

Uso de Linhas Giromagnéticas em Guerra Eletrônica

Fernanda Sayuri Yamasaki, José Osvaldo Rossi, Joaquim José Barroso, Joaquim Paulino Leite Neto
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Grupo de Materiais e Plasma, São José dos Campos – SP

Resumo — As linhas de transmissão não lineares giromagnéticas (LTNLGs) representam uma solução avançada e compacta para a geração de sinais de alta potência de radiofrequência em sistemas de defesa. Essa tecnologia oferece uma alternativa eficiente e de custo reduzido em relação às fontes tradicionais de alta frequência e alta potência baseadas em vácuo, que, além de volumosas, exigem infraestrutura complexa e elevados custos operacionais. Em comparação aos sistemas de alta potência convencionais, as LTNLGs são significativamente menores e mais leves, permitindo sua integração em plataformas móveis, como veículos blindados e aeronaves de combate. Isso possibilita a implementação de sistemas de defesa altamente eficazes, com considerações aprimoradas de tamanho, peso, potência e custo. As propriedades não lineares dessas linhas de transmissão possibilitam a modulação dinâmica de sinais, otimizados para gerar interferências específicas, que podem ser adaptadas para desestabilizar ou neutralizar uma ampla gama de alvos eletromagnéticos, oferecendo maior flexibilidade e precisão em cenários de guerra eletrônica.

I. INTRODUÇÃO

As Linhas de Transmissão Não Lineares Giromagnéticas (LTNLGs) têm sido amplamente aplicadas na Guerra Eletrônica, especialmente como parte de um dispositivo de jamming na neutralização de drones [1]. Essas linhas podem ser classificadas em dois tipos: planar e coaxial. Em ambos os casos, a estrutura consiste em um condutor interno envolto por anéis de ferritas, com o conjunto isolado do condutor externo de cobre por um material isolante, como o Kapton. A Fig. 1 apresenta um exemplo de linha giromagnética planar comercial, fabricada pela empresa americana Metamagnetics [1],[2]. Já a Fig.2 ilustra uma linha giromagnética coaxial, desenvolvida e utilizada nas pesquisas deste trabalho.



Fig. 1. LTNLG comercial produzida pela empresa Metamagnetics com placas paralelas.

Fig. 2. Corte longitudinal de uma linha giromagnética coaxial.

II. APARATO EXPERIMENTAL

A operação da Linha Giromagnética requer uma polarização inicial por meio de um campo magnético externo axial, o qual interage com o campo azimutal induzido pelo pulso de corrente no condutor interno da linha. Tal pulso é produzido por um gerador de alta tensão. A interação entre os campos axial e azimutal cria um campo magnético efetivo ao redor do qual os domínios magnéticos da ferrita sofrem um movimento de precessão. Esse movimento induz oscilações de alta frequência, modulando a amplitude do pulso de saída durante sua duração. Para aplicações em dispositivos de guerra eletrônica, essas oscilações podem ser irradiadas utilizando uma antena na saída da linha. A componente DC do sinal de saída é eliminada por meio de um filtro passa-alta. Quanto ao campo axial, existem dois modos de polarização: um utilizando um solenoide alimentado por uma fonte de corrente DC, que gera campos magnéticos na faixa de 20 a 40 kA/m [3], e outro, mais compacto, que emprega magnetos permanentes [4], como anéis de neodímio de alta remanência (12 kG). O experimento foi delineado em torno dos valores disponíveis do gerador de pulso que opera na faixa de 6 a 12 kV, e dos anéis de ferrita de diâmetro médio de 1,51 mm. A Fig.3 ilustra o modo de operação com solenoide, enquanto a Fig.4 apresenta o uso de magnetos permanentes para a polarização do campo axial.

