

# Análise de Estados Quânticos em Sistemas de Spin: Modelagem de Qubit Aplicado como Sensor de Rotação

Tarcio F. Furtado<sup>1</sup>, Rodrigo Y. Oeiras<sup>1,2</sup>,  
Fernando M. Araújo-Moreira<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Militar de Engenharia (IME)  
Seção de Engenharia Nuclear. Rio de Janeiro – RJ – Brasil

<sup>2</sup> Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD)  
Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia (FACET) – Dourados – MS – Brasil

{rodrigo.yoshikawa, fernando.manuel}@ime.eb.br

rodrigooeiras@ufgd.edu.br, tarciofla@hotmail.com

**Abstract.** *This work presents the computational modeling and simulation of a quantum rotation sensor based on nitrogen-vacancy (NV) centers in diamond. Using the QuTiP (Quantum Toolbox in Python) framework, a system of coupled electronic and nuclear ( $^{14}\text{N}, I=1$ ) spins was implemented and subjected to a Ramsey interferometry protocol. The system dynamics were described by a Hamiltonian incorporating zero-field splitting, Zeeman terms, and hyperfine coupling. Rotation sensitivity was modeled by including the spin-rotation coupling Hamiltonian (Mashhoon) during the free evolution time. The simulations demonstrate that rotations shift the system's quantum state (phase), resulting in measurable variations in nuclear spin state populations. These results validate the control protocol and the model's viability as a predictive tool for the development of quantum rotation detectors.*

**Keywords:** *NV centers, qubit, Quantum sensing, QuTiP, Ramsey interferometry, Nuclear spins.*

**Resumo.** *Este trabalho apresenta a modelagem e simulação computacional de um sensor quântico de rotação baseado em centros de vacância de nitrogênio (NV) em diamante. Utilizando o framework QuTiP (Quantum Toolbox in Python), foi implementado um sistema de spins eletrônico e nuclear ( $^{14}\text{N}, I = 1$ ) acoplados, submetido a um protocolo de interferometria de Ramsey. A dinâmica do sistema foi descrita por um Hamiltoniano que incorpora interações de desdobramento em campo zero, termos Zeeman e acoplamento hiperfino. A ação da rotação foi modelada através da inclusão de um termo de acoplamento spin-rotação (Mashhoon) durante o tempo de evolução livre. As simulações demonstram que as rotações mudam o estado quântico do sistema (fase) resultando em variações mensuráveis nas populações dos estados de spin nuclear, validando o protocolo de controle e a viabilidade do modelo como ferramenta preditiva para o desenvolvimento de detectores quânticos de rotação.*

