

Sistema Magnetron-Antena Corneta

Benedito Sá de Araújo Filho e Cynthia Junqueira
IAE-Instituto de Aeronáutica e Espaço – CTA

Resumo - Os perigos da interferência eletromagnética (EMI) são normalmente controlados pela adoção de práticas de compatibilidade eletromagnética (EMC). Práticas intencionais de EMI estão classificadas como armas de energia direta que podem causar a interrupção momentânea ou definitiva das comunicações, dos sistemas de comando e de diversos aparelhos eletrônicos de detecção. Este trabalho descreve os resultados dos ensaios de potência recebida de um sistema Magnetron-Antena Corneta realizados com a finalidade de se definir o nível de potência necessário para causar danos a uma calculadora eletrônica. É verificada também a atenuação da potência quando se varia a distância entre o sistema transmissor e receptor.

Palavras-chaves – interferência eletromagnética, magnetron, antena.

I. INTRODUÇÃO

Interferência eletromagnética (EMI) é uma forma crescente e séria de poluição ambiental. Seus efeitos vão desde perturbações pequenas como estática em recepção de rádio, até acidentes potencialmente fatais devido à falha de sistemas críticos de controle de segurança. Várias formas diferentes de EMI podem causar mau funcionamento em equipamentos eletrônicos, impedir o uso adequado do espectro de rádio frequência, interferir no funcionamento de sistemas vitais e ter até mesmo um efeito direto sobre os tecidos humanos.

Normalmente os perigos da EMI são controlados pela adoção de práticas de compatibilidade eletromagnéticas (EMC), mas muitas vezes são intencionais e pertencem à família das chamadas armas de energia direta, tratando-se de aparelhos de diferentes tamanhos (da valise ao caminhão), compostos de uma fonte de alimentação, de um gerador de impulso, de uma válvula de alta frequência e de uma antena, capazes de produzir impulsos eletromagnéticos muito breves e muito poderosos, com frequência, alcance e direcionamento variáveis.

Sem barulho, sem fumaça, sem cheiro. O artefato é invisível: não levanta poeira, não abre nenhuma cratera. Sem mortes, sem macas tampouco. Seu impacto direto sobre os seres humanos é considerado nulo devido à brevidade dos impulsos de microondas, embora existam poucos estudos a respeito. Em contrapartida, todos os equipamentos elétricos e eletrônicos são vulneráveis a esses impulsos e quanto mais aumenta a miniaturização dos componentes sua susceptibilidade ao meio eletromagnético é maior.

Relatórios publicados pelo Lawrence Livermore National Laboratory [1] mostram o interesse americano por este tipo de artefato desde os anos 80, e que inicialmente foram ensaiados para a adequação de sistemas de proteção contra as bombas eletromagnéticas aos aviões F16. Relatos mostram um teste em condições reais realizado com um helicóptero na Califórnia em 1997[2].

Benedito Sá de Araújo Filho, benedito@iae.cta.br, Tel 55-12-39474729, Cynthia Junqueira, cynthia@iae.cta.br, Tel 55-12-39474937.

Este trabalho foi financiado pelo COMAER, através do Projeto Thor.

Neste estudo, o foco de interesse está voltado para a definição do nível de potência necessário para causar danos a um sistema eletrônico, como também à atenuação da potência quando se varia a distância entre o sistema transmissor e receptor. A partir de um sistema Magnetron-Antena Corneta é parametrizada a relação potência-distância entre fonte e alvo eletrônico objetivando-se danos no alvo.

II. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

O estabelecimento de condições adequadas para um ambiente de teste eletromagnético em campo aberto, já está bem estabelecido na literatura [3]. O posicionamento do sistema transmissor e do sistema receptor, bem como os equipamentos de suporte físico deve seguir as restrições padrão de distância entre antenas (d), alinhamento e altura dos suportes da antena de transmissão (h_t) e de recepção (h_r), comuns em medidas de antenas em campo aberto onde os seguintes critérios devem ser obedecidos:

- Efeito do acoplamento entre antenas: o efeito é considerado negligenciável se $d \geq 10\lambda$;
- Curvatura de fase: estabelece que $d \geq \frac{2D^2}{\lambda}$;
- Amplitude axial: $d \geq 10L$
- Altura dos suportes das antenas $h_t \geq 4D$ ($h_t = h_r$)

onde D é a maior abertura da antena e L e a maior dimensão da antena.

