

AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE DO EMPREGO DO POLÍMERO PET COMO LENTES ELETROMAGNÉTICAS

EVALUATION OF PET POLYMER EMPLOYMENT POTENTIALITY AS ELECTROMAGNETIC LENSES

Lidiane Aparecida Pereira Miranda¹

Renata Carolina Zanetti Lofrano²

Moacir de Souza Junior³

Submetido: 27/05/2020 / Aprovado: 02/12/2021 / Publicado: 04/07/2022.

Resumo

Este artigo apresenta simulações numéricas como ferramenta, para verificar a viabilidade da utilização do polímero polietileno tereftalato, conhecido como PET, em estruturas periódicas submetidas a campos eletromagnéticos de 10 GHz. Os resultados darão suporte para a utilização destes materiais como lentes eletromagnéticas planas convergentes assim como os metamateriais. Foram analisadas diferentes situações em que uma estrutura periódica de PET é interposta entre uma antena emissora e outra receptora. No final ficará demonstrado que as estruturas periódicas de PET apresentaram melhores resultados em relação a uma estrutura maciça e, até mesmo, em um caso onde não existem nada entre as duas antenas. Foi demonstrado que a estrutura de PET direciona o campo eletromagnético para a antena receptora como faria uma estrutura de metamateriais. A possibilidade da utilização dos materiais PET como lentes eletromagnéticas planas poderá contribuir para um desenvolvimento tecnológico e sustentável, pois permitirá a diminuição de PET no meio ambiente.

Palavras-chave: Transmissão sem fio. Metamaterial. Polímero PET.

Abstract

This article presents numerical simulations as a tool to verify the feasibility of using the polyethylene terephthalate polymer, known as PET, in periodic structures subjected to 10 GHz electromagnetic fields. The results will support the use of these materials as converging flat electromagnetic lenses as well as those metamaterials. Different situations were analyzed in which a periodic PET structure is interposed between a sending and receiving antenna. In the end, it will be demonstrated that the periodic PET structures showed better results in relation to a massive structure and, even, in a case where there is nothing between the two antennas. It has been shown that the PET structure directs the electromagnetic field towards the receiving antenna as a metamaterial structure would. The

¹ Mestre em Tecnologias para Desenvolvimento Sustentável. Universidade Federal de São João del-Rei/UFSJ. E-mail: lidianeapmiranda@yahoo.com.br

² Pós-doutorado em Nanotecnologia. Universidade Federal de São João del-Rei/UFSJ. Departamento de Engenharia Química/DEQUI. E-mail: renataczlofrano@ufsj.edu.br

³Doutor em Engenharia Elétrica Universidade Federal de São João del-Rei/UFSJ. Departamento de Engenharias e Mecatrônica/DETEM. E-mail: moacir@ufsj.edu.br



possibility of using PET materials as flat electromagnetic lenses may contribute to a technological and sustainable development, as it will allow the reduction of PET in the environment.

Keywords: Wireless transmission. Metamaterial. PET polymer

1. INTRODUÇÃO

Há na atualidade a necessidade de suprir a uma demanda de energia elétrica, assim como atender aos diversos setores do país. Isto impulsiona pesquisas dedicadas ao desenvolvimento de sistemas para a transmissão eficiente de energia sem fio.

Os estudos experimentais sobre o conceito de transmissão de energia elétrica no espaço livre tiveram início no fim do século XIX, e foram realizados por Heinrich Hertz e Nikola Tesla (AVILA, *et al*, 2016). Tesla tentou sem sucesso, transmitir grande quantidade de energia sem a necessidade da rede elétrica. Seu projeto ficou conhecido como *Wardenclyffer Tower* ou torre de *Wardenclyffer*, mas a tecnologia da época era precária, aliada à falta de investimento financeiro, seus resultados não foram satisfatórios (ARAÚJO, 2012).

Em um futuro no qual a transferência de eletricidade ocorreria sem o intermédio de fios, antenas inseridas nos aparelhos como telefones, computadores portáteis, e demais equipamentos seriam capazes de ser carregados sem a necessidade de conectá-los a uma tomada (ARAÚJO, 2012).

Apesar dos avanços científicos, a propagação de ondas eletromagnéticas no ar na transmissão de energia sem fio expõe uma série de problemas, entre eles a ausência de diretividade do sinal, ou seja, a radiação eletromagnética quando emitida se propaga em todas as direções (RIBEIRO, 2008).

O emprego de materiais com o índice de refração negativo, chamados de metamateriais, na transmissão de energia sem fio, abre a possibilidade da confecção de lentes eletromagnéticas, onde o sinal se torna mais diretivo.

Os metamateriais pertencem a uma nova classe de materiais artificiais compostos de pequenas estruturas periódicas formadas de dielétricos e condutores. Juntas, essas estruturas formam um material único com as propriedades constitutivas (permeabilidade magnética e permissividade elétrica) efetivas próximas à zero ou até mesmo menores que a unidade (SARTORI, 2009).

A utilização de materiais vastamente empregados no cotidiano da humanidade e descartados inadequadamente na natureza, como por exemplo, o plástico polietileno tereftalato (PET) junto ou não com materiais condutores foi aqui aplicado como alternativa ao uso dos metamateriais na composição de lentes eletromagnéticas para a energia sem fio.

