



REVISTA

Naval e Oceânica

<https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/rno>

## SPINTRÔNICA: UMA REVISÃO

*Spintronics: A review*

Jesebel Costa Santos<sup>a</sup>, Lucas Zampier<sup>a</sup>, Maria Eduarda Armond de Moraes Fontes<sup>a</sup>, Roger Rodrigo Goetty Teixeira<sup>a</sup>, Washington Lean Santos da Silva<sup>a</sup>, Tiago Pereira Dourado<sup>b</sup>, Erika Dias Cabral<sup>a\*</sup>

Recebido em: 10 nov. 2024 | Aceito em: 25 nov. 2024

### RESUMO

Este artigo oferece uma revisão abrangente da spintrônica, um campo de pesquisa focado na manipulação do spin dos elétrons para criar dispositivos mais eficientes e avançados. O texto destaca diversas aplicações potenciais da spintrônica, incluindo redes neurais artificiais, processamento de informações, controle de movimento e computação quântica. Este trabalho é essencial para quem deseja aprofundar seus conhecimentos sobre a teoria e as aplicações da spintrônica. Em suma, ressalta-se a importância da spintrônica no desenvolvimento contínuo de tecnologias de ponta, mais eficientes, confiáveis e robustas. No entanto, é importante observar que os pesquisadores continuam avançando nessa área, o que mantém a spintrônica em constante evolução.

**Palavras-chave:** spintrônica; manipulação de spin; computação quântica.

### ABSTRACT

This article provides a comprehensive review of spintronics, a field of research focused on manipulating electron spin to create more efficient and advanced devices. The text highlights various potential applications of spintronics, including artificial neural networks, information processing, motion control, and quantum computing. This work is essential for those who wish to deepen their understanding of the theory and applications of spintronics. In summary, the importance of spintronics in the continuous development of cutting-edge, more efficient, reliable, and robust technologies is emphasized. However, it is important to note that researchers are continually advancing in this area, which keeps spintronics in constant evolution.

**Keywords:** spintronics; spin manipulation; quantum computing.

<sup>a</sup> Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

<sup>b</sup> Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

\* Autor correspondente: erika.cabral@uerj.br



## 1 INTRODUÇÃO

Cada vez mais é evidente a urgência no desenvolvimento de tecnologias alternativas de informação, que sejam de alta velocidade e baixo consumo de energia. A Spintrônica é uma das tecnologias mais promissoras nesse campo, utilizando os spins dos elétrons como portadores de informação. Dessa forma, em comparação à eletrônica convencional, a Spintrônica adiciona um novo grau de liberdade: o spin (Žutić, 2004). Essa tecnologia oferece vantagens potenciais, como a aceleração do processamento de dados, alta densidade de integração de circuitos e baixo consumo de energia (Yang, 2016).

O spin do elétron foi descoberto na experiência de Stern-Gerlach, sendo uma propriedade quântica intrínseca do elétron, assim como sua carga (Awschalom, 2006).

A manipulação do spin dos elétrons é utilizada na spintrônica para armazenar, processar e transmitir informações. Além disso, a injeção e detecção de spin são processos-chave na spintrônica, envolvendo a introdução controlada de elétrons com spins específicos em um material e sua subsequente detecção, permitindo o desenvolvimento de dispositivos spintrônicos (Das Sarma, 2000a, 2000b, 2000c, 2001).

Outro princípio importante é a magnetorresistência (Julliere, 1975), que descreve o comportamento da resistência elétrica de um material em resposta a um campo magnético externo. Esse fenômeno é fundamental para dispositivos como sensores de leitura magnética na spintrônica. Nesse sentido, há grande interesse no estudo do Hall quântico spin-dependente em semicondutores, por exemplo, onde se investigam as propriedades de transporte desses materiais em resposta a campos externos e a altas temperaturas (Murakami et al., 2003; Sinova, 2015). Isso é de extrema importância para a compreensão e o desenvolvimento de novos dispositivos spintrônicos.

Materiais magnéticos, como ferromagnéticos, antiferromagnéticos e não magnéticos com propriedades específicas, desempenham um papel crucial no desenvolvimento de dispositivos spintrônicos. Ao explorar interações entre os spins dos elétrons, tais materiais são usados na construção de dispositivos de memória magnética e sensores na spintrônica.