Para o cálculo da transmissão de potência no espaço livre utilizou-se a fórmula inversa de Friis [4], também conhecida como perda por propagação e representada por:

$$A = \frac{P_T}{P_r} = \frac{16\pi^2 d^2}{G_{oT} G_{oR} \lambda^2} \quad (1)$$

onde d é a distância entre as antenas, G_{oT} é o ganho da antena transmissora, G_{oR} é o ganho da antena receptora e λ é o comprimento de onda no espaço livre.

Os resultados teóricos da potência recebida considerando as variações de distância de 5m a 45m são mostrados na fig. 1.

O sistema transmissor operando com uma válvula Magnetron permite que as ondas eletromagnéticas sejam geradas e conduzidas para o meio externo através de um guia de onda [5]. A Magnetron como toda válvula termoiônica, no início do seu funcionamento necessita do aquecimento do catodo, o que é feito, aplicando-se uma tensão em seu filamento de aproximadamente 4VAC. O catodo aquecido libera os elétrons que são atraídos pela placa através de uma alta tensão de aproximadamente -4KVDC. Ao redor do magnetron estão dispostos dois ímãs com o objetivos de fazer com que os elétrons girem em alta velocidade em volta das pequenas cavidades da placa. Estas cavidades por sua

vez, funcionam como bobinas e capacitores em paralelo, o que forma um circuito ressonante sintonizado em uma frequência constante mas dependente das dimensões da cavidade. Assim, com o movimento dos elétrons as ondas são induzidas nestas cavidades, ressoam e se somam até sair pela antena com alta intensidade.

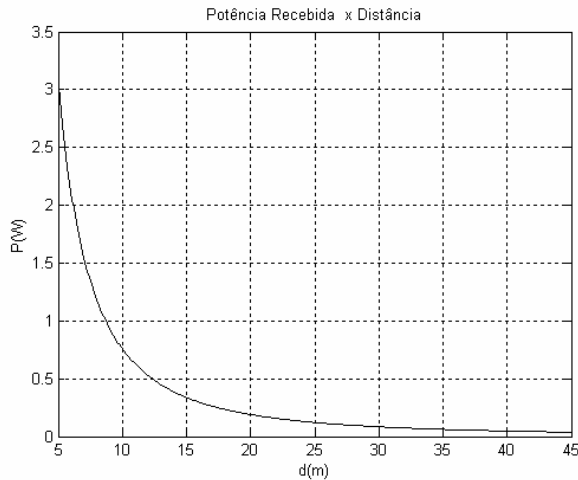


Fig. 1. Atenuação teórica no sistema.

O guia de onda comporta-se como um filtro passa-alta, conduzindo apenas ondas acima da frequência de corte (f_c). A frequência de corte é dada por (2):

$$f_c = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (2)$$

onde: c é a velocidade da luz, a representa a largura do guia de onda e b a altura do guia de onda. Os números inteiros m e n determinam o modo de propagação da onda eletromagnética nos modos TE e modo TM.

Na literatura observam-se diferentes tipos de antenas sendo utilizadas transmitindo pulsos, tais como bicônicas TEM alimentando parábolas refletoras [6] ou cornetas TEM coplanares [7] resultando na transmissão de pulsos de alta potência. A utilização de antenas cornetas piramidais abre a possibilidade de estudos de transmissão de pulsos eletromagnéticos aliados à facilidade de projeto na faixa de frequência da Magnetron e de requisitos tecnológicos já dominados, simplicidade de construção, fácil excitação, alto ganho, [8].

Os campos irradiados pela corneta piramidal são mostrados em (3) e (4) e são válidas para todos os ângulos de observação. A antena corneta é mostrada na fig.2.

$$E_\theta = -j \frac{kE_0 e^{-jkr}}{4\pi r} [\text{sen } \phi (1 + \cos \theta) I_1 I_2] \quad (3)$$

$$E_\phi = j \frac{kE_0 e^{-jkr}}{4\pi r} [\cos \phi (\cos \theta + 1) I_1 I_2] \quad (4)$$

