



# ESTUDO DA INTERAÇÃO LUZ MATÉRIA UTILIZANDO CAVIDADES SUPERCONDUTORAS E MOMENTOS MAGNÉTICOS

**Palavras-Chave:** Eletrodinâmica Quântica, Informação e Computação Quântica, Circuitos Supercondutores

**Autores/as:**

**GIOVANNI GIROTTI RIBEIRO [IFGW - UNICAMP]**

**Prof. Dr. FRANCISCO ROUXINOL (orientador) [IFGW - UNICAMP]**

---

## INTRODUÇÃO:

Neste projeto de iniciação científica fizemos um estudo da Eletrônica Quântica de Circuitos através da análise de um sistema híbrido composto de uma cavidade de micro-ondas supercondutora e um nano fita ferromagnética.

## METODOLOGIA:

A fim de compreender o comportamento do sistema proposto, foi inicialmente estudado em detalhes cada um de seus elementos, para enfim tratar da interação entre estes, a qual foi simulada computacionalmente.

**CAVIDADES SUPERCONDUTORAS:** A primeira etapa do projeto consistiu em desenvolver os cálculos necessários para, a partir das Equações de Maxwell, caracterizar o campo eletromagnético no interior de cavidades condutoras. Utilizando de uma abordagem semi-clássica, foi inicialmente obtida a quantização do campo que, a partir deste momento, por uma analogia entre os Hamiltonianos dos dois sistemas, passou utilizar o mesmo formalismo quântico que descreve osciladores harmônicos, aproveitando recursos que foram desenvolvidos ao longo das disciplinas de graduação.

**MOMENTO MAGNÉTICO:** Em seguida, buscou-se compreender e descrever o momento magnético de materiais ferromagnéticos. Passando pelas principais classes de materiais referentes a suas respostas a um campo magnético externo, foram priorizados os ferromagnetos por estes comporem nosso sistema de interesse. Nestes materiais os átomos possuem momento magnético permanente que, devido a sua estrutura cristalina, podem se manter alinhados, gerando momento magnético não nulo até mesmo na ausência de campo magnético externo, desde que em condições adequadas. Em específico, o projeto utiliza de amostras na escala nanométrica, de forma que só é possível existir um domínio magnético e, portanto, este não depende da existência de campo

externo para manter sua magnetização desde que esteja abaixo de uma temperatura crítica chamada de temperatura de Currie. Dessa forma, utilizando os resultados conhecidos de mecânica quântica, tal momento magnético pode ser descrito da mesma forma que o momento de spin de um elétron, por exemplo, constituindo um sistema de dois níveis que pode ser utilizado como unidade armazenamento de informação quântica (qubit).

**O MODELO DE JAYNES-CUMMINGS:** Uma vez modelados cada um dos elementos relevantes para o sistema estudado, chegou a hora de tratar sua interação. O sistema híbrido composto do campo no interior da cavidade, o qubit e sua interação é descrito pelo Hamiltoniano de Rabi, o qual é simplificado para o Hamiltoniano de Jaynes-Cummings ao tomar a “aproximação de onda girante” (chamada de RWA), a qual descarta os termos atribuídos à/diminuição/aumento simultânea/o do nível de energia dos dois elementos. O Hamiltoniano de Jaynes-Cummings assume a forma:

$$H = \omega_c \left( a^\dagger a + \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{2} \omega_q \sigma_z - g (a^\dagger \sigma_- + a \sigma_+)$$

Onde  $\omega_c$  e  $\omega_q$  representam as frequências associadas à cavidade e ao qubit,  $a$  e  $a^\dagger$  os operadores de aniquilação e criação de fótons na cavidade,  $\sigma_z$  é associado ao momento magnético da cavidade no eixo de interesse,  $\sigma_-$  e  $\sigma_+$  são responsáveis por diminuir ou aumentar o nível energético de tal qubit e o parâmetro  $g$  representa a força do acoplamento entre os dois elementos, respectivamente.

