

## MODELO ELETROMÁGNÉTICO PARA SENSORES DE SOLO SEM FIO EM BAIXAS FREQUÊNCIAS NA AGRICULTURA 4.0

PEDRO H. C. GOMES<sup>1</sup>; MAIQUEL S. CANABARRO<sup>2</sup>; GUILHERME S. ROSA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas – [jklpet.ufpel@gmail.com](mailto:jklpel.ufpel@gmail.com)

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas – [maiquel.canabarro@ufpel.edu.br](mailto:maiquel.canabarro@ufpel.edu.br)

<sup>3</sup>Pontifícia Católica Universidade do Rio de Janeiro – [guilhermeSimonDaRosa@cetuc.puc-rio.br](mailto:guilhermeSimonDaRosa@cetuc.puc-rio.br)

### 1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos termos como demanda e oferta são termos que acabamos nos familiarizando para dimensionar oscilações da disponibilidade de determinados produtos. Com o crescimento da população mundial as projeções por demandas futuras têm contribuído para alertar o agronegócio a se preparar para atender essa demanda crescente. Neste aspecto tanto monoculturas, quanto alimentação orgânica vem sendo foco de estudos. Em ambos os casos, dado as devidas proporções, vêm se buscando otimizar os processos de produção, perpassando pela sementeira, colheita, processamento e transportes. Esse processo vem utilizando a combinação de novas tecnologias como a internet das coisas (Internet of Things, IoT), apresentada pelo uso em larga escala de sensores conectados, (AYAZ, AMMAD-UDDIN, et al. 2019). Autores como (LIU, MA, et al. 2020) comentam como a indústria 4.0 está sendo embarcada e miniaturizada para monitorar seja solo, seja cultivares, dado origem a chamada agricultura 4.0. Outro ponto presente na chamada agricultura 4.0 refere-se a importância do sensoriamento em tempo real auxiliando no equilíbrio e otimização da produção fomentando uma lavoura mais sustentável, (SAEED, ALOUINI, et al. 2019).

Neste cenário, diversas concepções de sensores estarão interconectados, tornando a comunicação sem fio - *wireless* dissociável em termos de conectividade dos inúmeros sensores que estarão presentes. A Teoria Eletromagnética contempla tanto modelos que se utilizam de altas frequência para obtenção de dados, como a comunicação em espaço livre. Como, modelos em baixas frequências, os quais devem ser preteridos quando se deseja analisar meios com diferentes resistividade e condutividade, como é o caso do solo terrestre (SALAM, VURANM, et al. 2019). O sensor eletromagnético permite correlacionar uma grandeza eletromagnética medida com os critérios definidores do solo, como a umidade do solo, por exemplo. Existe diferentes métodos eletromagnéticos implementados computacionalmente para simulação de sensores dispostos sobre o solo (CHEW, JIN, et al. 2001). Métodos como o FDTD – *Finite Difference Time Domain* são largamente conhecidos pela sua robustez, porém exigem um alto poder computacional. Este Trabalho apresentar o modelo eletromagnético para sensores baseado no conceito das imagens complexas juntamente com as Leis de Maxwell, os resultados encontrados na validação foram pertinentes ao esperado e encorajadores.

### 2. METODOLOGIA

O devido entendimento do método das imagens complexas exige seguir o rigor espectral fundamentado nos trabalhos precursores de A. Sommerfield e K. Norton (NORTON, 1937), apresentando soluções clássicas de problemas de condições de contorno de uma antena solenoidal no topo de um substrato isotrópico. Esses resultados são utilizados como princípios para uma aproximação

de frequências reduzidas, ocasionando duas contribuições, uma da fonte e outra de uma imagem complexa. Nossa construção teórica generaliza a definição de imagens complexas, exibido inicialmente por J. Wait (WAIT, 1969), (WAIT, 1991), para circunstâncias em que o solo pode demonstrar perfil magnético expressivo e a contrapõe com os resultados numéricos, com a solução espectral (alcançada via integral de contorno no meio complexo) e com medições, que comprovam a capacidade da formulação para simular as principais características do solo da irradiação de campos, com mínimo gasto computacional. O método das imagens complexas se utiliza de simulações numéricas que modelam um sensor solenoidal na presença de um solo condutivo, consideramos antenas transmissora (TX) e receptora (RX) operando em na frequência de 348 kHz. A densidade de fluxo magnético é observada ao longo do eixo horizontal, com um solo com condutividade elétrica  $\sigma_2 = 0,05$  S/m. A verificação experimental deste problema foi feita em (TROTTER, RICKETTS, et al. 2013). Pode-se generalizar o formalismo do problema como se mostra na Figura 1, em que a posição do sensor fica definida em termos do vetor  $\vec{r}_{TX}$ . Além do que, a interface não está no plano  $z = -d_1$ , mas definida pela superfície  $S(x, y, z) = 0$  e pelo vetor normal  $\hat{n}^{-1}$ , ou também distante  $D_1$  da origem, e rotacionada pelos ângulos  $\theta_1$  e  $\phi_1$ .