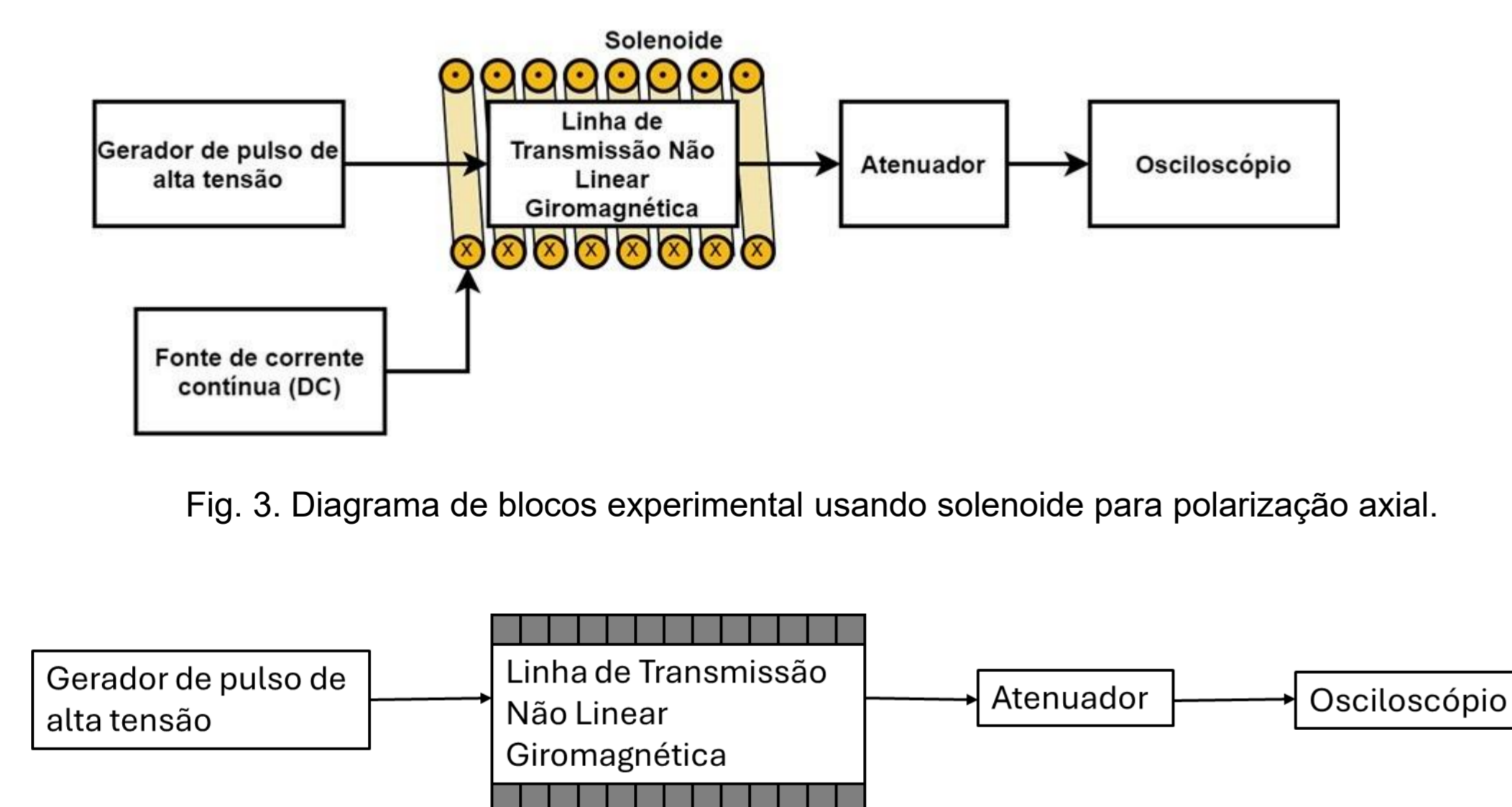


Fig. 3. Diagrama de blocos experimental usando solenoide para polarização axial.

Fig. 4. Diagrama de blocos experimental usando magnetos permanentes para polarização axial.

A Fig.5 apresenta a fotografia do aparato experimental, utilizando um solenoide para a polarização axial, enquanto na Fig.6 é mostrado um conjunto de magnetos permanentes para a mesma finalidade.