O polietileno tereftalato, conhecido como PET é um dos polímeros mais produzidos no mundo (FONSECA; MEDEIROS; VINHAS, 2014). Seu emprego como embalagens de bebidas, principalmente acabam se transformando em resíduos sólidos urbanos (COLTRO; DUARTE, 2013).

O PET leva um longo período de tempo para ser degradado espontaneamente e o acúmulo desses objetos no meio ambiente é extremamente problemático (SOARES *et al*, 2013).

A efetuação do PET como lentes eletromagnéticas na transmissão de energia sem fio poderá contribuir para reduzir a quantidade de resíduos descartados no meio ambiente, propiciando a minimização dos impactos ambientais ocasionados pelo seu descarte inapropriado, já que o mesmo será reutilizado e assim, contribuirá para a sustentabilidade ambiental.

Com o auxílio de simulações computacionais, foi possível verificar o desempenho de estruturas periódicas de polietilenotereftalato na transmissão de energia eletromagnética na frequência de 10 GHz.



2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As propriedades eletromagnéticas específicas dos metamateriais que os diferenciam dos materiais ordinários, serão agora revisadas.

2.1 Metamateriais

O metamaterial é um material artificial constituído a partir de materiais comuns; dielétricos, condutores ou por combinação destes. Caracteriza-se por apresentar a permissividade elétrica (ϵ), e a permeabilidade magnética (μ), negativas (FERREIRA; OLIVEIRA; ANDRADE, 2008).

O físico russo Victor Veselago foi um dos pioneiros no estudo dos metamateriais e suas pesquisas, publicadas em 1968, já citava os metamateriais.

Passados quase 30 (trinta) anos da publicação de Veselago, John Pendry sugeriu que os materiais com μ e $\epsilon < 0$ poderiam ser feitos artificialmente pelo uso de estruturas periódicas de vários elementos (MUNK, 2009). Conforme Solymar e Wash (2011), as dimensões de cada elemento dessa estrutura periódica deverá ser menor do que o comprimento de onda do campo eletromagnético.

A fabricação desses materiais com propriedades particulares é complexa, e novas alternativas estão sendo propostas (SARTORI, 2009). Esses novos materiais, cujo prefixo meta faz alusão à natureza excêntrica de seus parâmetros eletromagnéticos, são também conhecidos como duplo negativo (DNG), possuem o índice de refração negativo (NRI), dentre outros (MOURA, 2015).

As combinações de arranjos geométricos de diferentes tipos de estruturas podem resultar, basicamente, em quatro tipos de meios, conforme a figura 1(A). As denominações ENG, DNG, MNG significam, respectivamente, os materiais que possuem ϵ negativo e μ positivo, materiais que possuem essas duas propriedades negativas e somente o μ negativo.

A figura 1 (B) compara a luz propagando em dois meios diferentes: um material comum e outro de metamaterial. O comportamento do feixe incidindo sobre o metamaterial mostra que todos os raios provenientes do objeto podem ser direcionados a um ponto, fato este que poderá ser empregado na otimização da transmissão de energia (SOLYMAR E WASH, 2011).

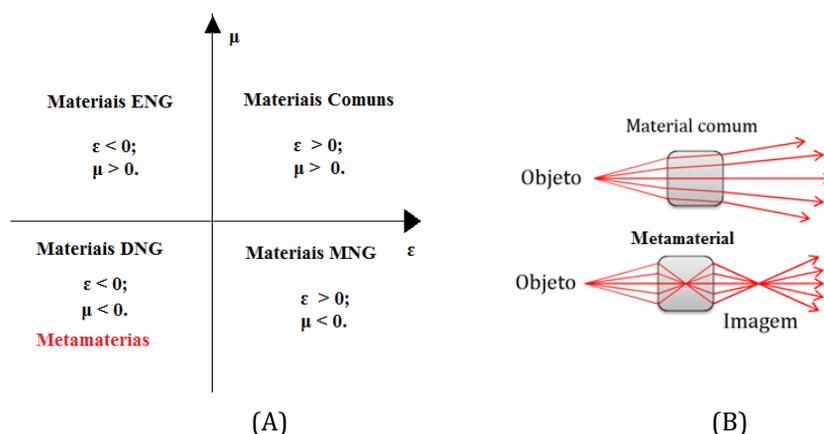


Figura 1 - (A) Figura que expressa os tipos de meios de materiais. Extraído de SARTORI, 2004 (adaptado); (B) Figura da representação das radiações refletida e refratada. Extraído de: NOWACKI, 2015.

2.2 Índices de Refração

O metamaterial ilustrado na figura 1, no terceiro quadrante, apresenta índice de refração negativo ($n < 0$). Este índice define um fenômeno chamado de refração que é a mudança de direção

e velocidade da onda eletromagnética ao mudar de meio. Em meios iguais não ocorre a refração, e a onda eletromagnética propaga-se em um único sentido (ZIOLKOWSKI, 2002).

Veselago determinou que se ϵ ou μ fossem negativos, a propagação de ondas eletromagnéticas não seria como nos meios ordinários (FERREIRA; OLIVEIRA; ANDRADE, 2008).

Conforme o diagrama da figura 1, na região onde ϵ e μ são positivos, que é o caso dos materiais convencionais, o índice de refração é positivo; e na região onde ϵ e μ são negativos estão os metamateriais (NOWACKI, 2015).