Os dispositivos spintrônicos apresentam diversas vantagens sobre os dispositivos eletrônicos convencionais. Em primeiro lugar, possuem baixo consumo de energia devido à utilização da orientação do spin dos elétrons, o que reduz as perdas de energia durante o processamento de informações. Além disso, esses dispositivos têm alta velocidade de

processamento, facilitada pelo spin dos elétrons, o que possibilita a transferência e o processamento de dados de maneira mais eficiente e rápida. Eles também geram menos calor durante o funcionamento, devido à maior eficiência energética, o que contribui para mitigar problemas relacionados ao superaquecimento em dispositivos eletrônicos.

Essencialmente, o spin funciona como uma espécie de "bit quântico" que pode ser orientado para cima ou para baixo, representando estados de informação (Žutić, 2004).

Em resumo, a spintrônica representa uma abordagem inovadora na tecnologia eletrônica, aproveitando as propriedades quânticas dos elétrons para desenvolver dispositivos mais eficientes, rápidos e com maior capacidade de armazenamento em comparação com a eletrônica tradicional. Sendo assim, este trabalho busca apresentar uma revisão sobre a Spintrônica, destacando seus tópicos mais importantes.

## 2 METODOLOGIA

A simulação de Monte Carlo é uma técnica computacional poderosa e amplamente utilizada na área da Spintrônica para investigar características complexas e comportamentos estatísticos associados ao spin dos elétrons em materiais e dispositivos. Essa abordagem estocástica permite modelar e analisar sistemas spintrônicos em escalas nanométricas, considerando de forma realista as interações quânticas e térmicas (Boselli, 2003).

Nas simulações de Monte Carlo aplicadas à Spintrônica, um dos principais objetivos é entender e otimizar o desempenho de dispositivos spintrônicos em condições variadas, levando em conta fatores como temperatura, campo magnético, acoplamento spin-órbita e interações magnéticas.

A simulação começa com a definição do modelo físico do sistema, que envolve uma descrição detalhada das interações entre elétrons, a relação entre spin e órbita, as propriedades magnéticas do material e outras características específicas da Spintrônica. Em seguida, um conjunto de regras probabilísticas é usado para simular diferentes eventos que afetam o spin dos elétrons.

A interação entre spins é modelada considerando as interações de troca entre spins adjacentes nos materiais, enquanto a interação spin-órbita é incorporada para capturar os efeitos relativísticos que podem influenciar a dinâmica do spin. Caso haja um campo magnético externo, ele é incluído no modelo, afetando a orientação global dos spins.

As simulações de Monte Carlo são frequentemente aplicadas a dispositivos spintrônicos, como magnetoresistores de tunelamento e dispositivos de memória de spin, para estudar o comportamento dinâmico dos spins em diferentes condições operacionais. Isso inclui a análise de características como reversão de magnetização, efeito de tunelamento e resposta do sistema a pulsos de corrente.

Apesar de sua eficácia, esse tipo de simulação enfrenta desafios, como a necessidade de grande poder computacional para modelar sistemas realistas e o equilíbrio adequado entre precisão e tempo de simulação. No entanto, avanços contínuos na capacidade computacional e nos algoritmos de simulação estão expandindo os limites da aplicação dessa técnica, permitindo investigações mais detalhadas e precisas.

Com isso, pode-se afirmar que a simulação de Monte Carlo na Spintrônica desempenha um papel crucial na compreensão e no projeto de dispositivos que exploram o spin dos elétrons. Ao modelar o comportamento estocástico dos spins em condições realistas, essa abordagem fornece insights valiosos para pesquisadores e engenheiros, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias spintrônicas avançadas e eficientes.

### 3 RESULTADOS

Com a descoberta do grafeno, um material 2D com estrutura de rede hexagonal, novos materiais semicondutores de alta mobilidade eletrônica têm sido explorados, como o siliceno (Si), arseneno (As) e antimoneno (Sb) (Deepthi, 2014; Sun, 2016). De fato, a dopagem desses materiais com átomos de metais ou semi-metais possibilita a transformação de um semicondutor de spin não polarizado em polarizado. O arsênio (As), quando dopado com átomos de oxigênio, demonstra um aumento de 82% na taxa de evolução do hidrogênio em comparação com o material puro (Som, 2018). Quando o As é dopado com Fe, ele se comporta como um semicondutor magnético diluído.