Onde

$$I_1 = \int_{-a_1/2}^{+a_1/2} \cos\left(\frac{\pi}{a} x'\right) e^{-jk[x'^2/(2\rho_1) - x' \text{sen } \theta \cos \phi]} dx' \quad (5)$$

$$I_2 = \int_{-b_1/2}^{+b_1/2} e^{-jk[y'^2/(2\rho_1) - y' \text{sen } \theta \text{sen } \phi]} dy' \quad (6)$$

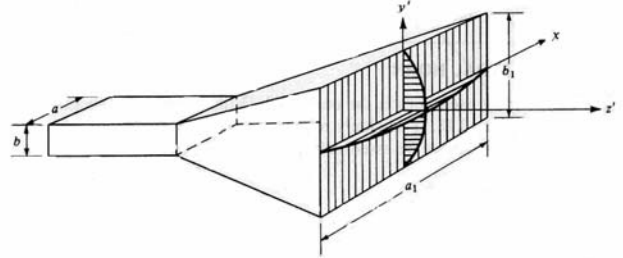


Fig. 2. Antena corneta

III. CÁLCULOS PRELIMINARES

Baseado na teoria apresentada em II implementou-se o sistema Magnetron-antena corneta utilizando-se uma válvula magnetron Panasonic e antenas cornetas piramidais tanto na transmissão como na recepção.

A partir das dimensões do guia de ondas instalado na entrada do sistema válvula-antena para a propagação do modo fundamental TE_{10} foi calculado o valor da frequência de corte f_c igual a 1,37GHz. A frequência nominal da válvula utilizada nos ensaios foi de 2,45GHz, portanto adequada para a transmissão de uma onda eletromagnética no guia de ondas.

O comprimento de onda calculado nesta frequência foi:

$$\lambda = \frac{c}{f} = 0,12m \quad (7)$$

Os critérios considerados para o cálculo do efeito de acoplamento, da curvatura de fase, da amplitude axial e da altura dos suportes foram calculados e os resultados, mostrados a seguir indicam que estes foram obedecidos quando comparados ao caso mais crítico, isto é, a menor distância entre as antenas sob ensaio que foi estabelecida em 5m.

- $d \geq 10\lambda$, resultando em $d \geq 1,22m$;
- $d \geq \frac{2D^2}{\lambda}$, resultando em $d \geq 0,22m$;
- $d \geq 10L$, resultando em $d \geq 3,70m$;
- $h_r \geq 4D$, resultando em $h_r \geq 1,48m$.

Todos os resultados mostram que os critérios já seriam obedecidos para distâncias de no mínimo 3,70m. Considerou-se h_r igual a h_t igual a 4m. As antenas usadas na transmissão como na recepção eram idênticas.

IV. RESULTADOS OBTIDOS

As medidas de potência foram realizadas utilizando o sistema Magnetron-Antena Corneta C3-ASD como fonte de

transmissão de potência pulsada e uma antena corneta com adaptador guia - coaxial como parte do sistema de recepção. A frequência de interesse no ensaio foi de 2,45GHz, fornecidos pela válvula Magnetron com potência de 800W. As medidas de potência foram realizadas variando a distância entre a antena receptora e a antena transmissora. Medições foram realizadas a cada 5m entre 5m a 35m de distância entre antena transmissora e receptora. Uma medida adicional foi realizada na distância entre antenas de 45m. A válvula Magnetron ficou ligada por um período de 3 minutos para que se pudessem fazer várias medições de cada distância escolhida a fim de verificar a equidade entre as medidas.

O receptor utilizado foi um analisador de espectros, marca Agilent, modelo E4405B acoplado a um atenuador coaxial de entrada externa marca Agilent de 20dB, modelo 8491A. O receptor foi acoplado na antena receptora via cabo coaxial 50Ω com 50m de comprimento com atenuação medida de 30,31dBm.

Para melhor caracterizar o ensaio, o desempenho das antenas transmissora e receptora fabricadas pela empresa Beta-Telecom foi verificado. O resultado do módulo do coeficiente de reflexão de entrada da antena C2-ASD é mostrado na fig. 3, onde se observa que em toda a faixa de frequência de projeto, entre 1,7GHz e 2,6GHz, os resultados são muito satisfatórios, menores que -20dB (VSWR~1,22). Na fig. 4 é mostrado o diagrama de irradiação ($\phi=0^\circ$, $-180^\circ \leq \theta \leq +180^\circ$) da antena C2-ASD e comparado com o da antena corneta Scientific Atlanta modelo 12-1.7 (IAE) na frequência de 2,45GHz. Resultados muito semelhantes são encontrados e assinalam ganho de aproximadamente 15dBi.