**Palavras-chave:** *Centros NV, qubit, Sensoriamento Quântico, QuTiP, Interferometria de Ramsey, Spins Nucleares.*

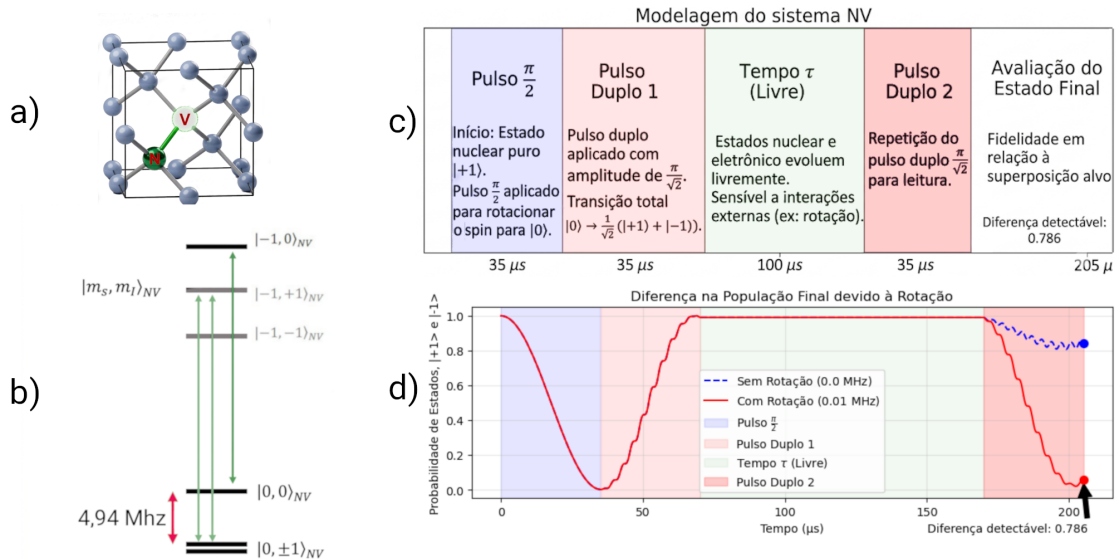
## 1. Introdução

O sensoriamento quântico utiliza fenômenos como superposição e emaranhamento para medir grandezas físicas com precisão superior a dos sistemas clássicos [Degen et al. 2017]. Dentre as plataformas promissoras, os centros de vacância de nitrogênio (NV) em diamante (um promissor qubit) destacam-se como defeitos cristalográficos estáveis para a detecção de campos magnéticos e rotações [Li et al. 2025, Bürgler et al. 2023]. Diferentemente de sensores clássicos de alta precisão baseados em fibra óptica ou sistemas microeletromecânicos, os sensores baseados em NV oferecem a vantagem de operar em temperatura ambiente, no estado sólido e sem partes móveis, facilitando a miniaturização e a integração.

A principal contribuição deste trabalho é apresentar um estudo de caso estruturado utilizando o QuTiP [Lambert et al. 2026] para modelar e simular a dinâmica de transição de estados em NV via pulsos de radiofrequência duplos ( $\pi/\sqrt{2}$ ), que contrasta com o uso padrão de pulso único [Jarmola et al. 2021]. Este modelo serve como um *framework* in silico inicial para a futura parametrização de giroscópios quânticos de estado sólido antes de implementação em bancada óptica.

## 2. A Modelagem e a Simulação do Sensor

A simulação da evolução temporal de um estado quântico representativo do material diamante NV, veja a Figura 1(a), deve considerar a construção de um Hamiltoniano [Breitweiser et al. 2024, Danner et al. 2020] (próxima seção). Os experimentos usam técnicas de espectroscopia [Ramsey 1950] para fazer a evolução temporal do estado do sistema de forma bastante controlada, usando pulsos de campo magnético gerados na frequência de RF (radiofrequência). Esse controle permite a detecção de movimento de rotação em um material de centros NV em diamante.



**Figura 1. a) Estrutura do centro NV em diamante. b) Os níveis de energia correspondentes ao NV. c) Estrutura da simulação. d) Gráfico da diferença de população dos estados finais com e sem rotação.**

A Figura 1 (b) mostra os níveis de energia neste sistema e os estados correspondentes. Note que os estados dependem do spin dos elétrons ( $m_s$ ) e do spin dos núcleos ( $m_I$ ). Esta representação é necessária, pois há um acoplamento entre os elétrons e o núcleo

de  $^{14}\text{N}$  [Kavtanyuk et al. 2022], influenciando a interação com o campo magnético. Note que os estados  $|0, 0\rangle$  e  $|0, \pm 1\rangle$  estão próximos em energia. Um laser no espectro do verde (515 ou 532 nm) excita os elétrons para os estados  $|-1, 0\rangle$  e  $|-1, \pm 1\rangle$ , mais energéticos, indicando que haverá uma emissão de fótons quando os elétrons voltarem para o estado de menor energia do sistema. Uma parte da energia é perdida para a rede na forma de vibrações, por isso, é emitida uma radiação no espectro do vermelho (650 a 800 nm). A detecção depende de como os estados  $|0, 0\rangle$  e  $|0, \pm 1\rangle$  estão ocupados, evidenciando nosso interesse na simulação das ocupações destes estados.

O sistema é iniciado em um estado nuclear  $|+1\rangle$  e pela ação de um campo magnético senoidal (pulso  $\pi/\sqrt{2}$ ) com frequência  $Q$  (interação de quadrupolo) com efeitos de acoplamento hiperfino e efeito Zeeman  $f_{DQ}$ , o que leva o sistema a mudar para um estado composto puramente de  $|0\rangle$ . Um pulso RF duplo (pulso  $\pi/\sqrt{2}$  representado como a soma de duas senoides de frequências  $Q - f_{DQ}$  e  $Q + f_{DQ}$ ) é simulado para levar o estado do sistema a uma superposição dos estados  $|+1\rangle$  e  $|-1\rangle$  (apresentam igual probabilidade). Após um tempo ( $\tau$ ) sem interações, se não há nenhuma perturbação, espera-se que o estado mantenha-se inalterado. Um segundo pulso RF duplo é aplicado ao sistema e notamos uma alteração nos estados. O estado  $|0\rangle$  apresenta uma população de 0, 2, levando a uma redução da população dos estados  $|+1\rangle$  e  $|-1\rangle$  para 0, 8. O fluxo de execução pode ser apreciado segundo o esquema da Figura 1(c).

A rotação foi incluída como elemento perturbativo do estado de superposição de  $|+1\rangle$  e  $|-1\rangle$ , sendo aplicado durante o tempo  $\tau$ . O termo Hamiltoniano:  $-\Omega_{\text{rotação}} I_z$  [Danner et al. 2020]. O gráfico apresentado na Figura 1(d) ilustra a população dos estados  $|+1\rangle$  e  $|-1\rangle$  após aplicação do segundo pulso, evidenciando um decréscimo expressivo das populações indicando que o modelo de rotações empregado afeta os estados de forma consistente com experimentos e outros trabalhos [Jarmola et al. 2021, Kavtanyuk et al. 2022].

