



Modelagem e Simulação Eletromagnética de Linhas de Transmissão Não Lineares Giromagnéticas (Coaxial e de Fita) para Geração de RF Utilizando o CST Studio.

André Ferreira Teixeira ¹, Ana Flávia Guedes Greco ², José Osvaldo Rossi ³, Joaquim José Barroso ⁴, Fernanda Sayuri Yamasaki ³, Elizete Gonçalves Lopes Rangel ³

¹Aluno de Mestrado do curso de Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais - CSE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

²Aluna de Doutorado do curso de Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais - CSE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

³Laboratório Associado de Plasma / Coordenação de Laboratórios Associados Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

⁴Departamento de Engenharia Eletrônica e Computação Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil

andre.teixeira@inpe.br

Resumo. Linhas de Transmissão Não Lineares Giromagnéticas (LTNLG) representam atualmente uma nova forma de gerar radiofrequência (RF), em que se utiliza o fenômeno da precessão dos momentos magnéticos da ferrita, por meio da interação entre o campo magnético axial externo e o azimutal. Por ser um dispositivo complexo, é necessário a utilização de artifícios computacionais para a modelagem e simulação desta tecnologia ainda em fase de projeto, como por exemplo, simulações numéricas e simulações eletromagnéticas. Este trabalho apresenta a modelagem e simulação de dois tipos de LTNLG, coaxial e de fita, a fim de evidenciar oscilações no sinal de saída das linhas. Para isso, é utilizado o programa de simulação eletromagnética CST Studio, inserindo os materiais necessários e ajustando os parâmetros de cada linha. Oscilações RF foram observadas em ambos os sinais de saída das linhas, sendo interpretados nos domínios do tempo e da frequência e análise dos modos de propagação.

Palavras-chave: Linha de Transmissão Não Linear Giromagnética (LTNLG); Geração de Radiofrequência (RF); Simulações Eletromagnéticas.

1. Introdução

Por se tratar de uma nova alternativa para gerar RF, as LTNLs giromagnéticas despertam grande interesse por parte da comunidade científica, devido a possibilidade de sua aplicação em sistemas de transmissão de RF que exigem alta potência e operação em frequências elevadas (banda S e C) [Yamasaki, et al. 2016]. Esta tecnologia por si só já apresenta uma configuração mais compacta quando comparada à dos geradores de RF convencionais como dispositivos TWT (Travelling Waves Tube) [Rossi, et al. 2017a], pois não necessitam de circuitos amplificadores, oscilador local e tubo eletrônico a vácuo. Entretanto, ainda é um dispositivo relativamente grande e pesado para aplicações espaciais, tendo em vista que o



peso de um artefato espacial está diretamente relacionado ao seu custo de lançamento. Com isto, a aplicação das LTNLs giromagnéticas em satélites exige neste momento, mais um esforço de compactação deste dispositivo, como por exemplo, eliminar uma fonte de corrente contínua com a substituição do solenoide por ímãs permanentes, diminuindo seu custo e volume total, o que possibilita a aplicação em sistemas pulsados de satélites radares (SAR) e em subsistemas de telecomunicações de satélites em geral. As vantagens de estudar estes dispositivos utilizando simulações eletromagnéticas é refletida na otimização de seus desempenhos, pois permitem o uso de prototipagem virtual [CST STUDIO®], o que possibilita identificar e mitigar problemas de conformação ainda no início do projeto.

Como uma tecnologia promissora para gerar RF, as linha giromagnéticas possuem seu meio magnético de propagação formado por núcleos magnéticos de ferrita imersos em um campo magnético axial externo constante. A Figura 1 ilustra o processo de geração de RF em uma LTNL giromagnética coaxial a partir da aplicação de um pulso de corrente, em que as oscilações de RF são geradas a partir da precessão dos momentos magnéticos da ferrita, quando excitados pelo campo azimuthal gerado pela corrente do pulso de entrada, o qual interage com o campo magnético axial externo, gerado pelo solenoide.