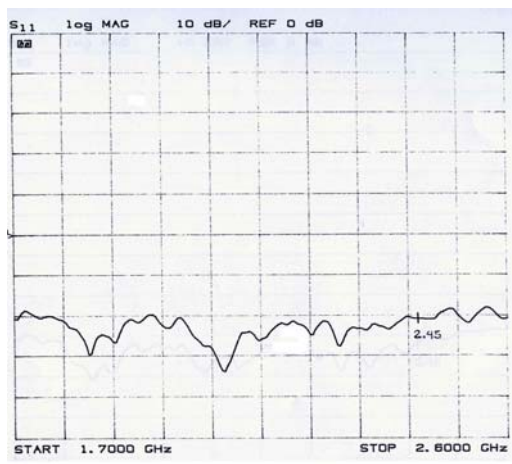


Fig. 3. Módulo do coeficiente de reflexão de entrada C2-ASD.

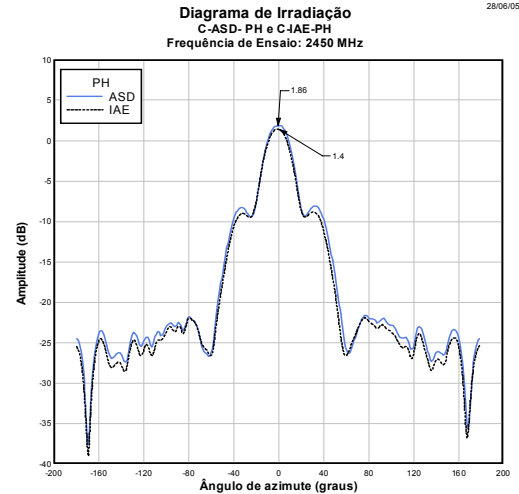


Fig. 4. Diagrama de irradiação da antena C2-ASD e antena corneta Scientific Atlanta (IAE)

A antena C2-ASD e adaptador guia - coaxial AD1-ASD utilizados na receptora são mostrados na fig. 5. Na fig. 6 observa-se o sistema Magnetron-Antena Corneta. Na fig. 7 o campo de ensaio em vista parcial pode ser observado na distância de 5m de separação entre antenas.



Fig. 5. Antena C2-ASD e adaptador guia - coaxial AD1-ASD.

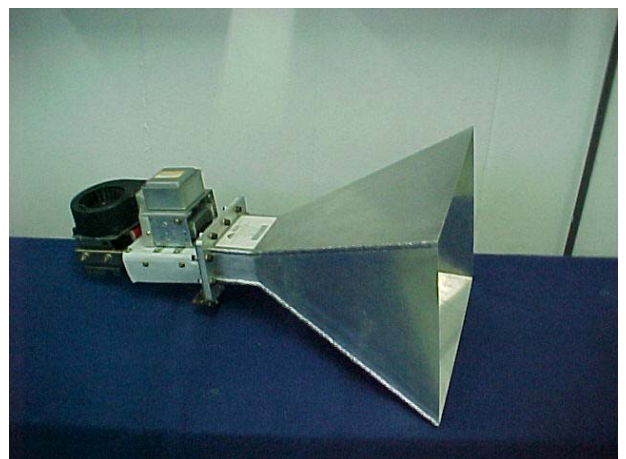


Fig.6. Sistema magnetron-antena corneta C3-ASD.



Fig. 7. Vista parcial do campo de ensaio.

Na tabela I são mostrados os dados coletados no receptor. Considerou-se a atenuação medida no cabo de ligação entre antena e receptor de $-30,31$ dBm e a atenuação de 20 dB do atenuador de entrada externo ao receptor. A partir dos dados da tabela I foram realizados os gráficos das figs. 8 e 9. Na fig. 8 verifica-se que na distância de 5 m entre transmissora e receptora a curva teórica e prática apresentam uma diferença de $15,97$ W. Nota-se também um descaimento de potência bastante acentuado entre 5 m e 10 m.