Com a tecnologia atual de semicondutores alcançando transistores de 3 nm (Herrer, 2020), a miniaturização logo será afetada por efeitos quânticos, diminuindo a eficácia do isolamento devido ao princípio da incerteza, o que tornará esses dispositivos menos confiáveis. Nesse cenário desafiador, a eletrônica molecular surge como uma grande promessa, utilizando moléculas como unidades funcionais dentro de circuitos para controlar o movimento de cargas entre os eletrodos. As principais vantagens de utilizar moléculas nas junções incluem tamanhos

na ordem de alguns nanômetros, promovendo melhor desempenho e densidade; uma variedade de propriedades em diferentes junções moleculares; produção orgânica em larga escala de moléculas idênticas; e propriedades magnéticas que conferem controle sobre o spin.

A spintrônica oferece diversas aplicações tecnológicas, especialmente em sensores magnéticos, que já são eficientes em temperatura ambiente. Esses dispositivos aprimoraram o desempenho dos cabeçotes de leitura magnética para discos rígidos e são amplamente utilizados na indústria de armazenamento magnético. Fenômenos como a magnetorresistência gigante também têm sido amplamente empregados em tecnologias, incluindo sensores e dispositivos de armazenamento de dados. Portanto, o avanço da pesquisa em spintrônica pode beneficiar positivamente a transferência e o armazenamento de dados. Destacam-se os sensores do tipo Hall, que podem ser aplicados em vários dispositivos do cotidiano, como sensores de rotação, velocidade, corrente elétrica e em smartphones, entre outros.

A spintrônica tem impulsionado o desenvolvimento de memórias de acesso aleatório magnético (MRAM), onde uma válvula de spin pode ser utilizada como um bit magnético. Materiais spintrônicos promissores têm sido desenvolvidos, apresentando propriedades únicas e multifuncionais. O estudo desses materiais é crucial para dispositivos spintrônicos avançados. Os nanoosciladores spintrônicos também desempenham um papel importante no armazenamento de dados, especialmente na gravação magnética assistida por micro-ondas, e podem contribuir para sistemas de memória magnética de alta eficiência.

A combinação de supercondutores e dispositivos spintrônicos visa aumentar a eficiência energética em sistemas de computação, possibilitando maior velocidade de processamento e menor consumo de energia. Os nanoeletrônicos de spintrônica, em particular as junções de túnel magnético (MTJs), têm potencial para serem integrados em redes neurais, implementando sinapses e neurônios baseados na dinâmica de magnetização. Redes neuromórficas spintrônicas podem abrir caminho para sistemas de computação mais rápidos e eficientes.

Os osciladores de spin, que produzem sinais elétricos de alta frequência com base na oscilação do magnetismo, são fundamentais para dispositivos eletrônicos e de comunicação. Sincronizados, esses osciladores oferecem vantagens para a computação neuromórfica e outras aplicações, como geração de números aleatórios verdadeiros e detecção de campo magnético. A sincronização dos osciladores de spin e sua aplicação em sistemas neurais artificiais representam um avanço significativo na computação.

## 4 CONCLUSÃO

Avanços recentes na spintrônica têm possibilitado aplicações em computação quântica, como a lógica de spin de baixa potência e a integração de memória não volátil com lógica. Heteroestruturas bidimensionais exploram propriedades magnéticas únicas que podem ser úteis no desenvolvimento de dispositivos quânticos. Além disso, há um interesse crescente na criação e manipulação de quasipartículas Majorana, com o objetivo de implementar computação quântica tolerante a falhas.

Em resumo, o campo da spintrônica representa uma fronteira fascinante e promissora na pesquisa e no desenvolvimento de dispositivos eletrônicos. Ao explorar as propriedades de spin dos elétrons, a spintrônica ultrapassa as limitações da eletrônica convencional, abrindo caminho para inovações significativas em termos de eficiência, velocidade e capacidade de armazenamento de informações.

A capacidade de manipular o spin eletrônico não apenas oferece novas possibilidades para dispositivos de armazenamento magnético mais eficientes, mas também promete revolucionar a computação quântica e a comunicação de dados. A pesquisa contínua na spintrônica busca superar desafios técnicos e explorar aplicações práticas em diversas áreas, desde a eletrônica de consumo até a computação de alta performance.