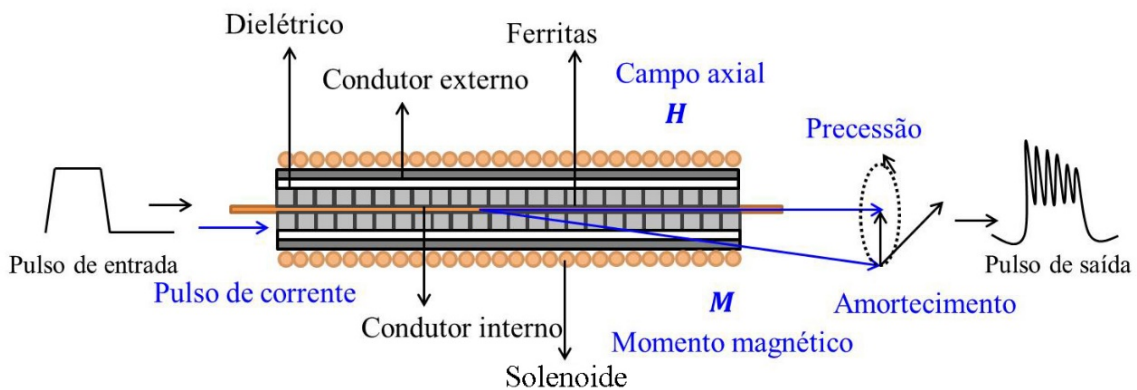


Figura 1. Linha exibindo o efeito de precessão magnética, gerando oscilações a partir de um pulso retangular de entrada. [Rossi, et al. 2017b]

O efeito de precessão giromagnética amortecida é descrito pela equação de Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) [Gilbert 2004]:

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = \gamma \mu_0 \vec{M} \times \vec{H} - \frac{\alpha}{M_s} \vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}. \quad (1)$$

Esta equação descreve a dinâmica de magnetização que ocorre na ferrita [Bragg, et al. 2013a], onde \vec{M} é o vetor de magnetização, \vec{H} é o vetor do campo magnético axial, M_s é a magnetização na saturação, γ é a relação giromagnética dos elétrons ($1,760 \times 10^{11} \text{ rad/s/T}$), α é a constante de amortecimento da precessão, que depende do material e possui valores típicos de 0,001–0,1 e μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo. A polarização externa (\vec{H}) tradicionalmente é provida por solenoide posicionado na região externa da LTNL [Bragg, et al. 2010], como pode ser visto no arranjo experimental de uma linha de aproximadamente 60 cm de comprimento na Figura 2.



Figura 2. Arranjo para teste de uma linha giromagnética coaxial usando solenoide como fonte do campo axial externo. [Yamasaki, et al. 2019]

Existem diferentes abordagens ao se investigar a geração de RF a partir de linhas giromagnéticas, onde umas delas é utilizando as chamadas simulações numéricas, que por meio de rotinas e códigos auxiliam a resolução das principais equações que regem o fenômeno de precessão giromagnética no interior da linha, assim como os processos não lineares dos materiais. Algumas contribuições neste sentido são encontradas em [Karelin, et al. 2019], [Ahn, et al. 2015] e [Karelin, et al. 2016]. Outra abordagem utilizada é através de simulações eletromagnéticas (utilizadas neste trabalho), por meio de programas próprios para análise de campos eletromagnéticos e dispositivos de RF, como em [Reale, et al. 2016]. Uma vez que o estudo de linhas giromagnéticas envolvem diferentes tipos de problemas e inúmeros fatores, como por exemplo o campo magnético axial externo [Bragg, et al. 2013b], se faz necessário a utilização de vários métodos de resolução, por englobarem diferentes espécies de problemas, como altas frequências e campos eletrostáticos, o que é mais facilmente resolvido com programas específicos de simulações eletromagnéticas que solucionam vários tipos de problemas com seus diferentes métodos de resolução.