O índice de refração pode ser definido conforme a equação 1 (HAYT JR, 2003):

$$n^2 = \epsilon_r \mu_r \quad (1)$$

Na qual: n é o índice de refração; ϵ_r é a permissividade elétrica relativa do material; μ_r é a permeabilidade magnética relativa do material.

Em materiais comuns, cujos valores de permissividade elétrica relativa e a permeabilidade magnética relativa são positivos, a equação do índice de refração resultará em valor positivo, segundo a equação 2:

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (2)$$

Para os materiais com a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética negativas, o índice de refração é negativo, como mostra a equação 3 (GONÇALVES, 2011):

$$n = -\sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (3)$$

O metamaterial tem uma variedade de aplicações que deu início a intensos estudos e pesquisas experimentais como as "capas de invisibilidade", a fabricação de lentes eletromagnéticas, sistemas de comunicação e captação de energia a laser (NOWACKI, 2015). A aplicação como lentes eletromagnéticas é de interesse neste trabalho.

Seu emprego como lentes planas, cuja função seria direcionar o sinal eletromagnético a um determinado ponto, auxiliando na transmissão sem fio de energia elétrica, é mostrado na Figura 2.

2.3 Polímeros

Os polímeros são macromoléculas, de origem natural tais como a celulose, amido e proteínas, ou sintéticos oriundos de fontes petroquímicas. Ambos são constituídos essencialmente de carbono e estruturados em unidades chamadas de *meros* (partes), que se repetem sucessivamente formando a molécula polimérica. Os polímeros são divididos em diferentes classes, tais como elastômeros, termorrígidos e termoplásticos, sendo esses últimos chamados comumente de plásticos (SOLOMONS, 2009).

São vários os polímeros sintéticos produzidos e utilizados em larga escala na atualidade. Alguns exemplos desses são o poliestireno (isopor), politetrafluoroetileno (Teflon), policloreto de vinila (PVC), poliésteres (Dacron, Mylar), poliamidas (náilon), poliuretanos e resinas de epóxi (PARENTE, 2006; BARBOSA, 2004). Estes apresentam os mais diversos usos devido às suas propriedades mecânicas, físicas e químicas diferenciadas, e ao seu baixo custo de produção. Sua aplicação que vão desde copos, resinas, compartimentos e recobrimentos, artefatos, calçados, tintas, embalagens, têxteis, tubos para conexões, adesivos e entre outros.

Uma das propriedades mais exploradas nos plásticos são a sua lenta ou baixa degradabilidade no decorrer do tempo, o que os tornam bastante úteis para diversos tipos de aplicações. Tal uso gera



também em larga escala, devido ao seu descarte inadequado, imensas quantidades de resíduos plásticos no meio ambiente (PEDROZO, 2009).

Segundo a norma NBR 10004:2004 (ABNT, 2004), os resíduos plásticos estão na classificação de resíduos classe II, ou seja, são resíduos sólidos não perigosos, mas quando descartado inadequadamente em rios, encostas e lixões, ocasionam danos ambientais diversos (SPINACÉ; DE PAOLI, 2009). Dessa forma, quantidades notáveis de resíduos de materiais plásticos, têm se acumulando em aterros e no meio ambiente, gerando prejuízos ambientais, de variam desde a liberação de componentes tóxicos para o meio ambiente (águas e solos) e a ingestão de plásticos por organismos vivos.

Como alternativa à diminuição desses resíduos plásticos, pode-se adotar a redução do uso/consumo de produtos plásticos. Entretanto, é possível também fazer o reuso de materiais plásticos de maneiras diversas e para diferentes finalidades (OLIVEIRA, 2012). Como exemplo podemos citar as pesquisas desenvolvidas pelo LEMAC – UNICAMP, nas quais foram obtidos resultados satisfatórios ao substituir os metamateriais por grades dielétricas, utilizando-se materiais de baixo custo. Esses materiais, no caso foram os tubos policloreto de vinila, conhecido como PVC (SARTORI, 2009). Baseando-se nesse estudo o presente artigo relata o estudo sobre a viabilidade do emprego de estruturas periódicas do polietileno tereftalato (PET) residual, usados em embalagens de bebidas, como substituto aos metamateriais para otimização da transmissão de energia elétrica sem fio. Trata-se assim, de um estudo tecnológico relevante e promissor que contribui para a sustentabilidade ambiental, devido ao consumo de um resíduo plástico gerado em elevadas quantidades.

3. METODOLOGIA

Este trabalho trata da interação de estruturas periódicas feitas de polímeros (PET) com campos eletromagnéticos na frequência de 10 GHz. A fonte de campo utilizada foi uma antena filamentar com corrente elétrica de 1A e comprimento de 1 cm.

As propriedades constitutivas do polietileno tereftalato virgem como permissividade elétrica relativa, permeabilidade magnética relativa e condutividade elétrica são respectivamente $\epsilon_r = 3,2$, $\mu_r = 1$ e $\sigma = 10^{-13}$ S/m (HORIBA, 2006).

As simulações foram realizadas no domínio da frequência.

A figura 2 apresenta o posicionamento das antenas transmissora e receptora e o tamanho da estrutura que foi mantido nas simulações. Sendo que na figura 2(A) mostra uma chapa maciça em forma de paralelepípedo com dimensões de 1,8 cm de espessura, 10 cm de largura e 10 cm de profundidade. Tal estrutura encontra-se disposta equidistante das antenas emissora (do tipo filamentar) e receptora.