À medida que os cientistas desvendam mais segredos sobre as propriedades do spin, a spintrônica está destinada a desempenhar um papel fundamental na próxima geração de tecnologias eletrônicas. Sua capacidade de se integrar a abordagens convencionais e abrir novos horizontes tecnológicos sugere que a spintrônica não é apenas uma evolução, mas uma revolução na forma como concebemos e utilizamos dispositivos eletrônicos. Este é um capítulo emocionante na história da eletrônica, e o potencial da spintrônica está apenas começando a ser plenamente explorado.

## REFERÊNCIAS

- Boselli, M. A., Lima, I. C. C., & Ghazali, A. (2003). Bilayers via the Spin-polarized Inhomogeneous Hole Gas: Monte Carlo simulation. *Journal Name*, Volume(Issue), Page Range.
- Das Sarma, S., Fabian, J., Hu, X., & Žutić, I. (2000a). Issues, concepts, and challenges in spintronics. *58th DRC (Device Research Conference) Conference Digest* (IEEE, Piscataway), 95–98. <https://doi.org/cond-mat/0006369>

- Das Sarma, S., Fabian, J., Hu, X., & Žutić, I. (2000b). Spintronics: Electron spin coherence, entanglement, and transport. *Superlattices and Microstructures*, 27(3), 289–295. <https://doi.org/10.1006/spmi.2000.0883>
- Das Sarma, S., Fabian, J., Hu, X., & Žutić, I. (2000c). Theoretical perspectives on spintronics and spin-polarized transport. *IEEE Transactions on Magnetics*, 36(8), 2821–2826. <https://doi.org/10.1109/20.859039>
- Das Sarma, S., Fabian, J., Hu, X., & Žutić, I. (2001). Spin electronics and spin computation. *Solid State Communications*, 119(5), 207–215. [https://doi.org/10.1016/S0038-1098\(01\)00353-0](https://doi.org/10.1016/S0038-1098(01)00353-0)
- Deepthi, J., & Ayan, D. (2014). Structures and chemical properties of silicene: Unlike graphene. *Accounts of Chemical Research*, 47(3), 593–602. <https://doi.org/10.1021/ar4002322>
- Herrer, L., Martín, S., & Cea, P. (2020). Nanofabrication techniques in large-area molecular electronic devices. *Applied Sciences*, 10(18), 6064. <https://doi.org/10.3390/app10186064>
- Julliere, M. (1975). Tunneling between ferromagnetic films. *Physics Letters*, 54A(3), 225–226. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(75\)90174-6](https://doi.org/10.1016/0375-9601(75)90174-6)
- Li, X., & Yang, J. (2016). First-principles design of spintronics materials. *National Science Review*, 3(3), 345–358. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwv139>
- Murakami, S., Nagaosa, N., & Zhang, S. C. (2003). Dissipationless quantum spin current at room temperature. *Science*, 301(5638), 1348–1351. <https://doi.org/10.1126/science.1087260>
- Sinova, J., Valenzuela, S. O., Wunderlich, J., Back, C. H., & Jungwirth, T. (2015). Spin Hall effects. *Reviews of Modern Physics*, 87(4), 1213–1239. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.87.1213>
- Som, N. N., Mankad, V., & Jha, P. K. (2018). Hydrogen evolution reaction: The role of arsenene nanosheet and dopant. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(37), 21634–21641. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.148>
- Sun, M., Wang, S., Du, Y., Yu, J., & Tang, W. (2016). Transition metal doped arsenene: A first-principles study. *Applied Surface Science*, 389, 594–600. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.07.103>
- Wolf, S. A., Awschalom, D. D., Buhrman, R. A., Daughton, J. M., Von Molnár, S., Roukes, M. L., Chtchelkanova, A. Y., & Treger, D. M. (2001). Spintronics: A spin-based electronics vision for the future. *Science*, 294(5546), 5546–5550. <https://doi.org/10.1126/science.1065389>
- Wolf, S. A., Chtchelkanova, A. Y., & Treger, D. (2016). Spintronics – A retrospective and perspective. *IBM Journal of Research and Development*, 50(1), 1–8. <https://doi.org/10.1147/rd.501.0001>

Žutić, I., Fabian, J., & Das Sarma, S. (2004). Spintronics: Fundamentals and applications. *Reviews of Modern Physics*, 76(2), 323–410. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.76.323>