Programas de simulações eletromagnéticas têm sido usados com grande sucesso no projeto e simulação de sistemas de RF que empregam dispositivos como guia de ondas, linhas de fita, linhas coaxiais, estruturas de fios, estruturas de filtros, antenas, metamateriais etc. Representando uma poderosa ferramenta para projetos em eletromagnetismo, o programa de simulação *CST Studio Suite* oferece ao usuário um ambiente de simulação completo e amigável em um cenário totalmente 3D, facilitando ciclos de desenvolvimento mais curtos e custos reduzidos. O programa possui vários pacotes para a análise de uma vasta gama de problemas complexos, desde altas e baixas frequências, até motores, transformadores e sensores. A ferramenta utiliza algoritmos precisos para a resolução das equações de Maxwell de diferentes maneiras, realizando simulações tanto no domínio do tempo, utilizando o método de resolução Técnica de Integração Finita (FIT) e Matriz de Linha de Transmissão (TLM) quanto no domínio da frequência, por meio da técnica de resolução do Método de Elementos Finitos (FEM) [CST STUDIO®]. De maneira geral, o CST simplifica a estrutura dos projetos através da geração de malhas (pontos de resolução das equações de Maxwell), de acordo com a frequência utilizada, proporcionando de maneira automática, uma modelagem completa da estrutura simulada.

Comparando os métodos de simulação, vale ressaltar que no caso das simulações numéricas (Matlab, Mathematica, Maple, Octave etc), a equação de Landau-Lifshitz [Gilbert 2004] e [Vaselaar 2011], que descreve o fenômeno de precessão magnética na linha



giromagnética, deve ser acoplada as equações de Maxwell, sendo escritas na forma de códigos numéricos para a modelagem do problema [Ahn, et al. 2015], o que pode aumentar sua complexidade e demandar mais tempo. Nas simulações eletromagnéticas (CST, HFSS, COMSOL etc) [Reale 2013], estas equações já são levadas em conta automaticamente na simulação do fenômeno, cabendo ao usuário entender, definir e ajustar corretamente os parâmetros do dispositivo, o que facilita bastante o projeto de uma LTNL.

Por meio das simulações eletromagnéticas, o objetivo deste trabalho é modelar e simular dois protótipos de LTNL giromagnética (coaxial e linha de fita) como um arranjo completo, a fim de verificar a geração de oscilações RF em seu sinal de saída. Sabe-se que a amplitude do pulso de entrada [Rossi, et al. 2017a], o campo magnético axial, os tipos de materiais utilizados e a geometria da linha [Bragg, et al. 2012] podem influenciar nas oscilações e consequentemente na geração de RF. Espera-se com este trabalho obter um *setup* de simulação, auxiliando trabalhos futuros com o programa *CST Studio*, onde podem ser realizadas análises modificando os vários parâmetros citados anteriormente, a fim de entender o comportamento da linha e o impacto de tais parâmetros na formação das oscilações no sinal de saída.

2. Metodologia

Utilizando-se a ferramenta computacional (*CST Studio Suite*), foram montados dois arranjos com dois tipos de LTNL giromagnéticas: (a) o primeiro tipo, uma linha coaxial de 60cm de comprimento e diâmetro de 0.5cm utilizando o Kapton como dielétrico, apresentada na Figura 3; e (b) uma linha de fita, de 30cm de comprimento, 3,94cm de largura e 2,84cm de altura, como mostra a Figura 4. Ambos os arranjos utilizaram a ferrita FB-43-201 (AMIDON, com $\varnothing_{int}=1,09$ mm, $\varnothing_{ext}=1,93$ mm e espessura= 3,80 mm) e o cobre como condutor central e condutor externo, além disso, foram injetados pulsos retangulares de 25 kV na entrada das linhas e um campo externo aplicado para polarização axial de 30 kA/m.