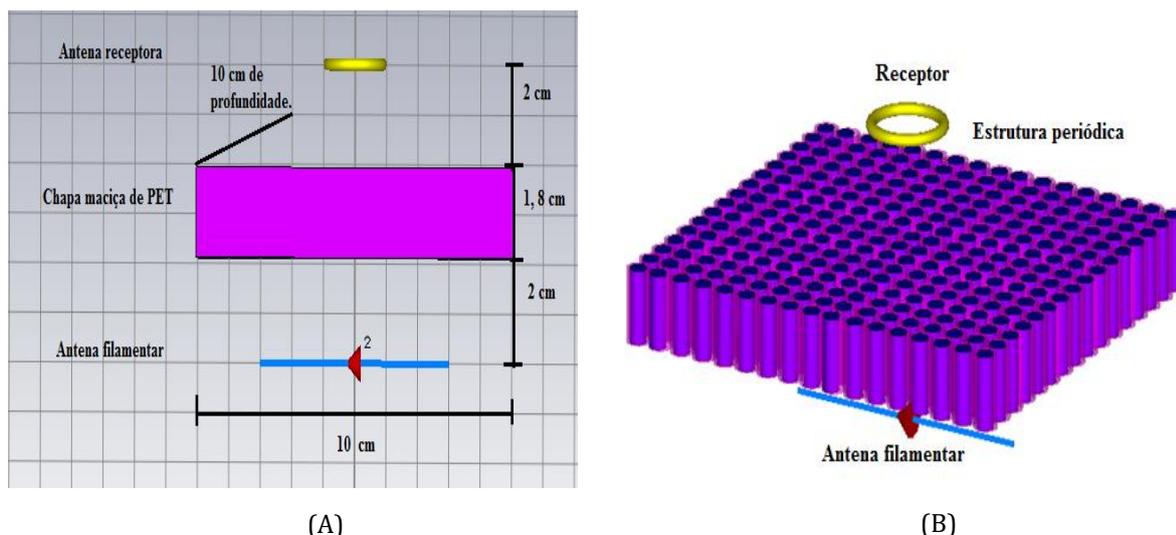


Figura 2 – (A) Chapa maciça de PET com as dimensões e posições utilizadas nas simulações;
(B) Tubos cilíndricos formando uma estrutura com as mesmas dimensões da chapa maciça.

A estrutura periódica formada por cilindros com 0,6 cm de diâmetro externo e 0,2 cm de espessura (no caso dos cilindros ocos).

Nas simulações realizadas em quatro casos, a saber:

1: Simulação da distribuição do campo elétrico sem estrutura entre as antenas transmissoras e receptoras.

2: Simulação com a estrutura formada por uma chapa maciça de PET.

3: Cilindro maciço de PET com 0,6 cm de diâmetro.

4: Cilindro de PET com núcleo vazado.

Os dados analisados foram do campo elétrico no espaço após as estruturas e sobre a antena receptora. A densidade da malha foi gerada automaticamente pelo *software*.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Devido à simetria do problema foram apresentados os resultados em duas dimensões no plano $z = 0$ (eixo “z” saindo da página) com o corte nas figuras feito no centro da estrutura e antena receptora.

Os valores traçados do módulo do campo elétrico em RMS (root mean square ou valor médio no tempo) no centro da antena receptora (entre os pontos ‘A’ e ‘B’).

O *software* “*CST Studio Suite*” empregado usou o método de elementos finitos (FEM - Finite Element Method) para resolução das equações no domínio da frequência. Este possui ajuste automático e adaptativo da densidade de malha. A condição de contorno adotada nos limites das simulações foi a absorvente a fim de simular o espaço livre.

A região de análise foi em forma de um cubo de 30 cm de lado.

Os quatro casos estudados permitiram comparações entre dois tipos de estruturas periódicas tubos vazados e maciços e uma estrutura maciça, reforçando a importância da periodicidade como nos metamateriais.

Caso 1: Simulação da distribuição do campo elétrico V/m sem estruturas entre as antenas transmissora e receptora.

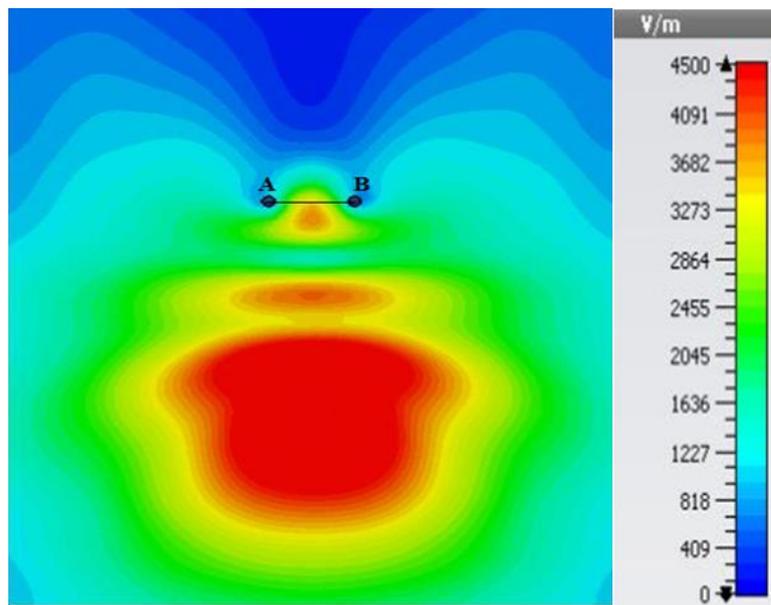


Figura 3 - Distribuição do campo elétrico em V/m na região entre as antenas (sem estrutura).

