

## REVISÃO SOBRE MONOPOLO MAGNÉTICO VIA TEORIA ELETROMAGNÉTICA

ANDREW SANTOS CORREIA<sup>1</sup>; WERNER KRAMBECK SAUTER<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas – andrewscorreia99@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas – werner.sauter@ufpel.edu.br

### 1. INTRODUÇÃO

Os monopolos magnéticos, Figura 1, são partículas, ainda não observadas, dotadas de cargas magnéticas isoladas, semelhante à sua contraparte elétrica, situando-se na intersecção da teoria eletromagnética e da física de partículas, desafiando as normas estabelecidas e mantendo a promessa de remodelar a nossa compreensão (RAJANTIE, 2012).

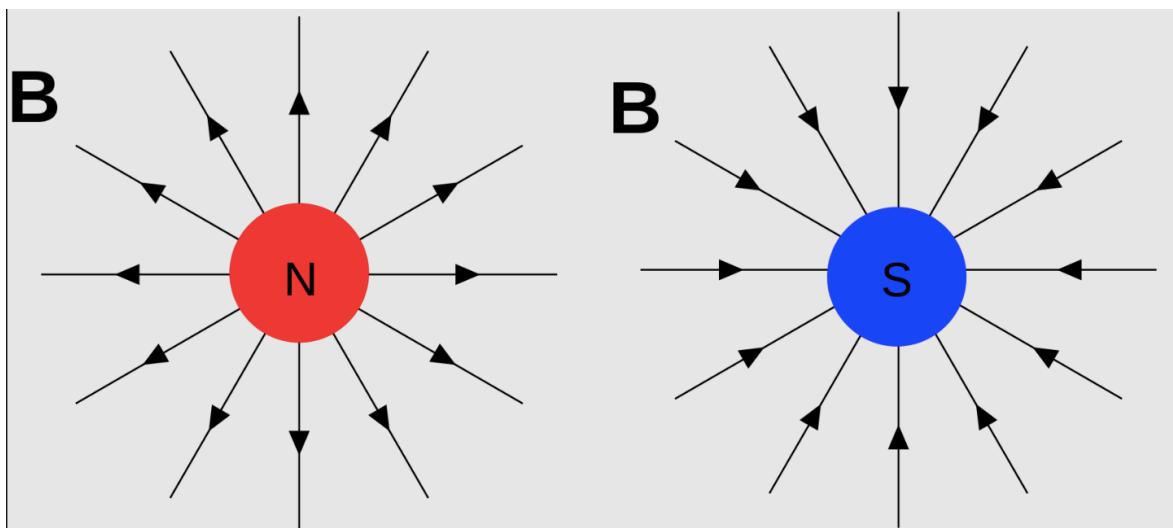


Figura 1: Representação pictórica de dois monopolos magnéticos, um polo norte (esquerda) e um polo sul (direita), acompanhados por linhas de campo magnético entrando e saindo deles, respectivamente. FONTE: MASCHEN (2012).

Segundo a teoria eletromagnética clássica, existe uma relação simétrica entre eletricidade e magnetismo (GRIFFITHS, 2014) resumidas nas equações de Maxwell:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho_e}{\epsilon_0},$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0,$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t},$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t},$$

onde  $\vec{E}$  representa o campo elétrico e  $\vec{B}$  o campo magnético, cada  $\nabla$  representa uma operação específica que é realizada no campo,  $\nabla \cdot$  para a divergência do campo, e  $\nabla \times$  representa o rotacional,  $\rho_e$  a densidade de carga elétrica,  $\vec{J}$  a densidade de corrente elétrica e as constantes universais para a permissividade e a permeabilidade do vácuo,  $\epsilon_0$  e  $\mu_0$ , respectivamente.

Acomodando monopolos elétricos que se manifestam a partir de pares de cargas positivas e negativas que podem ser separadas e isoladas (GRIFFITHS, 2014), porém, há ausência de tais características no magnetismo. Estas condições servem como terreno fértil para futuras explorações de teorias que procuram compreender a sua possível existência e a sua compatibilidade com o electromagnetismo clássico.

Muitos trabalhos teóricos abordaram o enigma dos monopolos magnéticos (RAJANTIE, 2013). Mentes visionárias, como Dirac, estabeleceram mecanismos destinados a conciliar a ausência de monopolos e a simetria subjacente às equações eletromagnéticas (DIRAC, 1931). Estes esforços teóricos não só sublinham a lógica por detrás dos monopolos magnéticos, mas também acentuam a necessidade da sua existência como uma ponte entre o domínio da física teórica e os fenómenos observados.

Além disso, esta discussão sobre os monopolos magnéticos avançou consideravelmente, graças ao surgimento de grandes teorias unificadoras, como a teoria das cordas (GAUNTLETT; HARVEY; LIU, 1993) e os resultados da colaboração MoEDAL (MAVRAMATOS; MITSOU, 2020) no Large Hadron Collider (LHC), que ampliaram as fronteiras das teorias de partículas elementares para além do Modelo Padrão (RAJANTIE, 2013). Estas teorias revitalizaram os diálogos em torno da existência plausível de monopolos magnéticos e da investigação em curso nesta área.

