



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA**

Autorizada pelo Decreto Federal nº 77.496 de 27/04/76  
Recredenciamento pelo Decreto nº 17.228 de 25/11/2016



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**COORDENAÇÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA**

## **XXVIII SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UEFS** **SEMANA NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA - 2024**

### **UM ESTUDO SOBRE A ÓTICA DE TRANSFORMAÇÃO APLICADA À CONSTRUÇÃO DE MANTOS DE INVISIBILIDADE E COMO DETECTÁ-LOS.**

**Wanderley R. de J. Silva<sup>1</sup>; Felipe A. Gomes<sup>2</sup>**

1. Bolsista FAPESB, Graduando em Bacharelado em Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail:

[wanderleyr@gmail.com](mailto:wanderleyr@gmail.com)

2. Orientador, Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: [fagomes@uefs.br](mailto:fagomes@uefs.br)

**PALAVRAS-CHAVE:** Ótica de Transformação; Mantos de Invisibilidade; Efeito Aharonov-Bohm..

### **INTRODUÇÃO**

Neste trabalho nos propomos a discutir os recentes avanços no estudo de mantos de invisibilidade. Isto é, estudos em materiais que permitam a perfeita camuflagem de um objeto. A ideia de poder construir um manto de invisibilidade sempre alimentou os mais diversos contos de ficção científica. No entanto, tirar essa ideia do papel e trazer para a vida real parecia algo impossível. Até pouco tempo atrás não se conhecia nenhuma técnica ou material que nos permitisse ter tamanho controle sobre a luz. (PENDRY *et al.*, 2006).

Para conseguirmos camuflar perfeitamente um objeto precisamos buscar um material que desvie toda a luz que incide sobre ele, de forma que ela não tenha acesso ao objeto e, portanto, não interaja com o mesmo resultando em fenômenos com a reflexão e refração. Ao mesmo tempo, precisamos fazer com que a onda retorne ao meio seguindo a mesma trajetória original. Desta forma, um observador externo não conseguiria enxergar o objeto e também não conseguiria identificar qualquer alteração na trajetória da luz.

Construir esse tipo de material sempre foi um desafio devido a limitação nas propriedades óticas dos materiais que encontramos na natureza. Durante as últimas duas décadas vem se desenvolvendo uma nova classe de materiais projetados com o objetivo de transpor essas limitações; tais materiais ficaram conhecidos como metamateriais (CUI *et al.*, 2010). Para obter tais avanços, além das propriedades químicas, a engenharia molecular, é fator essencial para produzir parâmetros efetivos que não são encontrados na natureza e nos permitir ter mais controle sobre as propriedades óticas do material.

Uma técnica muito importante no estudo dos metamateriais é conhecida como ótica de transformação (LEONHARDT e PHILBIN, 2010). Tal técnica se baseia na covariância entre as equações de Maxwell no vácuo com geometria curva e num material dielétrico.

Devido a essa propriedade, podemos identificar qual geometria guiaria a luz de uma determinada forma e, a partir dessa geometria, encontramos quais deveriam ser os parâmetros (mais especificamente, a permissividade elétrica,  $\epsilon$ , e a permeabilidade magnética,  $\mu$ ) de um material que produziria o mesmo efeito.

Através da ótica de transformação podemos projetar uma geometria que conduza a luz de forma a camuflar perfeitamente um objeto e, ao mesmo tempo, projetar em laboratório um material que reproduza esse comportamento para a luz em um metamaterial (FLEURY & ALU, 2014). Várias construções experimentais do manto de invisibilidade já foram feitas em laboratório para ondas sonoras, eletromagnéticas, entre outras. (SMITH, SCHURIG e PENDRY, 2006)

Uma vez que temos a possibilidade de camuflar um objeto surge a questão: e, se quisermos detectar um manto de invisibilidade? Há a possibilidade de algumas estratégias para alcançar tal feito. Algo que talvez possa ajudar é visitar um fenômeno físico da mecânica quântica conhecido como efeito Aharonov-Bohm (efeito AB). Tal efeito tem por característica a não-localidade, isto é, efeitos do campo magnético são percebidos numa região onde ele é nulo. Apesar de estar confinado a um solenoide, o campo magnético pode ser detectado através da fase na função de onda de um feixe que contorna o solenóide (GRIFFITHS, 2011). Podemos, de certa forma, pensar no efeito AB como uma forma de localizador de campo magnético, nesse caso, Algo semelhante poderia existir no manto de invisibilidade, uma vez que a geometria poderia gerar algum efeito na polarização da luz e assim permitir a detecção do manto.

## **METODOLOGIA**

Neste trabalho de iniciação científica estudamos a técnica de ótica de transformação aplicado a construção de mantos de invisibilidade. Uma vez que as equações de Maxwell são as principais equações que descrevem o eletromagnetismo, e consequentemente a ótica, revisamos os seus fundamentos e mostramos como podemos manipulá-las para construir o que conhecemos como ótica de transformação. As equações, inicialmente, escritas em notação vetorial, serão transformadas para notação tensorial de métrica generalizadas; isso se deve ao fato de que tais leis ainda sejam válidas na sua escrita covariante. Pois, caso houvesse violação, significaria uma não possibilidade de efetuar a camuflagem desejada.

Sendo satisfeita a covariância das equações de Maxwell, em outras palavras, a evidência de igualdade das equações referidas entre um espaço curvo e vazio a um espaço plano e material, é correto afirmar que pode-se simular o comportamento de um material estudando a geometria, uma vez que nota-se a permissividade e permeabilidade estarem relacionadas a métrica de coordenada abordada.