**SIMULAÇÃO:** Uma vez obtido o Hamiltoniano de Jaynes-Cummings, se tornou possível simular o sistema utilizando a biblioteca “QuTiP”, disponível para a linguagem de programação “Python”.

A princípio, o projeto almejava construir o sistema e realizar em laboratório o mesmo conjunto de medidas que foi simulado, mas dada a impossibilidade e frequentar as dependências da universidade devido à pandemia de COVID-19, foi necessário adiar tal desenvolvimento.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO:**

**EVOLUÇÃO TEMPORAL DO SISTEMA:** Estabelecido o Hamiltoniano que descreve o sistema, passa a ser possível através da Equação Mestra de Lindblad descrever a dinâmica do estado do mesmo. Na Figura 1 é possível observar o a probabilidade de ocupação de cada um dos sistemas partindo de um estado inicial em que a cavidade possui um fóton enquanto o qubit está em seu estado de menor energia, com ambos em ressonância. Já na figura 2, foi adicionada a possibilidade de a energia associada ao sistema ser dissipada através do relaxamento de uma das componentes, cada uma com probabilidade distinta de isso ocorrer; considerando o desenvolvimento futuro desse sistema, os parâmetros relacionados à dissipação são importantes para uma descrição mais acurada da situação física real.

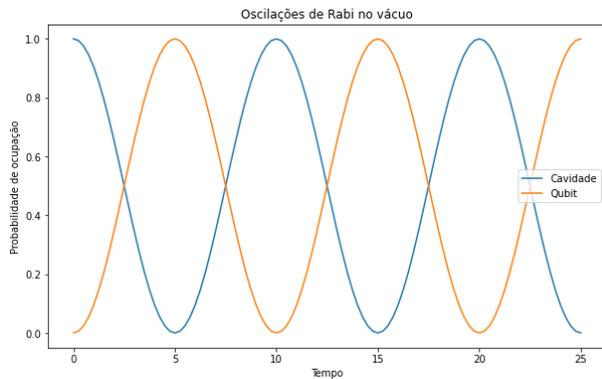


Figura 1 - Dinâmica na ausência de dissipação

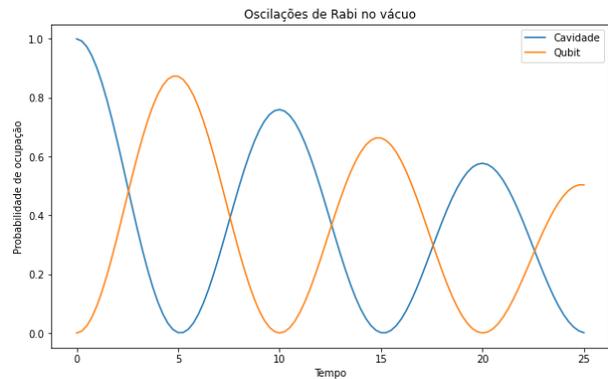


Figura 2 - Dinâmica na presença de dissipação

**ESPECTROS ASSOCIADOS À CAVIDADE E AO QUBIT:** Outra possibilidade é observar o comportamento do sistema no regime chamado dispersivo, onde as componentes estão longe de estar em ressonância, ou seja  $\Delta \gg g$ , com  $\Delta = \omega_c - \omega_q$ . Nesse cenário, o Hamiltoniano pode ser escrito de outra forma, o que permite observar os efeitos mostrados nas Figuras 3 e 4.