Os pontos A e B ilustrados na figura 3 referem à região da antena receptora.

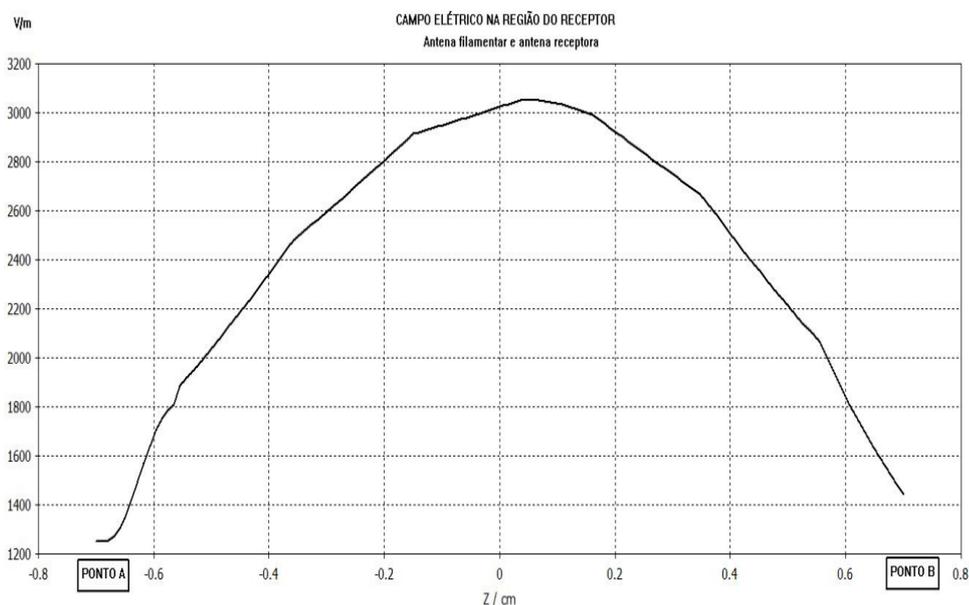


Figura 4 - Distribuição do campo elétrico em V/m na região da antena receptora entre os pontos A e B (cm) da Figura 3.

Notou-se que, na região da antena receptora o valor máximo obtido de campo elétrico de aproximadamente 3000V/m.

Caso 2: Simulação da distribuição do campo elétrico em V/m com a chapa maciça de PET entre as antenas transmissora e receptora (região entre os pontos A e B em cm).

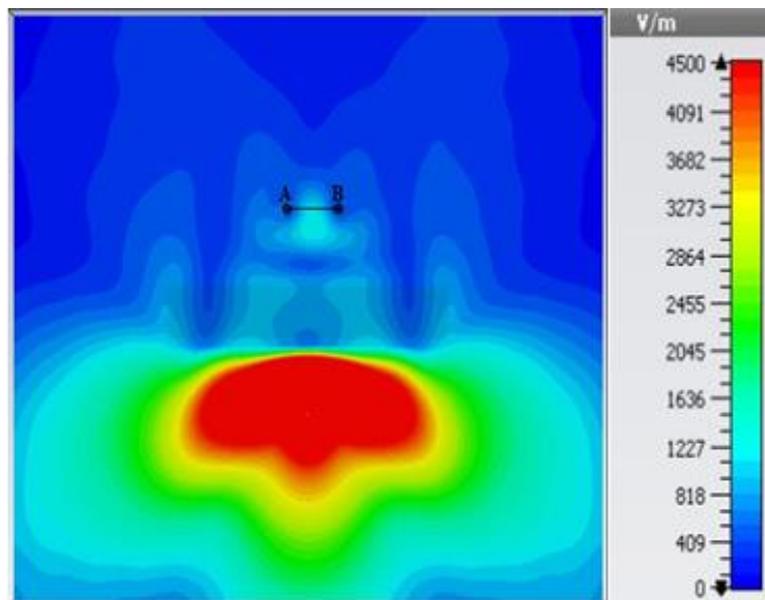


Figura 5 - Distribuição do campo elétrico em V/m na região entre as antenas.