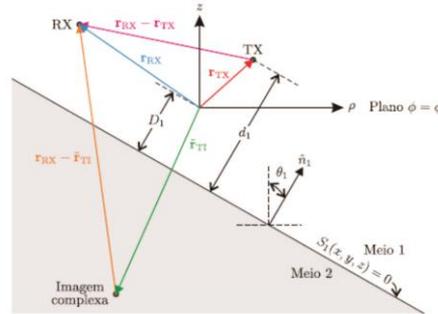


Figura 1 - Modelo geométrico usando imagens complexas.

Considerando baixas frequências os campos Elétrico e Magnético podem ser dados inicialmente por:

$$\begin{aligned} \vec{E}_1(\vec{r}) &\approx \vec{E}(\vec{r} - \vec{r}_{TX}, \hat{\alpha}_{TX}) + \vec{E}(\vec{r} - \vec{r}_{TI}, \hat{\alpha}_{TX} - 2(\hat{\alpha}_{TX} \cdot \hat{n})\hat{n}) \\ \vec{H}_1(\vec{r}) &\approx \vec{H}(\vec{r} - \vec{r}_{TX}, \hat{\alpha}_{TX}) + \vec{H}(\vec{r} - \vec{r}_{TI}, \hat{\alpha}_{TX} - 2(\hat{\alpha}_{TX} \cdot \hat{n})\hat{n}) \end{aligned} \quad (1)$$

O vetor posição que dita a imagem complexa é dado por  $\vec{r}_{TI} = \vec{r}_{TX} - \alpha_{12}\hat{n}_1$ , com  $\vec{r}_{TI} = \vec{r}_{TX} - 2d_1\hat{n}_1$ . Assim, nas equações acima, têm-se a contribuição da fonte TX e da imagem complexa TI. Os campos devido a densidade volumétrica de corrente magnética  $\vec{M} = \hat{\alpha}(-i\omega\mu_1 IA)\delta(\vec{r} - \vec{r}_{TX})$  podem ser escritos em uma notação compacta (JONES, SNEDDON, et al. 1964) dessa forma:

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{R}) &= \frac{\omega\mu_1 IA}{4\pi} \vec{R} \times \hat{\alpha} \left( \kappa_1 + \frac{i}{R} \right) \\ \vec{H}(\vec{R}, \hat{\alpha}) &= -\frac{IA}{4\pi} \frac{e^{i\kappa_1 R}}{R} \left\{ \frac{1}{R} \left( -i\kappa_1 + \frac{1}{R} \right) \left[ 3\hat{R}(\hat{R} \cdot \hat{\alpha}) - \hat{\alpha} \right] - \kappa_1^2 \hat{R} \times (\hat{R} \times \hat{\alpha}) \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

onde temos:  $\vec{R} = R\hat{R}$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de medições para um TX solenoidal com raio  $\rho_T = 8,25$  cm com 45 espiras alimentadas com 0,5 W estão na Figura 2.

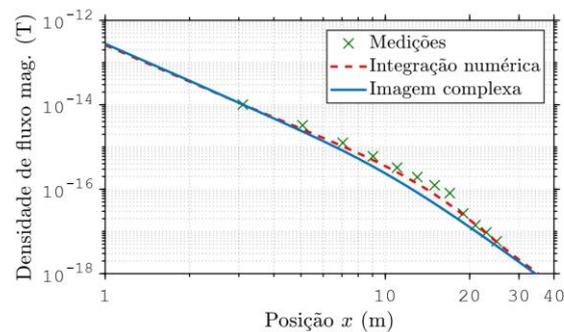


Figura 2 - Densidade de fluxo magnético em um sensor RX. Resultados via integração numérica da solução exata(---) enquanto do método da imagem complexa (linha) e de medição obtidos em (TROTTER) (xx).

Com objetivo de examinar mais detalhadamente a precisão do modelo de imagem complexa apresentado, na figura 3 estão os resultados da simulação de um cenário similar com o anterior, entretanto, agora o domínio de observação se propaga através do plano x-z. Demonstramos a intensidade de campo magnético em decibel obtida de um sensor RX usando a integração numérica da solução exata e o método da imagem complexa. A antena TX é caracterizada por  $A_I = 1\text{Am}^2$ , e é operada em 348 kHz. Os resultados se apresentaram encorajadores para baixas frequências por meio do método simulado e adequados para aplicações práticas. O tempo computacional solicitado para se obter os campos de grade de  $50 \times 50$  pontos, Figura 3, foi de 96,81 s para o método via integração numérica. A formulação do método das imagens complexas tomou somente 0,78 s do tempo de CPU.