TABELA I - POTÊNCIA RECEBIDA X DISTÂNCIA

Distância (m)	Potência Recebida (W)
05	18,96
10	5,36
15	2,40
20	1,40
25	0,82
30	0,52
35	0,41
45	0,28

Na fig. 9, vê-se que com 25 m de distância entre transmissora e receptora a diferença de potência é de $0,68$ W. Quando a distância aumenta para 35 m, a variação de potência entre as curvas teórica e prática é de $0,34$ W; em 40 m é de $0,31$ W e em 45 m é de $0,24$ W. Este fato nos leva a concluir que à medida que a distância entre o sistema de transmissão e a antena receptora aumenta a diferença entre o sinal medido e os teóricos se aproximam, coincidindo com a formulação de Friis para atenuação no espaço livre, cálculo teórico desenvolvido para análise de propagação de sinais às longas distâncias. O sistema Magnetron-Antena Corneta apresentou um desempenho satisfatório, pois o descaimento da potência com a distância foi coerente.

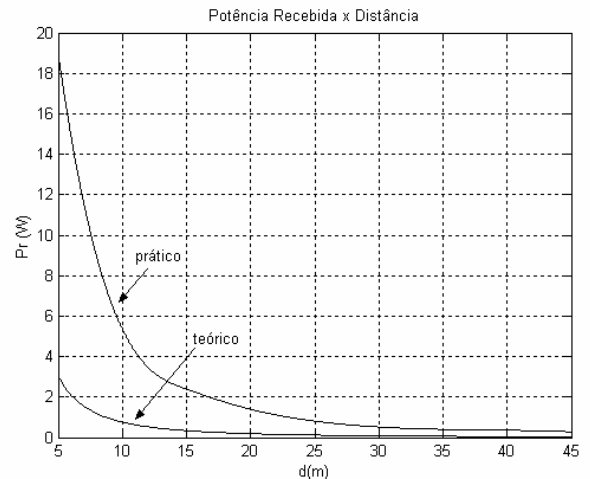


Fig. 8. Comparação da atenuação da curva pratica e teórica.

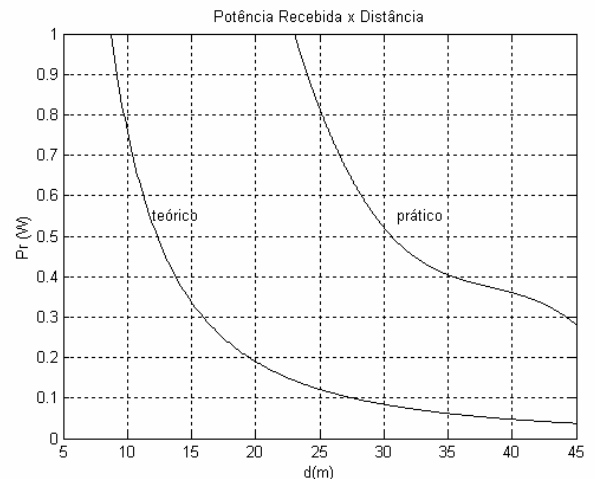


Fig. 9. Comparação da atenuação da curva pratica e teórica.

Entre os objetivos dos ensaios está a definição do nível de potência necessário para causar danos a uma calculadora eletrônica, dispositivo este sensível à irradiação eletromagnética devido à miniaturização dos componentes e circuitos.

Verificou-se que a calculadora apresenta danos a uma distância de 1 m do sistema Magnetron-Antena Corneta. Estes danos foram verificados com apenas 1 min de exposição à irradiação. Fazendo uma interpolação da fig. 10, nota-se que a potência necessária para danificar a calculadora na distância de 1 m é de 45 W, este fato é mostrado no gráfico da potência em função da distância na fig. 11. A partir deste gráfico, conclui-se que para uma distancia de 15 m é necessária uma potência emitida de 100 KW para danificar a calculadora.

V. CONCLUSÕES FINAIS

O sistema Magnetron-Antena Corneta apresentou um desempenho satisfatório, pois o decaimento da potência com a distância foi coerente.

Notou-se que para as distâncias menores entre sistemas de transmissão e de recepção foi apresentada uma diferença maior no valor da atenuação entre a curva teórica e a prática do que para distâncias maiores. Este fato nos leva a concluir que à medida que a distância entre o sistema de transmissão e a antena receptora aumenta a diferença entre os sinais medidos e os teóricos se aproximam confirmando a formulação teórica.