Ao tomar dois pontos num espaço vazio e distorcê-lo virtualmente (na verdade, o espaço se manterá o mesmo), teremos a mesma resposta (resultado) de um espaço material escolhido. Exemplos de mantos de invisibilidade obtidos sob essa perspectiva são os de coordenadas curvilíneas cilíndricas e esféricas, então a análise para construção desses mantos, torna-se necessária.

Suponhamos um cilindro regular reto (poliedro convexo) bem como uma esfera e escolhido um ponto no interior central do mesmo cilindro/esfera inicial e expandir o

referido ponto (distorção virtual do espaço). Então, ao calcularmos seus parâmetros que compõem o índice de refração, respeitando a métrica das devidas coordenadas (oriundas da geometria diferencial), obtemos a informação necessária para sintetizar os mantos cilíndricos e esféricos.

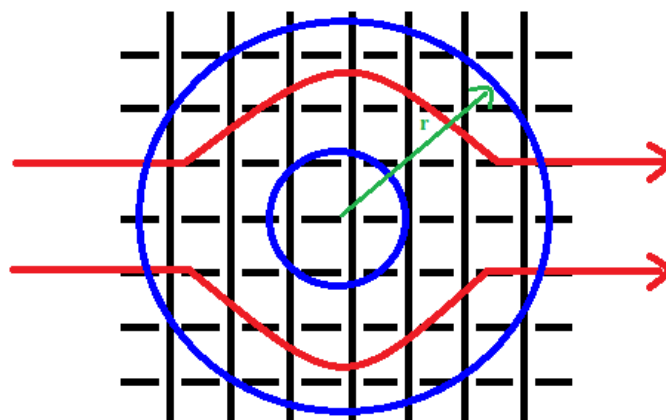
A partir daí podemos garantir: evitar a interação da luz incidente com o objeto oculto e a garantia que a luz siga o caminho normal, aquele sem a presença de manto de invisibilidade, resultados da busca de um índice de refração a partir da geometria.

No entanto, e se estivermos numa situação oposta, ou seja, como saber se estamos próximos a uma região de manto de invisibilidade? É necessário também poder detectar uma região de manto, Uma possibilidade poderia ser pensar em algo análogo ao efeito Aharonov-Bohm, uma situação que investigamos a consequência de um campo magnético nulo e potencial magnético constante numa determinada região.

A fim de analisar o efeito AB, tratamos a situação clássica do movimento de uma partícula carregada numa região de campo magnético (de um solenoide muito longo), usando um potencial generalizado na abordagem hamiltoniana. Como o efeito AB é um fenômeno quântico, reescrevemos o hamiltoniano de potencial generalizado clássico no seu equivalente quântico, de forma que a equação de Schrödinger apresenta o potencial magnético 'A' no operador hamiltoniano do estado.

## RESULTADOS

Como exposto na seção anterior, após investigar metamateriais e o manto de invisibilidade, a constatação de o manto de invisibilidade ser possível e haver mais de um tipo de fazê-lo ou abordá-lo; pudemos analisar através da ótica de transformação, como a luz se comportaria numa região de manto, a saber as regiões de um cilindro visto de cima (Figura 1); e, foi também analisado o efeito AB e suas características para poder pensar em estratégias de detecção de mantos de invisibilidade.



**Figura 1:** Esquema de feixes de luz passando numa região de manto de invisibilidade de geometria cilíndrica, onde são desviados, e seu retorno a forma como esses feixes estavam antes do manto.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante o desenvolvimento desse trabalho tivemos a oportunidade de exercitar o conhecimento da notação tensorial e geometria diferencial, das leis do eletromagnetismo, além da oportunidade e incentivo à pesquisa. Existem várias outras propostas para a construção e detecção do manto de invisibilidade. Pretendemos continuar investigando outras possibilidades em trabalhos futuros. Mais especificamente, pretendemos investigar o manto conhecido como carpete (Carpet Cloak).

## REFERÊNCIAS

- CARVALHO, Alexandre M. de M.; SÁTIRO, C.; MORAES, F. . Aharonov-Bohm-like effect for light propagating in nematics with disclinations. EPL, 2007.
- CARVALHO, Alexandre M. de M.; RIBEIRO, Carlos A. de L.; MORAES, Fernando; FURTADO, Claudio. Holonomy transformations and application in the curved structure of graphene. EPJ, 2013.
- CUI, Tie Jun; SMITH, David R.; LIU, Ruopeng . Metamaterials: Theory, Design and Applications. New York: Springer, 2010.
- FLEURY, Romain; ALU, Andrea. Cloaking and invisibility: A review. Forum for Electromagnetic Research Methods and Application Technologies (FERMAT), v. 1, ed. 9, 2014.
- GRIFFITHS, David J. Mecânica Quântica. 2ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.
- HORSLEY, S A. R. . Transformation optics, isotropic chiral media and non-Riemannian geometry. New Journal of Physics, 2011.
- LEONHARDT, Ulf; PHILBIN, Thomas. Geometry and Light: The Science of Invisibility. Mineola: Dover Publications, 2010.
- PENDRY, John B.; SCHURIG, David; SMITH, David R. Controlling Electromagnetic Fields. Science, v. 312, ed. 5781, p. 1780-1782, 2006.
- SMITH, D. R., SCHURIG, D., & PENDRY, J. B. "Experimental Verification of a Negative Index of Refraction." *Science*, 305(5685), 2006