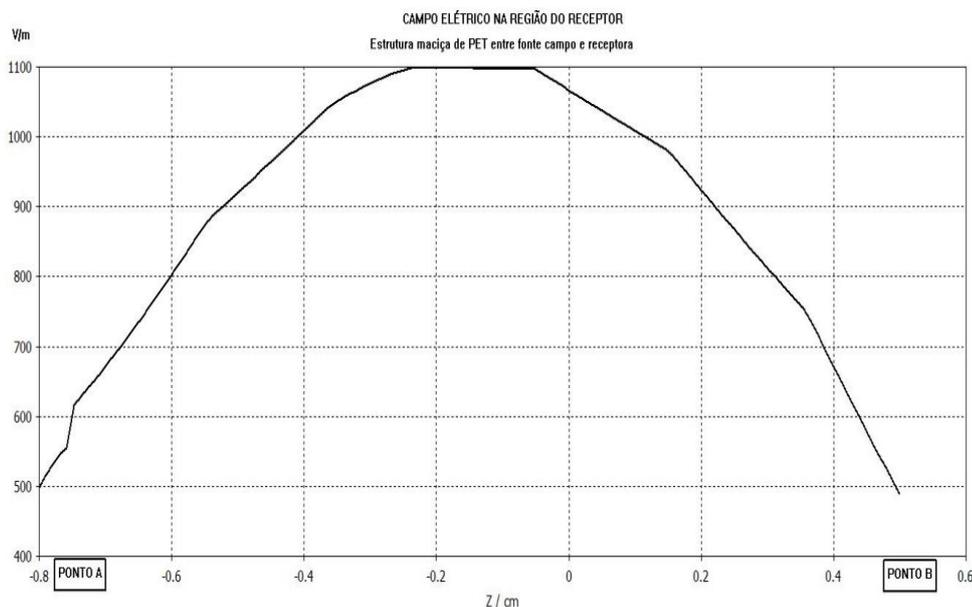


Figura 6 - Distribuição do campo elétrico na região da antena receptora (pontos A e B da Figura 5).

As figuras de 3 a 6 (Caso 1 e 2) indicam que os valores do campo elétrico em V/m apresentaram maiores na ausência da estrutura maciça, o que era esperado, já que a estrutura impede de o campo elétrico atingir a antena receptora.

Caso 3: Estrutura formada por cilindros maciços de PET com 0,6 cm de diâmetro cada um.

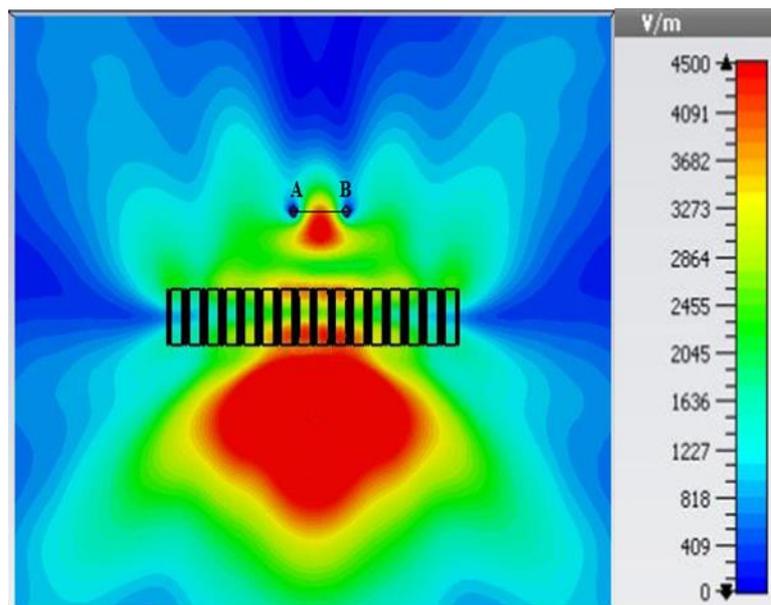


Figura 7 - Distribuição do campo elétrico em V/m na região entre as antenas.