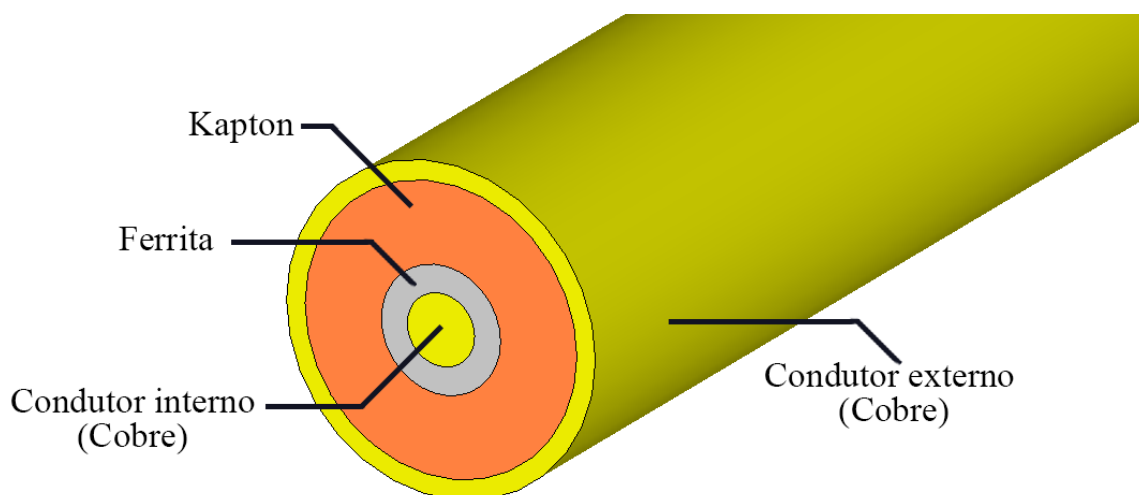


Figura 3. Linha coaxial modelada no programa CST, exibindo suas diferentes camadas.

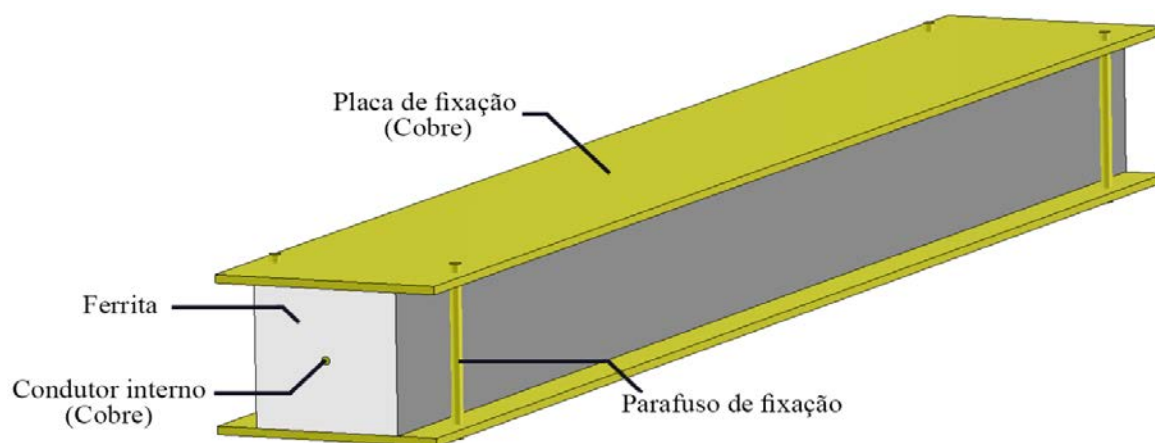


Figura 4. Linha de fita modelada no programa CST, exibindo parafusos e placas de fixação.

3. Resultados e Discussão

É possível observar oscilações no sinal de saída gerado em ambas as linhas, como mostram as Figuras 5 e 6.