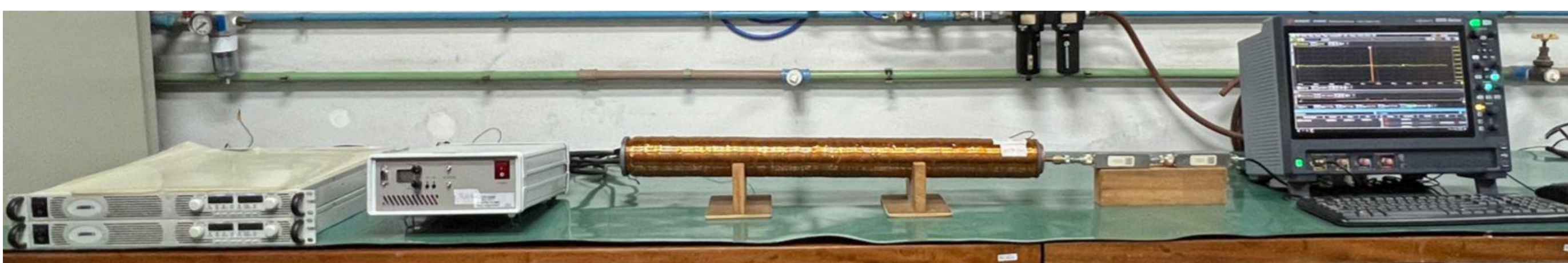


Fig. 5. Fotografia do aparato experimental utilizando solenoide.

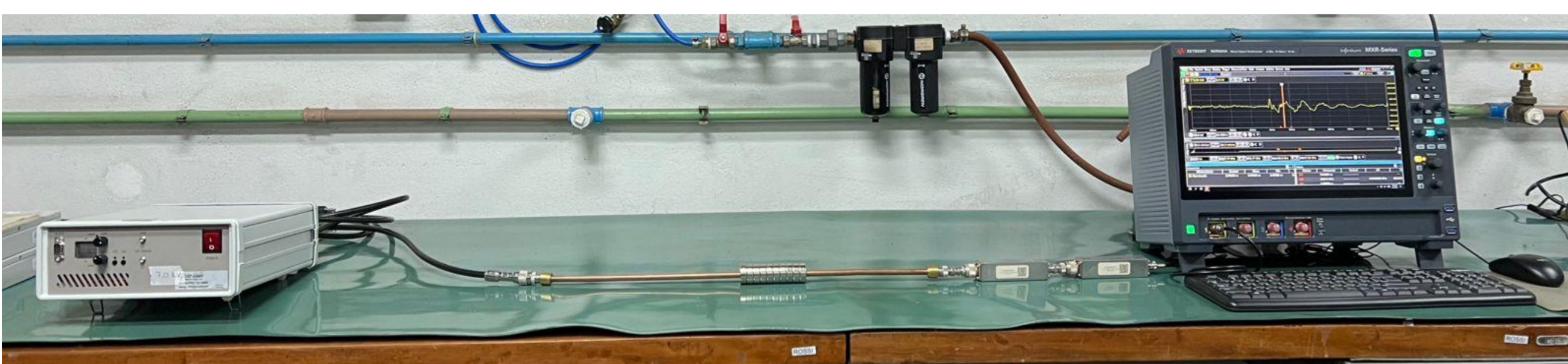


Fig. 6. Fotografia do aparato experimental utilizando magnetos permanentes.

A linha coaxial construída possui um comprimento de 60 cm, utilizando um tubo de cobre de 10 mm de diâmetro como blindagem. O pulso de saída da linha é monitorado na tela do osciloscópio, com o auxílio de atenuadores de 80 dB conectados a uma das entradas do equipamento.

III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste estudo, foram utilizados anéis de ferrita da empresa Amidon, modelo FB43-201 (material NiZn), com dimensões de 1,09 mm (diâmetro interno), 1,93 mm (diâmetro externo) e 3,8 mm (comprimento). Os anéis foram distribuídos sequencialmente ao longo da linha de transmissão de 60 cm. O resultado experimental apresentado na Fig.7 foi obtido com um pulso gaussiano de 10 kV aplicado na entrada, sob a ação de um campo magnético axial gerado por um solenoide com corrente de 8,18 A (equivalente a 20 kA/m). A Fig.7a exibe o pulso de saída no domínio do tempo, evidenciando boa modulação, enquanto a Fig.7b apresenta o espectro de frequência correspondente (FT – Fourier Transform), com picos em 1,9 e 3,0 GHz.