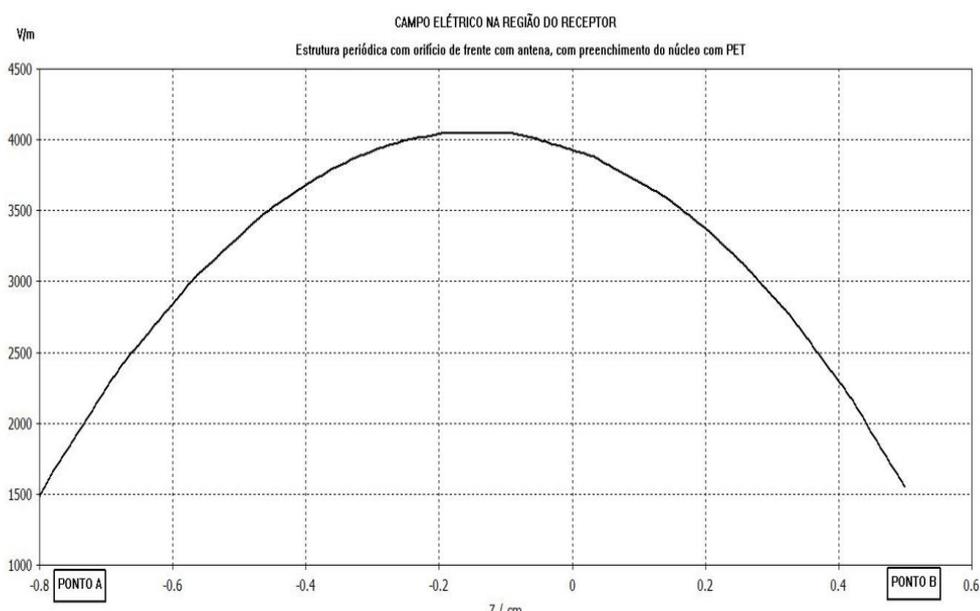
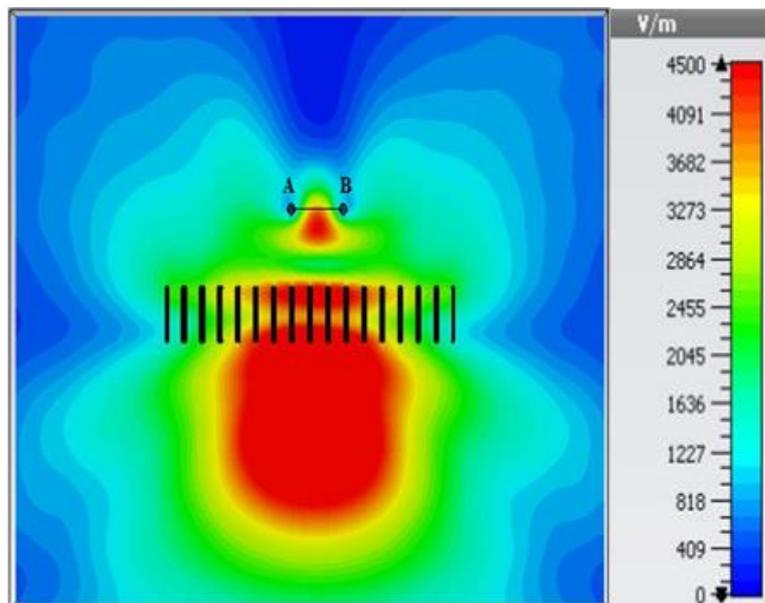
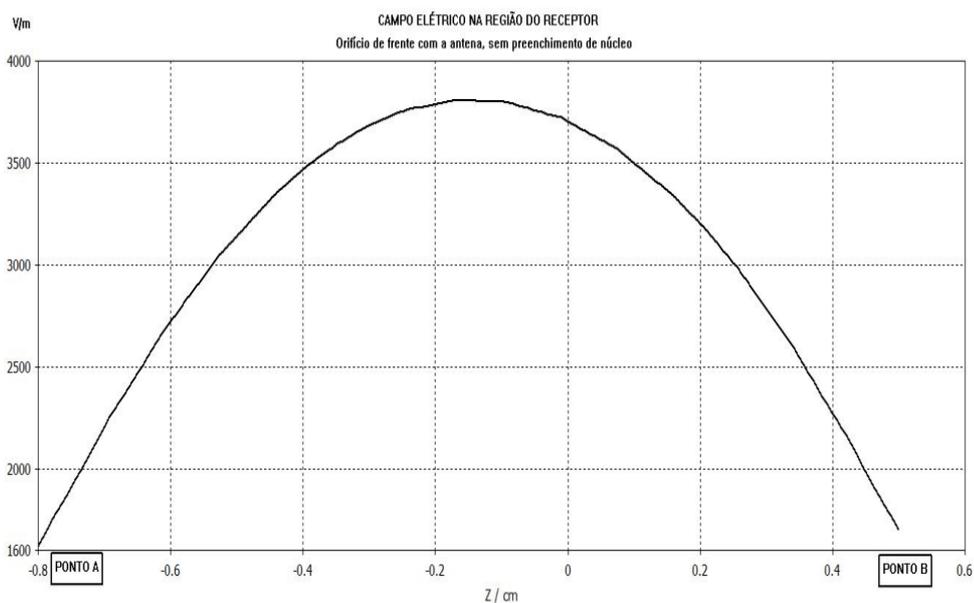


Figura 8 - Distribuição do campo elétrico em V/m na região da antena receptora (distância entre os pontos A e B em cm na Figura 7).

Neste caso detectou-se que o valor do campo elétrico na região da antena receptora maior do que o caso 1 (sem estrutura) e o caso 2 (chapa maciça), atingindo um valor máximo de 4000V/m na região da antena receptora.

Caso 4: Estrutura formada por cilindros PET com núcleo vazado.**Figura 9** - Distribuição do campo elétrico em V/m na região entre as antenas.**Figura 10** - Distribuição do campo elétrico em V/m na região da antena receptora (pontos A e B em cm Figura 9).

Os resultados dos casos 3 e 4 mostraram que a intensidade do campo elétrico, na região da antena receptora manteve superior comparado aos casos 1 e 2, ou seja, estes resultados indicam que estruturas formadas por arranjos periódicos podem funcionar como lentes eletromagnéticas como os metamateriais. Tais resultados corroboram com os resultados obtidos por (SARTORI, 2009).

5. CONCLUSÕES

Os estudos realizados neste trabalho apontaram que a utilização de estruturas periódicas compostas de materiais ordinários (PET), tem propriedade de convergir os campos eletromagnéticos nas condições testadas.

Esse comportamento é semelhante aos dos metamateriais, que podem se comportar como lentes convergentes conforme a Figura 01.

Os resultados das simulações indicaram que o emprego do material PET em estruturas periódicas (tubos) fez com que a intensidade do campo eletromagnético fosse maior na região da antena receptora, inclusive em comparação com o caso 1 onde não foram posicionadas estruturas entre as antenas.

Notou-se ainda que a aplicação das chapas maciças não são eficazes corroborando para com os estudos que apontam a importância da periodicidade da estrutura para que se obtenham valores de permeabilidade e permissividade efetivas diferentes das dos materiais que a constitui.