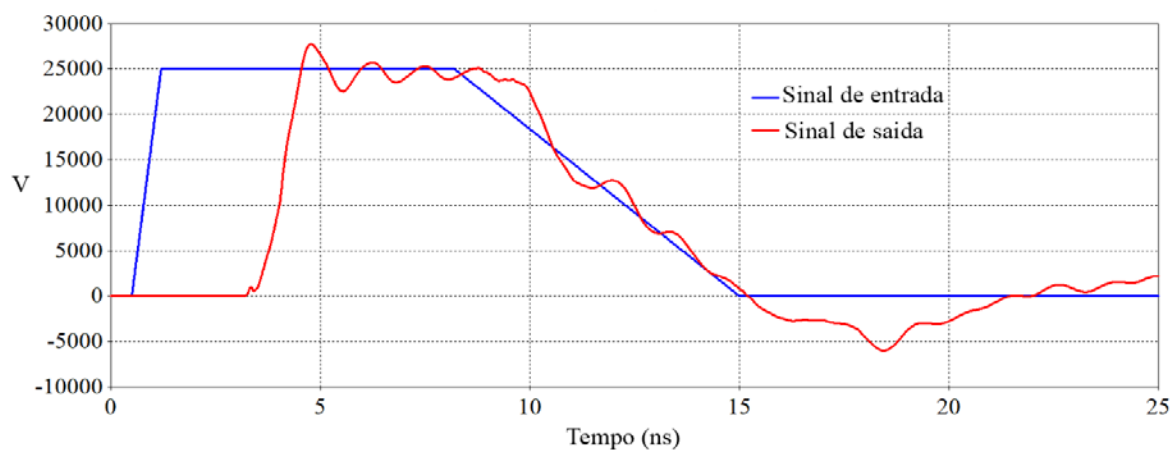


Figura 5. Oscilações no sinal de saída da linha da linha coaxial.

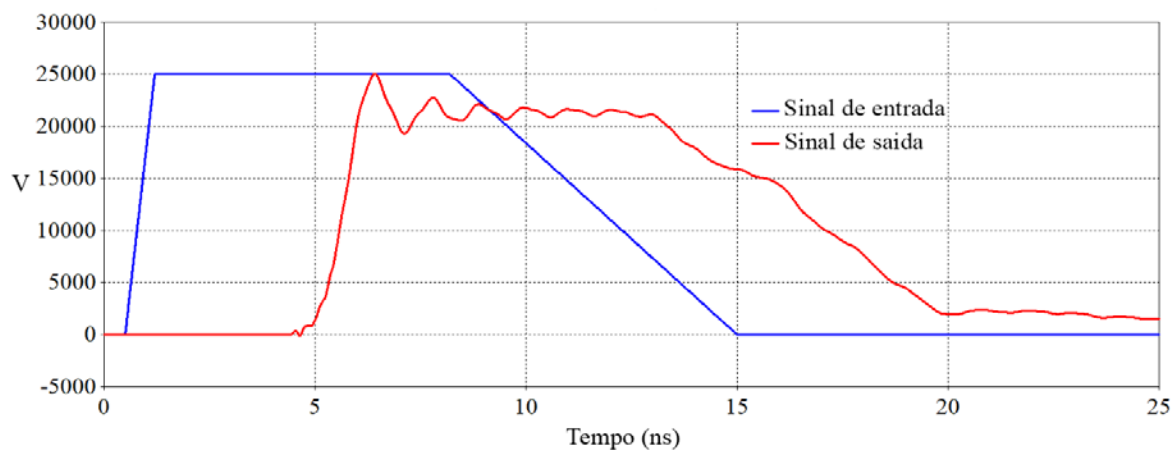


Figura 6. Oscilações no sinal de saída da linha de fita.



Os sinais obtidos no domínio do tempo (Figuras 5 e 6) são importantes para compreender como o sinal se comporta ao se propagar pela linha. Pode ser observado uma diferença na amplitude no sinal de saída entre as linhas, ou seja, a linha de fita obteve uma maior atenuação das oscilações. A geometria, o material, o campo magnético axial externo e a amplitude do sinal influenciam nas oscilações na saída da linha, o que pode ser observado nas duas configurações distintas de linhas simuladas neste trabalho.

As Figuras 7 e 8 apresentam os espectros de frequência dos sinais de saída, onde é possível ver os picos em algumas frequências (basicamente na faixa de 200 a 400MHz), consequência das oscilações geradas, que permitem concentrar parte da energia do sinal em determinadas frequências, a fim de obter um sistema de transmissão de RF. Os gráficos no domínio da frequência são importantes para caracterizar uma região do espectro de frequência onde a linha pode ser operacional, ou seja, uma região de frequência de transmissão.