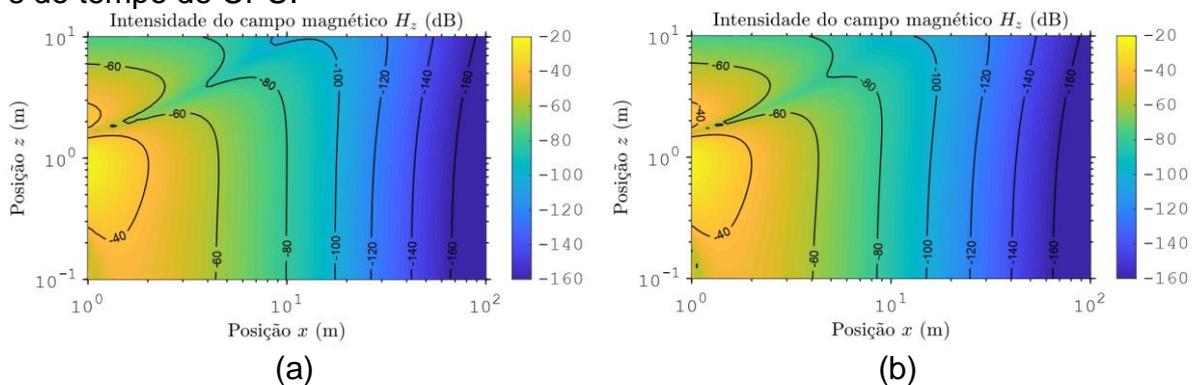


Figura 3: Solução integração numérica (a), Solução imagens complexas. (b).

#### 4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, apresentamos o método das imagens complexas que simula a análise da propagação de campos eletromagnéticos em ambientes comumente encontrados na agricultura: Sensores sem fio colocados acima de um solo condutor. A partir da solução espectral para o problema de valor de contorno em questão derivamos uma aproximação para baixas frequências para o campo espalhado pelo solo por meio de contribuições de imagens complexas. Resultados numéricos foram apresentados e comprovam a capacidade do modelo apresentado em representar, com baixo custo computacional, os principais efeitos do solo na propagação eletromagnética. Cabe ressaltar que esse projeto foi financiado com bolsa de iniciação científica PROBIT/FAPERGS.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LIU Y., MA X., SHU L., HANCKE G. P., and ABU-MAHFOUZ A. M., From industry 4.0 to agriculture 4.0: Current status, enabling technologies, and research challenges, **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 2020, in press. DOI: 10.1109/TII.2020.3003910.

AYAZ M., AMMAD-UDDIN M., SHARIF Z., MANSOUR A., and AGGOUNE E. M., **Internet-of-things (iot)-based smart agriculture: Toward making the fields talk**, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 129 551–129 583, 2019.

SAEED N., ALOUINI M., and AL-NAFFOURI T. Y., Toward the internet of underground things: A systematic survey, **IEEE Communications Surveys Tutorials**, vol. 21, no. 4, pp. 3443–3466, 2019.

SALAM A., VURAN M. C., DONG X., ARGYROPOULOS C., and IRMAK S., A theoretical model of underground dipole antennas for communications in internet of underground things, **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, vol. 67, no. 6, pp. 3996–4009, 2019.

CHEW W. C., JIN J.-M., MICHIELSSEN E., and SONG J., **Fast and Efficient Algorithms in Computational Electromagnetics**, ser. Artech House antennas and propagation library. Artech House, 2001.

NORTON K. A., **The propagation of radio waves over the surface of the earth and in the upper atmosphere**, *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, vol. 25, no. 9, pp. 1203–1236, 1937.

WAIT J. R., Image theory of a quasistatic magnetic dipole over a dissipative half-space, *Electronics Letters*, vol. 5, no. 13, pp. 281–282, 1969.

WAIT J. R., Complex image theory-revisited, **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, vol. 33, no. 4, pp. 27–29, 1991.

SILVA V. da Silva e, REGIS C., and JR. A. Q. H., Complex plane 's integration in the modelling of electromagnetic fields in layered media: part 1. Application to a very large loop, **Journal of Geophysics and Engineering**, vol. 11, no. 1, 01 2014.

TROTTER M. S., RICKETTS D. S., and GRIFFIN J. D., Experimental demonstration of complex image theory for vertical magnetic dipoles with applications to remote sensing and position tracking, in **INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTROMAGNETICS IN ADVANCED APPLICATIONS (ICEAA)**, 2013, pp. 1248–1251.

MATLAB, version 9.8.0.1323502 (R2020a). Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2010.

JONES D. S., SNEDDON I. N., ULAM S., and STARK M., *The Theory of Electromagnetism*. New York, NY, USA: **Pergamon Press**, 1964.