Uma possibilidade é aplicar os materiais PET em forma de estruturas periódicas tubulares seria na confecção de radomes de antenas fazendo com que estes, além do objetivo de proteção da antena funcionem como elemento de convergência do campo eletromagnético, aumentando a diretividade das antenas.

Tais resultados são promissores e mostram que os resíduos poliméricos poderão ser empregados na otimização da transmissão da energia sem fios como alternativa aos metamateriais, possibilitando o reuso desse resíduo, o que contribuirá para minimizar os impactos ambientais ocorridos por acúmulo desses materiais no meio ambiente.

6. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Humberto Xavier. **Projeto e implementação de câmara GTEM-giga hertz transverse electromagnetic para testes de compatibilidade eletromagnética de circuitos e sistemas eletrônicos**. 2012. f. 154. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**, Resíduos Sólidos – Classificação, Rio de Janeiro, 2004.

ÁVILA, Irineu; *et al.* **Transmissão de energia elétrica sem fio: estudo e demonstração prática**. In: **Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica**, n. 14, 2016, Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2016.

BARBOSA, Luiz Claudio de Almeida. **Introdução à química orgânica**, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

COLTRO, L.; DUARTE, L. C. Reciclagem de embalagens plásticas flexíveis: contribuição da identificação correta, **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, n. 1, v. 23, p.128-134, 2013.

FERREIRA, José Everaldo Julião; OLIVEIRA, José Edimar B.; ANDRADE, Luiz Alberto. **Projeto, Fabricação, Testes e Resposta em Frequência de Double Negative Metamateriais em uma dimensão utilizando Split-Ring Resonator em geometria Triangular Equilátera de cobre em dielétrico Teflon e Fibra de vidro**. In: **Simpósio de Aplicações Operacionais em áreas de defesa**, n. 10, 2008, São José dos Campos, Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

DOI: <http://dx.doi.org/10.24021/raac.v19i1.5520>

Vol. 19, N. 1 (2022)



Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

FONSECA, T. G.; MEDEIROS, Y. B.; VINHAS, G. M. Reciclagem Química do PET Pós-consumo: Caracterização Estrutural do Ácido Tereftálico e Efeito da Hidrólise Alcalina em Baixa Temperatura. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: n.5, v. 24, p. 567-571, 2014.

GONÇALVES, Ana Margarida Neves. **Ondas Eletromagnéticas em Meios Metamateriais: Guias e Lentes**. 2011. f. 96. Tese (Mestrado em Eletrotécnica e de Computadores) Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa 2011.

HAYT JUNIOR, Willian. H.; BUCK, John. **Eletromagnetismo**, 6. ed., LTC, 2003.

HORIBA, Jobin Yvon. **Lorentz Dispersion Model**. Spectroscopic Ellipsometry t.n. 08, França, 2006. Disponível em: <<https://www.horiba.com/pl/scientific/products/ellipsometers/application-notes/>>. Acesso em: 16 out 2017.

MUNIZ, Leone Veiga. **Projeto, fabricação e caracterização experimental de metamateriais quirais para biossensoriamento na faixa de micro-ondas**. 2013. f. 153. Tese (Mestrado em Ciências). Telecomunicação. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2013.

MUNK, Ben. A. **Metamaterial: critique and alternative**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2009.

NOWACKI, Bruno Fernando. **Polímeros quirais conjugados para aplicação em metamateriais**. 2015.f. 136. Tese (Doutorado em Ciências). Tecnologia e ciências exatas. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

OLIVEIRA, Maria Clara Brandt Ribeiro. **Gestão de resíduos plásticos pós-consumo: perspectivas para a reciclagem no Brasil**. 2012. f. 102. Tese (Mestrado em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

PARENTE, Ricardo Alves. **Elementos estruturais de plástico reciclado**. 2006. f. 153. Tese (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

PEDROZO, Tiago Hommerding. **Ésteres etílicos epoxidados do óleo de milho como plastificante alternativo para o PVC**. 2009. f. 99. Tese (Mestrado em Química). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

RIBEIRO, José Antônio Justino. **Propagação das Ondas Eletromagnéticas - Princípios e Aplicações**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2008.

SARTORI, Eduardo José. **Estudo experimental de metamateriais baseados em grades dielétricas**. 2004. f. 113. Tese. (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004.

SARTORI, Eduardo José. **Metodologia experimental de desenvolvimento de Grades metamateriais com permissividade quase-zero e negativa**. 2009. Tese. (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Estadual de Campinas. Campinas 2009.



SOARES, L. L. S.; *et al.* Determinação de acetaldeído e contaminantes em embalagens de pet pós-consumo reciclado. **Revista Analytica**. n. 62, p.52-57 Jan, 2013.

SOLOMONS, T. W. Graham; FRYHLE, Craig. B.; SNYDE, Scott. **Química Orgânica**, vol. 1, 9. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2009.

SOLYMAR, L.; WASH, D., **Electrical Properties of Materials**. 8. ed., New York, Oxford, 2011.

SPINACÉ, M. A. S.; DE PAOLI, M. A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química Nova**. n.1, v.28, p.65-72, 2005.

ZIOLKOWSKI, Richard W. Doubler negative metamaterial design, experiments, and applications. **IEEE AP-S INT. SYMP, Proceedings**. San Antonio. n. 2, p. 396-399, 2002.