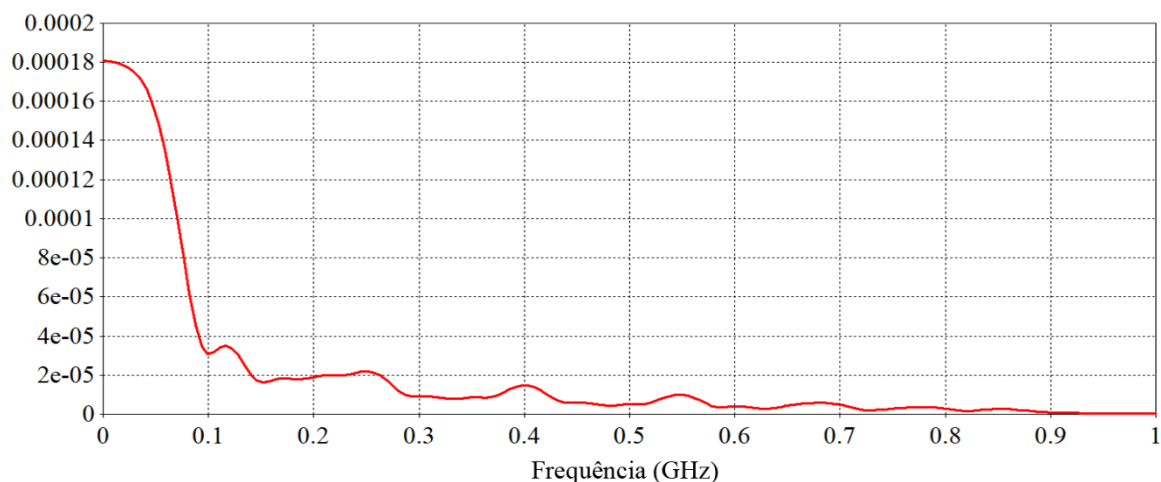


Figura 7. Espectro de frequências do sinal de saída da linha coaxial.

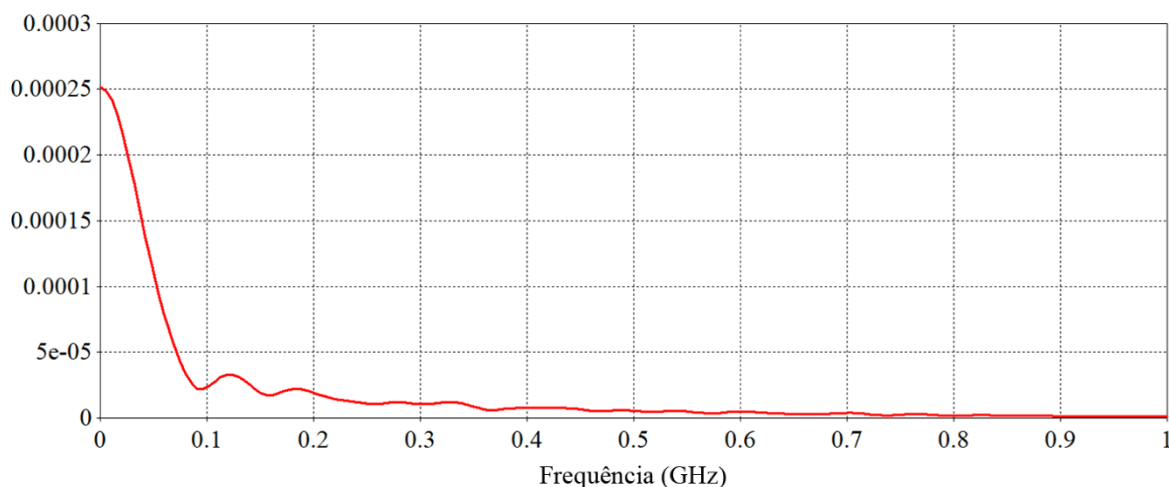


Figura 8. Espectro de frequências do sinal de saída da linha de fita



A seguir, nas Figuras 9 e 10 são apresentadas as linhas de campo dos modos de propagação em ambas as linhas. Sendo um aspecto importante em guias de ondas, os modos de propagação definem o tamanho físico do dispositivo, dada uma frequência de operação, e possibilitam o entendimento de como se comportam estes campos no interior da linha, facilitando a otimização do projeto da linha. Nota-se na Figura 10, que os vetores de campo para a linha de fita mostram-se consistentes com as simulações realizadas por [Reale, et al. 2016], evidenciando o modo de propagação TEM do campo elétrico e magnético no interior da linha de fita.