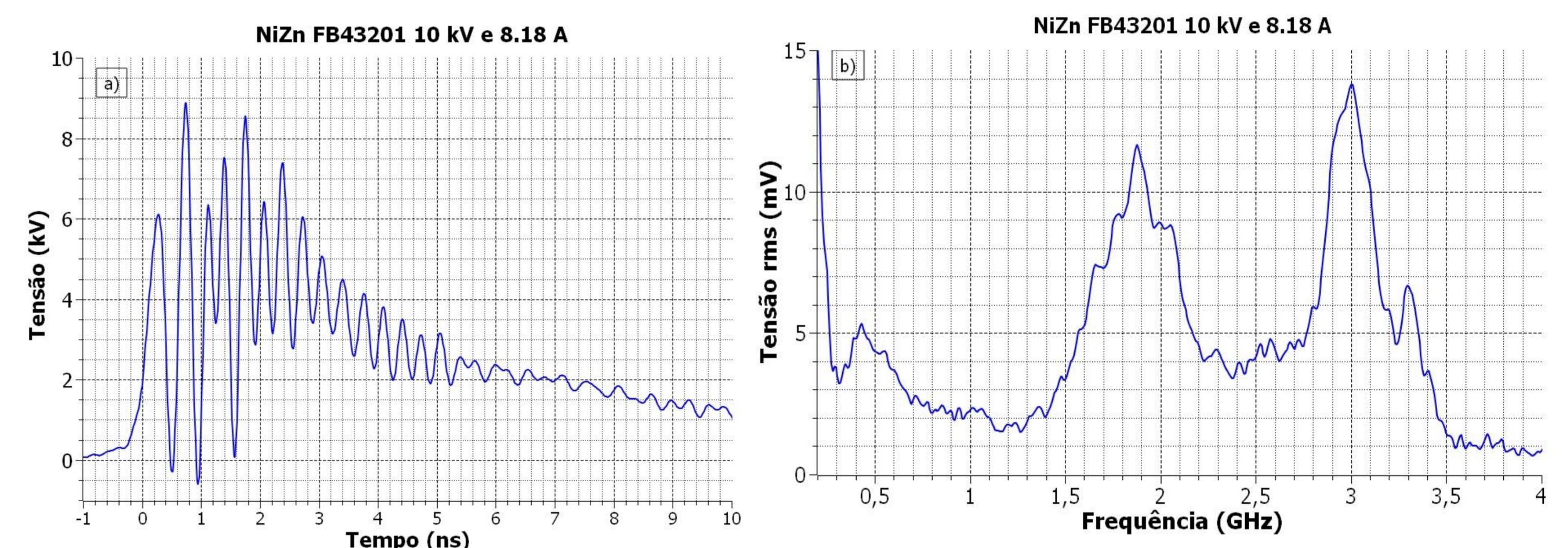


Fig. 7. Polarização axial via solenoide a) Pulso de saída no domínio do tempo, b) FT do pulso de saída.

Os resultados apresentados na Fig.8 referem-se ao caso em que o campo axial foi gerado por um conjunto de 10 anéis de neodímio (ímãs permanentes) com dimensões de 30 × 20 × 10 mm, e um pulso gaussiano de 8 kV aplicado na entrada. A Fig.8a exibe o pulso de saída no domínio do tempo, evidenciando modulação inferior em relação ao caso anterior. Por outro lado, a Fig.8b apresenta o espectro de frequência (FT) correspondente, com picos em 1,9, 3,0 e 3,5 GHz — indicando a presença de um pico adicional em frequência mais elevada.