O experimento com a calculadora permite estabelecer que a potência necessária para danificar uma calculadora do tipo da ensaiada numa distância de 1m é de 45 W. A partir deste dado pode-se estimar qual é a potência emitida necessária para causar danos a dispositivos eletrônicos semelhantes a uma distância pré-determinada.

Trabalhos futuros serão realizados no intuito de aumentar a potência do sistema e verificar a eficácia na destruição de sistemas elétricos e eletrônicos mais protegidos contra EMI.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Antinone, and W. C. Ng, "HPM (High Power Microwave) Testing of Electronic Components", *Lawrence Livermore National Laboratory*, Livermore, California, May 1989.
- [2] RDT&E exhibit R-2 (Documentos orçamentários já liberados para consulta), www.dior.whs.mil/peidhome/procstat/p02/fy1998/p02.htm, 1998.
- [3] J. S Hollis, T. J. Lyon, and L. Clayton, *Microwave Antenna Measurements*, Scientific Atlanta, USA, 1970.
- [4] A. B. Diniz, *Antenas*, ITA, 1974.
- [5] A. B. Diniz, e G.F.O. Freire, *Ondas Eletromagnéticas*, Rio de Janeiro, LTC SA, 1973.
- [6] L. H. Bower, E. G. Farr, C. E. Baum, and W. D. Prather, "Experimental Results of Optimizing the Location of Feed Arms in a Collapsible Ira and a Solid IRA" *Sensor and Simulation Note 450*, Farr Research Inc. November 2000.
- [7] L. H Bower, E. G. Farr, "Recent Enhancement to the Multifunction IRA and TEM Sensors". *Sensor and Simulation Note 434*, Farr Research Inc. February 1999.
- [8] C. A Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*. Harper & Row, Publishers, New York, 1982.

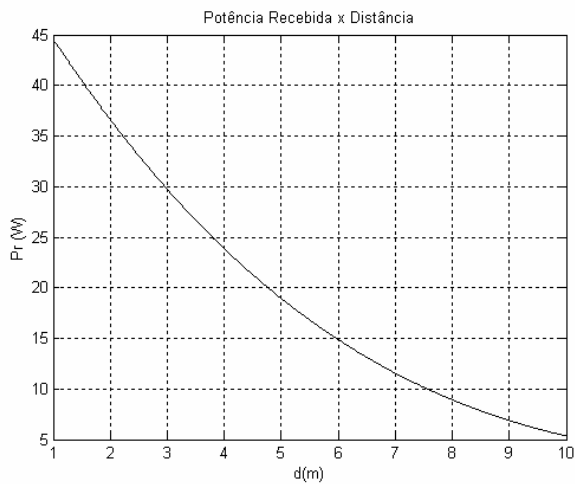


Fig. 10. Atenuação do sistema Magnetron-Antena Corneta.

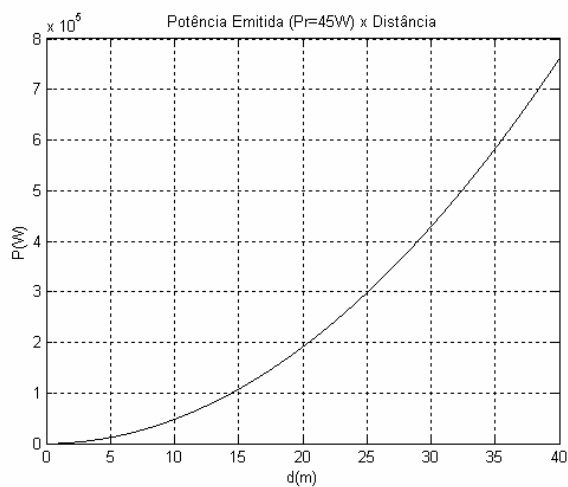


Fig. 11. Gráfico da Potência x distância para $P_r=45W$.

Na fig. 12 vê-se o aspecto da calculadora Livstar (direita) após o ensaio. Comparam-se os aspectos gerais de outra (esquerda) que não foi submetida à irradiação eletromagnética.



Fig. 12. Calculadora marca Livstar após ensaio de radiação.