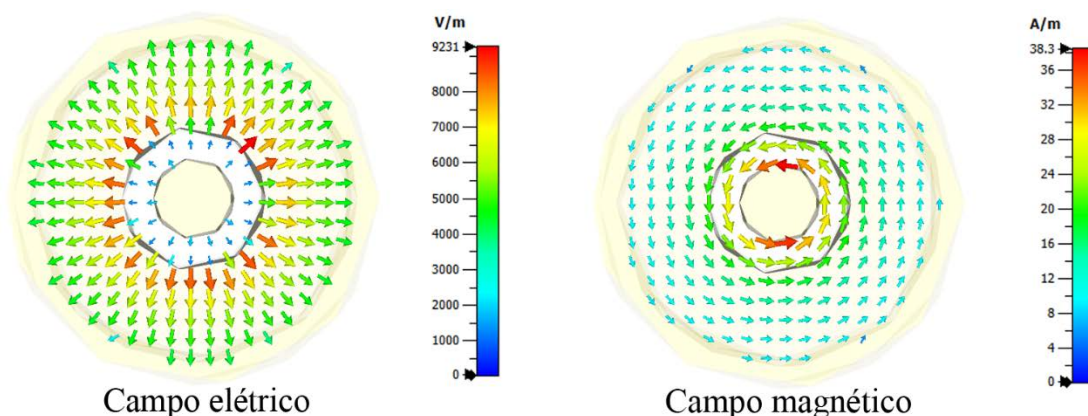


Figura 9. Modo de propagação TEM observado na secção transversal no interior da linha coaxial.

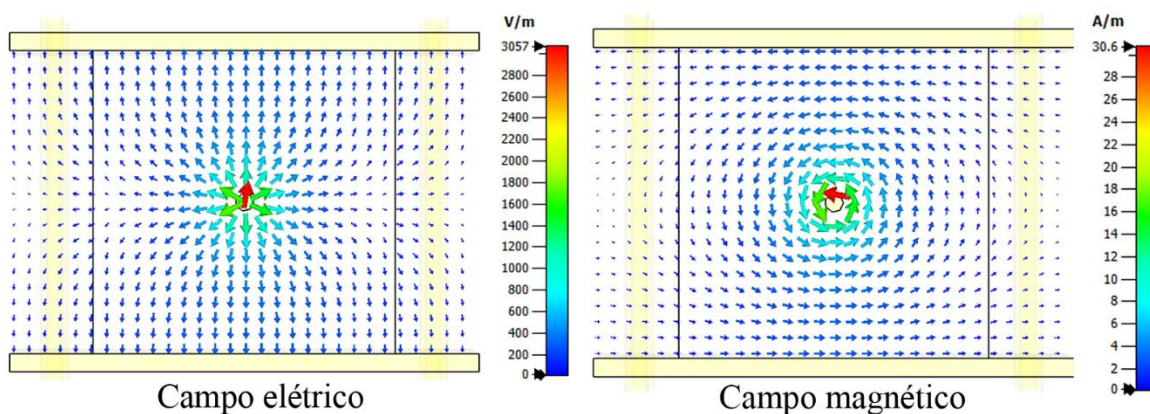


Figura 10. Modo de propagação TEM observado na secção transversal no interior da linha de fita.

4. Conclusão

São apresentados neste trabalho a modelagem e a simulação eletromagnética de dois tipos principais de linhas giromagnéticas, a linha coaxial e a de fita. Ficaram evidenciados suas potencialidades em gerar oscilações no pulso de saída. A simulação utilizando o *CST Studio* possibilitou o estudo destes dispositivos com mais detalhes, permitindo modificar parâmetros, tipo de materiais e dimensões. Como resposta, o programa exibe inúmeras maneiras de visualizar os resultados, seja pela análise dos espectros de frequências dos



pulsos ou das linhas de campo dos modos de propagação, facilitando o entendimento de seus fenômenos e contribuindo para a otimização do projeto das LTNLs.

O estudo da influência de parâmetros como campo magnético axial, amplitude do pulso de entrada, tipo de materiais, e a compactação destas linhas, serão investigados em trabalhos futuros.

Agradecimentos: Os autores gostariam de agradecer ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE e ao Laboratório Associado de Plasma – LABAP pelos recursos utilizados. Este trabalho foi financiado em parte pela CAPES (88887.492309/2020-00), CNPq (305338/2016-1), FAPESP (2018/260862) e pelo escritório de pesquisa da Força Aérea Americana SOARD – USAF (FA9550-18-1-0111).