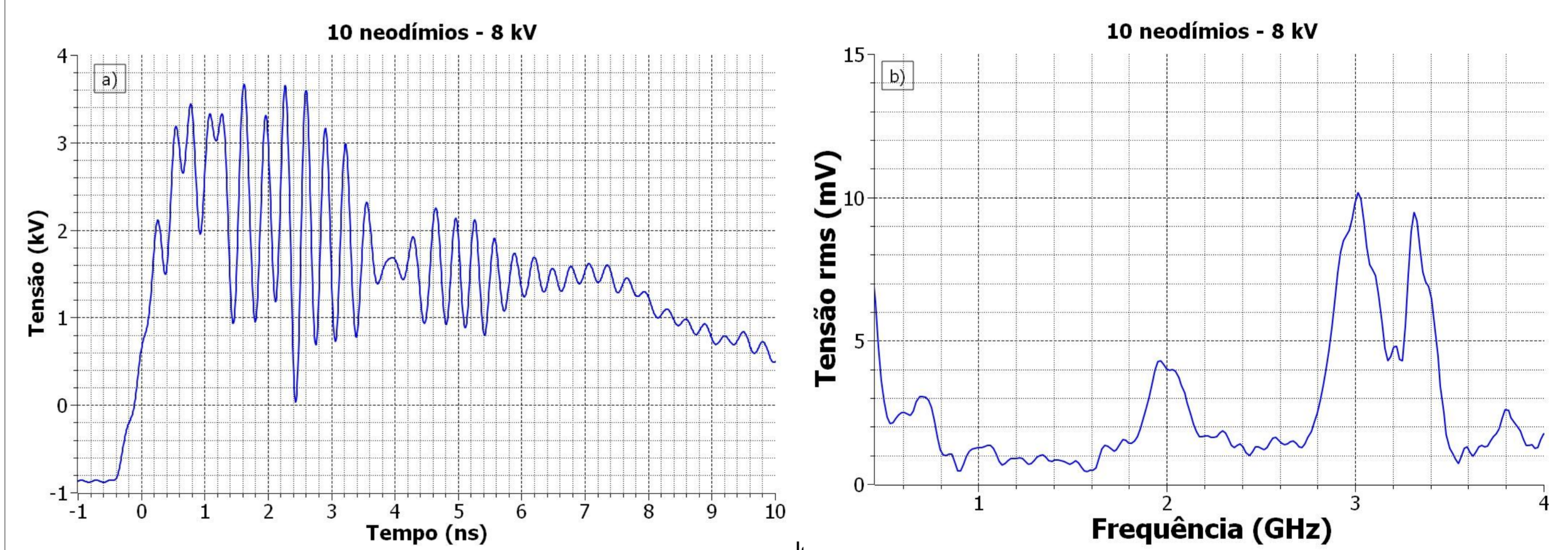


Fig. 8. Polarização axial via ímãs permanentes a) Pulso de saída no domínio do tempo, b) FT do pulso de saída.

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um dispositivo capaz de gerar Pulsos Eletromagnéticos (EMP) com foco em *jamming* na guerra eletrônica, baseado na emissão de pulsos ultracurtos (ns) com espectro de frequência largo e componentes na banda S (2-4 GHz). Foram avaliadas duas configurações distintas para geração dos pulsos. A primeira, com campo magnético axial controlado por solenoide, resultou em melhor modulação no domínio do tempo, embora com menor conteúdo em altas frequências. A segunda, utilizando ímãs permanentes, apresentou um pico de frequência mais elevado (3,5 GHz), mas com modulação inferior. Assim, a configuração com solenoide oferece maior controle e qualidade de modulação, enquanto a solução com ímãs destaca-se pela sua compactidade e maior frequência de operação, sendo mais adequada para aplicações aeroespaciais. Em termos de potência, o pico pode chegar a centenas de kW, porém, a potência média é bem baixa, da ordem de alguns Watts, considerando uma taxa de repetição de alguns kHz e uma duração de pulso de RF na faixa de ns.

REFERÊNCIAS

1. Datasheet Metamagnetics, Available in: <https://www.mtmgx.com/high-power-radio-mm-04b-0722.pdf>.
2. D. V. Reale, J. M. Parson, A. A. Neuber, J. C. Dickens, J. J. Mankowski; Investigation of a stripline transmission line structure for gyromagnetic nonlinear transmission line high power microwave sources. Rev. Sci. Instrum. 1 March 2016; 87 (3): 034706.
3. J. O. Rossi, F. S. Yamasaki, J. J. Barroso, A. F. Greco, E. G. L. Rangel, A. F. Teixeira, L. P. S. Neto, E. Schamiloglu; RF generation using a compact bench gyromagnetic line. Rev. Sci. Instrum. 1 February 2022; 93 (2): 024704.
4. J. O. Rossi et al., "A Compact GNLTTL Using Permanent Magnet Rings With Improved H-field Uniformity," 2022 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), Knoxville, TN, USA, 2022, pp. 5-7