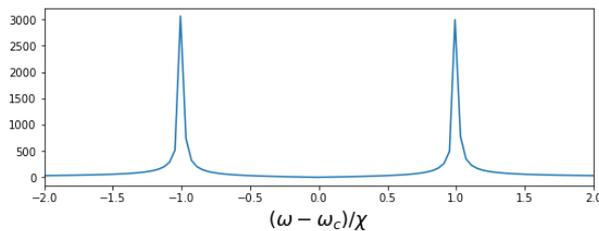


Figura 3 - Espectro da cavidade

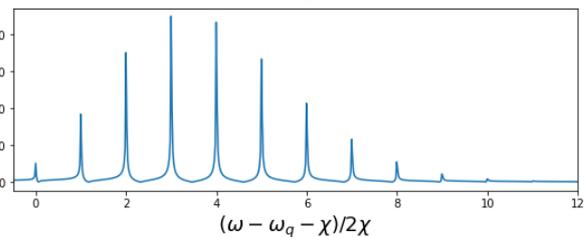


Figura 4 - Espectro do qubit

Onde  $\chi = g^2 / \Delta$ . Ao observar tais espectros, surge um fato muito interessante, e bastante relacionado com a aplicabilidade deste sistema híbrido para armazenamento de informação: o fato de que, ao medir o espectro da cavidade, obtêm-se informação a respeito do estado do qubit e vice-versa.

**PROBABILIDADE DE OCUPAÇÃO:** Um último exemplo de resultado obtido a partir destas simulações é a comparação entre o modelo de Jaynes-Cummings e de Rabi, sendo o segundo mais exato, no caso de acoplamento ultra-forte, ou seja, quando o parâmetro  $g$  é muito maior que as outras escalas de energia do sistema. O caso em que é tomada a RWA, ou seja, o modelo de JC, é exposto na Figura 5, enquanto o resultado mais detalhado é mostrado na Figura 6.

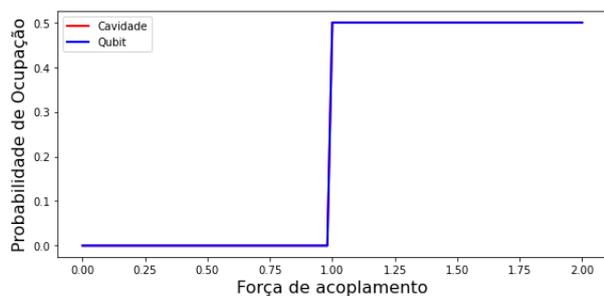


Figura 5 - Probabilidades de ocupação no regime ultra-forte JC

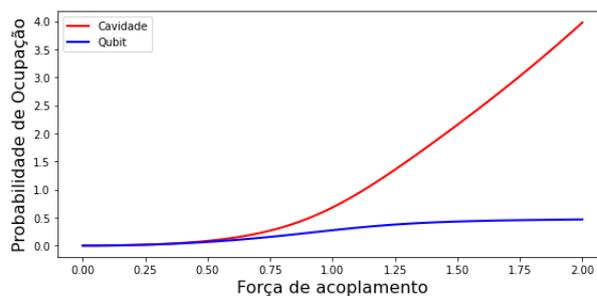


Figura 6 Probabilidades de ocupação no regime ultra-forte Rabi

## CONCLUSÕES:

Como proposto inicialmente, através deste projeto de iniciação científica PIBIC o aluno foi capaz de aprofundar seus conhecimentos em áreas centrais da física, como mecânica quântica, eletromagnetismo e física do estado sólido, o habilitando a participar de projetos mais avançados em tais áreas. Apesar da impossibilidade de realizar a parte experimental do projeto, o desenvolvimento de aluno tanto teórico quanto em realizar simulações computacionais de modelos físicos foram bastante proveitosos.

## BIBLIOGRAFIA

1. NAGHILOO, M. **Introduction to Experimental Quantum Measurement with Superconducting Qubits**. 2019.
2. GRIFFITHS, D. J. & INGLEFIELD, C. **Introduction to Electrodynamics**. American Journal of Physics. 2005.
3. FEYNMANN, R. P. **The Feynmann lectures on physics: commemorative issue**. 1990.
4. JOHANSON, J. R. **QuTiP Lectures**. Disponível em: < <https://github.com/irjohansson/qutip-lectures>>. Acesso em: 24 de ago. de 2021.