Referências

- Ahn, J.-W.; Karelin, S. Y.; Kwon, H.-O.; Magda, I. I. and Sinitsin, V. G. (2015). “Exciting high frequency oscillations in a coaxial transmission line with a magnetized ferrite: 2D approach”. In *Journal of Magnetism*, v.100, n. 6, p. 68-72.
- Bragg, J.-W. B.; Dickens, J. C. and Neuber, A. A. (2013a). “Material selection considerations for coaxial, ferrimagnetic-based nonlinear transmission lines,” In *J. Appl. Phys.* 113, 064904.
- Bragg, J.; Dickens, J. C. and Neuber, A. A. (2010). “Magnetic biasing of ferrite filled nonlinear transmission lines”, In *IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference*.
- Bragg, J.; Dickens, J. C. and Neuber, A. A. (2012). "Investigation into the temperature dependence of ferrimagnetic nonlinear transmission lines", In *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 40, no. 10.
- Bragg, J.; Dickens, J. C. and Neuber, A. A. (2013b). "Ferrimagnetic nonlinear transmission lines as high-power microwave sources", In *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 41, No. 1.
- CST STUDIO SUITE®, CST – Computer Simulation Technology AG, www.cst.com.
- Gilbert, T. L. (2004). “A phenomenological theory of damping in ferromagnetic materials,” *IEEE Transaction on Magnetism*, Vol. 40, No. 6, p. 3443-3449.
- Karelin, S. Y.; Krasovitsky, V. B.; Magda, I. I.; Mukhin, V. S. and Sinitsin, V. G. (2019). "Radio frequency oscillations in gyrotropic nonlinear transmission lines", In *Plasma*, 2, 258-271.
- Karelin, S. Y.; Krasovitsky, V. B.; Magda, I. I.; Mukhin, V. S. and Sinitsin, V. G. (2016). “RF Oscillations in a coaxial transmission line with a saturated ferrite: 2-D simulation and experiment”, In *8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals*, 5-11 September, Odessa, Ukraine.
- Reale, D. V. (2013). “Coaxial ferrimagnetic based gyromagnetic nonlinear transmission lines as compact high-power microwave sources”, Ph.D. dissertation, Texas Tech University, TX, USA.



- Reale, D. V.; Parson, J. M.; Neuber, A. A.; Dickens, J. C. and Mankowski, J. J. (2016). "Investigation of a stripline transmission line structure for gyromagnetic nonlinear transmission line high power microwave sources", In *Review of Scientific Instruments* 87, 034706.
- Rossi, J. O.; Yamasaki, F. S.; Schamiloglu, E. and Barroso, J. J. (2017a). "Analysis of nonlinear gyromagnetic line operation using LLG equation", In *IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (PPC)*, Brighton, pp. 1-3.
- Rossi, J. O.; Yamasaki, F. S.; Barroso, J. J.; Schamiloglu, E. and Hasar, U. C. (2017b). "Operation analysis of a novel concept of RF source known as gyromagnetic line". In *Proc. SBMO/IEEE MTT-S Int. Microw. Optoelectron. Conf. (IMOC)*, Águas de Lindoia, SP, Brasil, pp. 1-4.
- Vaselaar, A. (2011). "Experimentation and modeling of pulse sharpening and gyromagnetic precession with a nonlinear transmission line," M.S. thesis, Electrical Eng. Dept., Texas Tech Univ., Lubbock, TX.
- Yamasaki, F. S.; Schamiloglu, E.; Rossi, J. O. and Barroso, J. J. (2016). "Simulation studies of distributed nonlinear gyromagnetic lines based on LC lumped model". In *IEEE Trans. Plasma Sci.* 44 (10), pp. 2232-2239.
- Yamasaki, F. S.; Rossi, J. O.; Silva, L. C.; Rangel E. G. L. and Schamiloglu, E. (2019) "Operation of a gyromagnetic line with magnetic axial Bias," In *IEEE Pulsed Power & Plasma Science (PPPS)*, Orlando, FL, USA, pp. 1-4.