### 3. Os Fundamentos Teóricos da Modelagem

A dinâmica do sistema foi modelada por um Hamiltoniano global que incorpora o desdobramento em campo zero ( $D$ ), a interação Zeeman eletrônica, o acoplamento hiperfino ( $A$ ) e o termo de interação spin-rotação de Mashhoon. Por se tratar de um estudo de caso computacional, a implementação detalhada das matrizes de spin e a evolução temporal via QuTiP estão documentadas e disponíveis para reprodução no repositório do projeto <sup>1</sup>.

### 4. Conclusão

A modelagem realizada evidencia o uso de centros NV como sistemas que guardam uma informação em um sistema de dois níveis (um *qubit*), onde o controle preciso é essencial não apenas para o sensoriamento, mas também para a implementação de dispositivos de armazenamento (registradores quânticos). Embora o modelo atual assuma uma evolução coerente ideal durante o tempo  $\tau$ , reconhece-se que cenários práticos impõem limitações rigorosas. A presença de ruído magnético (como o banho de spins) e flutuações de temperatura causam decoerência ( $T_2^*$ ), relatada em trabalho experimentais em torno de

<sup>1</sup>Repositório do GitHub: <https://github.com/ryo-comp/nv-center-rotation-sensor>

2 ms [Jarmola et al. 2021], fatores que degradarão a fidelidade das populações finais detectadas na leitura.

Como perspectiva futura, pretende-se investigar a caracterização experimental do ruído magnético efetivo que atua no sistema, com o objetivo de desenvolver um modelo dinâmico mais fiel à realidade experimental. A partir de medidas sob diferentes sequências de pulsos RF, espera-se inferir parâmetros relevantes do banho de spins, como escalas de acoplamento e tempos de correlação, permitindo descrever de forma mais precisa a evolução temporal do spin de  $^{14}\text{N}$  e os mecanismos de descoerência ainda presentes. Essa abordagem poderá contribuir para a otimização dos protocolos de controle e para o aprimoramento da sensibilidade do dispositivo.

## 5. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro fornecido pela FINEP por meio do projeto N° 3310/24 – QUANTUM II (Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologias Quânticas para Segurança e Defesa Nacional)

## Referências

- Breitweiser, S. A., Ouellet, M., Huang, T.-Y., Taminiiau, T. H., and Bassett, L. C. (2024). Quadrupolar resonance spectroscopy of individual nuclei using a room-temperature quantum sensor. *Nano Letters*, 24(51):16253–16260.
- Bürgler, B., Sjolander, T. F., Brinza, O., Tallaire, A., Achard, J., and Maletinsky, P. (2023). All-optical nuclear quantum sensing using nitrogen-vacancy centers in diamond. *npj Quantum Information*, 9(1).
- Danner, A., Demirel, B., Kersten, W., Lemmel, H., Wagner, R., Sponar, S., and Hasegawa, Y. (2020). Spin-rotation coupling observed in neutron interferometry. *npj Quantum Information*, 6(1):23.
- Degen, C. L., Reinhard, F., and Cappellaro, P. (2017). Quantum sensing. *Rev. Mod. Phys.*, 89:035002.
- Jarmola, A., Lourette, S., Acosta, V. M., Birdwell, A. G., Blümler, P., Budker, D., Ivanov, T., and Malinovsky, V. S. (2021). Demonstration of diamond nuclear spin gyroscope. *Science Advances*, 7(43):eabl3840.
- Kavtanyuk, V. V., Lee, H. J., Oh, S., Jeong, K., and Shim, J. H. (2022). Optical dynamic nuclear polarization of  $^{13}\text{C}$  spins in diamond at a low field with multi-tone microwave irradiation. *Molecules*, 27(5).
- Lambert, N., Giguère, E., Menczel, P., Li, B., Hopf, P., Suárez, G., Gali, M., Lishman, J., Gadhvi, R., Agarwal, R., Galicia, A., Shammah, N., Nation, P., Johansson, J. R., Ahmed, S., Cross, S., Pitchford, A., and Nori, F. (2026). Qutip 5: The quantum toolbox in Python. *Physics Reports*, 1153:1–62.
- Li, Y., Li, H., Yi, T., Li, C., and Wei, J. (2025). A review of the study of diamond nv color centers: fabrication, application and challenge. *Functional Diamond*, 5(1):2567286.
- Ramsey, N. F. (1950). A molecular beam resonance method with separated oscillating fields. *Physical Review*, 78:695–699.