and Methods, Section A.
- ⁴⁵ O. Helene. **Método dos mínimos quadrados com formalismo matricial**. 1^a ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 102 p. (2006).
- ⁴⁶ M. Morhàc. **Deconvolution methods and their applications in the analysis of gamma-ray spectra**. Nucl. Instr. Meth. A 559, 119 (2006).
- ⁴⁷ C. Takiya, O. Helene, E. do Nascimento, V.R. Vanin. **Minimum variance regularization in linear inverse problem**. Nucl. Instr. Meth. A 523, 186 (2004).
- ⁴⁸ S. P. Tsai, E.R. Mucciolo, O. Helene. **Relocation of multichannel spectra**. Nucl. Instr. Meth. In Phys. Res. A 345, 538-540 (1994).
- ⁴⁹ O. Helene, M. Morales. **Comparison of two methods for relocation of multichannel spectra**. Nucl. Instr. Meth. In Phys. Res. A 378, 624-626 (1996).
- ⁵⁰ D.E. Cullen, J.H. Hubbel, L. Kissel. **EPDL97: the Evaluated Photon Data Library, '97 version**. National Institute of Standards and Technology. University of Califórnia, Gaithersburg, MD 20899 (september, 1997). Disponível em <http://www-nds.iaea.org/epdl97/document/epdl97.htm>. Acesso em: 01 dez. 2006.
- ⁵¹ T.G. Mattos, J.G. Moreira, A.P.F. Atman. **A new method to study stochastic growth equation: Application to the Edwards-Wilkinson Equation**. Brazilian

Journal of Physics, 3A, 746-749 (2006).

⁵² INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. ***X-ray assemblies for medical diagnosis – Characteristics of focal spots***. IEC 60336, 4th edition; Genève, 2006.

⁵³ Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), ***Guia para Expressão das Incertezas de Medição***, 3^a edição, 2003.

⁵⁴ Gnuplot Versio 4.0 – An Interactive Plotting Program - Thomas Williams & Colin Kelley – ed. 2004.

⁵⁵ Java© Runtime environment, version 5.0, Update 9 - Sun Microsystems. Disponível em: <http://www.sun.com>. Acesso em: 15 dez. 2006.

⁵⁶ NetBeans IDE version 4.1. Disponível em: <http://www.netbeans.org>. Acesso em: 19 abr. 2006.

⁵⁷ O.A.M. Helene, V.R. Vanin. ***Tratamento Estatístico de Dados em Física Experimental***. São Paulo: Edgard Blücher, 105 p. (1981).

⁵⁸ H. Nyquist. ***Certain topics in telegraph transmission theory***. Trans. AIEE, vol. 47, pp. 617-644, Apr. 1928. Reprint as classic paper in Proc. IEEE, Vol. 90, n^o 2, Feb 2002. Disponível em: <http://www.loe.ee.upatras.gr/Comes/Notes/Nyquist.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2006.

⁵⁹ E. Butkov. ***Física Matemática***. 1^a ed., Editora ETC. 1988.

⁶⁰ A.C.B. Alves, L.S. Borba. ***Monitoramento das Distorções Harmônicas Produzidas por Computadores Pessoais***. 54 Reunião Anual da SBPC, 2002, Goiânia. Trabalho apresentado em painel em Julho de 2002. Goiânia.

⁶¹ C.A. Ynoguti. ***Curso: Transformada discreta de Fourier***. Instituto Nacional de Telecomunicações. Disponível em: <http://www.inatel.com.br>. Acesso em: 25 jul. 2006.