As potenciais ramificações da existência de monopolos magnéticos seriam profundas. Sua descoberta poderia oferecer novos insights sobre a unidade das forças fundamentais, culminando potencialmente em uma teoria unificada que abrange o electromagnetismo, a força nuclear fraca e a força nuclear forte (RAJANTIE, 2012). Além de suas implicações teóricas, a busca por monopolos magnéticos tem significado prático, abrangendo domínios desde a física de partículas de alta energia (RAJANTIE, 2012) até a cosmologia (RAJANTIE, 2013). Com a perspectiva tentadora de os monopolos magnéticos desafiarem os paradigmas estabelecidos, surge a questão central desta revisão: Se os monopolos magnéticos existem, como coexistem com a teoria electromagnética clássica?

## 2. METODOLOGIA

Este estudo começa com uma revisão abrangente da literatura dos tópicos abordadas, resumindo as principais conclusões de fontes relevantes. A seguir, explora os princípios fundamentais do electromagnetismo clássico, incluindo as equações de Maxwell e a ausência de monopolos magnéticos. O contexto histórico e os aspectos teóricos dos monopolos magnéticos são discutidos, juntamente com seu potencial impacto na teoria eletromagnética. É examinado um cenário específico que ilustra as interações com monopolos magnéticos. Por fim, é introduzido o conceito de quantização de Dirac para monopolos

magnéticos, explicando a quantização de cargas elétricas e seus aspectos matemáticos e físicos.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao longo desta revisão, exploramos os princípios básicos que sustentam o eletromagnetismo clássico. Enfatizamos as equações de Maxwell, que servem como pedra angular deste arcabouço teórico. Ao fazer isso, notamos a ausência de monopolos magnéticos no eletromagnetismo clássico. A sua ausência aprofundou a nossa compreensão dos princípios estabelecidos e levantou questões sobre a sua existência potencial e o que isso pode significar para as forças fundamentais da natureza.

Além disso, também exploramos as alterações potenciais que poderiam ocorrer nas equações de Maxwell se os monopolos magnéticos fossem introduzidos. Esta exploração ofereceu uma nova perspectiva sobre como estas entidades hipotéticas poderiam remodelar os fundamentos da teoria eletromagnética. Neste contexto, examinamos um cenário específico que ilustra como os monopolos magnéticos poderiam interagir com outras forças, permitindo-nos dissecar as forças, energia e trajetórias subjacentes.

Por último, mergulhamos na quantização de Dirac (HERAS, 2018), um conceito fundamental que oferece uma visão profunda das condições que regem a quantização de cargas elétricas. Isto deu-nos uma compreensão mais profunda dos potenciais monopolos de carga, da sua natureza quantizada e das profundas implicações que isto tem para a nossa compreensão do electromagnetismo.

### 4. CONCLUSÕES

Em conclusão, a nossa exploração dos monopolos magnéticos forneceu uma visão abrangente dos fundamentos teóricos deste conceito intrigante. Embora nos abstenhamos de apresentar resultados específicos neste espaço, é evidente que a existência potencial de monopolos magnéticos traz implicações profundas para a nossa compreensão das forças fundamentais. Esta exploração iluminou o panorama teórico, oferecendo uma nova perspectiva sobre o eletromagnetismo clássico e as possíveis modificações nas equações de Maxwell. Ao considerarmos os aspectos matemáticos e físicos da quantização de Dirac, ficamos com questões tentadoras e uma curiosidade renovada em relação aos territórios inexplorados dos monopolos magnéticos. O valor deste esforço reside na nossa maior compreensão dos fundamentos teóricos e do impacto potencial destas entidades hipotéticas no domínio da física fundamental.

Os autores, na condição de bolsistas, agradecem o **Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul - FAPERGS**.

### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DIRAC, P. A. M. **Quantised singularities in the electromagnetic field.** Proceedings of the Royal Society of London. Series A, v. 133, n. 821, p. 60–72, 1931. DOI: 10.1098/rspa.1931.0130.

GAUNTLETT, J. P.; HARVEY, J. A.; LIU, J. T. **Magnetic monopoles in string theory**. Nuclear Physics B, Elsevier, v. 409, n. 2, p. 363–381, 1993.

GRIFFITHS, D.J. **Introduction to Electrodynamics**. Pearson Education, 2014.

HERAS, R. **Dirac quantisation condition: a comprehensive review**. Contemporary Physics, Taylor & Francis, v. 59, n. 4, p. 331–355, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00107514.2018.1527974>.

MASCHEN. **EM Monopoles**. 3 set. 2012. Acessado em 14 ago. 2023. Disponível em: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2f/Em\\_monopoles.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2f/Em_monopoles.svg)

MAVRAMATOS, N. E.; MITSOU, V. A. **Magnetic monopoles revisited: Models and searches at colliders and in the cosmos**. International Journal of Modern Physics A, World Scientific, v. 35, n. 23, p. 2030012, 2020.

PRESKILL, J. **Magnetic monopoles**. Annual Review of Nuclear and Particle Science, v. 34, p. 461–530, 1984. DOI: 10.1146/annurev.ns.34.120184.002333.

RAJANTIE, A. **Introduction to magnetic monopoles**. Contemporary Physics, Taylor & Francis, v. 53, n. 3, p. 195–211, 2012. DOI: 10.1080/00107514.2012.685693.

RAJANTIE, A. **Magnetic monopoles in field theory and cosmology**. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, The Royal Society Publishing, v. 370, n. 1981, p. 5705–5717, 2013.