



Estudo de transformadores de impedância para cavidades CPW para aplicações em Eletrodinâmica Quântica de Circuitos e Computação Quântica

Gabriel Silva Vieira de Melo *, Prof Dr. Francisco Rouxinol (Orientador)[†]

[†] Departamento de Física da Matéria Condensada (DFMC), Instituto de Física Gleb Wataghin (IFGW)

* Faculdade de Eng. Elétrica e de Computação (FEEC),

Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)

Campinas, Brasil

Palavras-chave—Eletrodinâmica Quântica, Informação e Computação Quântica, Circuitos Supercondutores, Simulações Eletromagnéticas

I. INTRODUÇÃO

A computação quântica se baseia em utilizar os estados quânticos de um sistema sujeito às leis que governam o regime quântico para representar e processar informação. Assim como no computador clássico, a informação quântica é representada por um sistema de dois níveis: o *qubit*. O *qubit* apresenta o estado $|1\rangle$ e o estado $|0\rangle$, com cada estado associado a seu respectivo nível de energia [1]. A principal diferença entre o bit quântico e o clássico é que a unidade lógica da computação quântica permite a superposição de seus estados e o emaranhamento de diferentes qubits. Tal fato também é o principal atributo da computação quântica, levando a um grande poder de processamento de informação [1].

Uma das principais abordagens para se desenvolver um bit quântico utiliza as propriedades das junções de Josephson [2]. Essa abordagem facilita a implementação, pois os circuitos podem ser projetados utilizando técnicas de eletromagnetismo e os mesmos processos de fabricação da microeletrônica. Porém, para que os efeitos quânticos desejados se manifestem são necessários algumas características importantes: isolamento do ambiente, baixas temperaturas ($20mK$) e baixa dissipação de energia.

A medição e controle desses sistemas é de extrema importância para o desenvolvimento de computação e processamento de informação, portanto é fundamental criar instrumentos que realizem medições com a maior eficiência possível [3]. Vale ressaltar que sistemas quânticos são muito sensíveis e a simples interação de medição do sistema pode destruir estados quânticos, levando, no âmbito da computação quântica,

a perda de informação. Com isso, o objetivo deste projeto de iniciação científica é estudar e desenvolver um balun (*balanced to unbalanced*) do tipo Marchand com o intuito de facilitar a medição de sistemas quânticos.

II. DESENVOLVIMENTO

A. Oscilador Harmônico Quântico

Para se obter um sistema quântico de dois níveis, é necessário compreender o comportamento dos níveis de energia do oscilador harmônico quântico. Para tal, podemos utilizar o Hamiltoniano:

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2m} + \frac{1}{2}k\hat{x}^2 = \frac{\hat{p}^2}{2m} + \frac{1}{2}m\omega^2\hat{x}^2, \quad (1)$$

onde \hat{p} é o operador de momento e \hat{x} o operador de posição.

Assim, resolvendo a equação de Schrödinger independente do tempo, obtém-se a energia associada a cada autoestado do sistema, dado pela Equação 2.

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar\omega \quad (2)$$

Portanto, analisando-se os níveis de energia, nota-se que a quantidade de energia para fazer a transição entre dois autoestados é um valor constante. Tal fato já era esperado para qualquer sistema harmônico e, também, torna inviável a utilização de um sistema como esse para o processamento de informação. Como o espaçamento de energia entre os estados é constante, torna-se impossível selecionar dois autoestados bem definidos para corresponderem ao nível $|1\rangle$ e $|0\rangle$, o subespaço computacional do sistema. Então, para a confecção de um *qubit* é necessário um oscilador anarmônico, ou seja, uma não linearidade para o sistema [4]

B. Qubit supercondutor

Para temperaturas muito baixas, os elétrons condensam em pares, denominados pares de Cooper [5], e levam ao aparecimento da supercondutividade. Circuitos elétricos sujeitos a este regime apresentam comportamentos que são governados pelas leis da mecânica quântica. O circuito ressonador LC, pode ser dado pelo seguinte Hamiltoniano:

$$\hat{H} = \frac{\hat{Q}^2}{2C} + \frac{\hat{\Phi}^2}{2L} = \hbar\omega \left(\hat{a}^\dagger \hat{a} + \frac{1}{2} \right) \quad (3)$$

onde $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Como era esperado, ao utilizar esse operador de energia na equação de Schrödinger, obtém-se também a Equação 2, que descreve os níveis de energia do oscilador harmônico. Portanto, é necessário inserir um elemento que traga a não linearidade para o sistema e, com isso, seja possível ter transições energéticas com valores distintos. Para tal, insere-se ao sistema uma junção de Josephson, um circuito que possui dois supercondutores acoplados por um elo isolante fraco. Esse tipo de circuito apresenta um comportamento de indutor não-linear e a energia por ele armazenada é dada por:

$$E(\Phi) = -\frac{\phi_0^2}{L_J} \cos\left(\frac{\Phi}{\phi_0}\right) \quad (4)$$

na qual $\phi_0 = \frac{\hbar}{2e}$ e L_J é a indutância de Josephson.

Sem perdas de generalidades, utilizando uma junção de Josephson com um indutor não linear, por exemplo, pode-se mostrar que as não linearidades desejadas aparecem no sistema. O operador Hamiltoniano (Equação 5) do sistema presente na Figura 1 ilustra melhor esses efeitos.

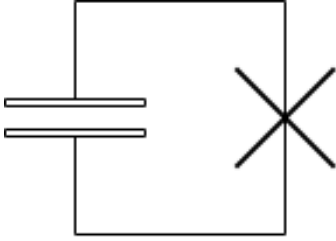


Figura 1. Circuito elétrico com um capacitor e uma junção de Josephson.

$$\hat{H} = \frac{\hat{Q}^2}{2C} - \frac{\phi_0^2}{L_J} \cos\left(\frac{\hat{\Phi}}{\phi_0}\right) \approx \frac{\hat{Q}^2}{2C} + \frac{\hat{\Phi}^2}{2L_J} - \frac{\phi_0^2}{L_J 4!} \left(\frac{\hat{\Phi}}{\phi_0}\right)^4 \quad (5)$$

A partir da aproximação feita por série de Taylor na Equação 5, nota-se que o resultado obtido é um sistema de um oscilador harmônico com o acréscimo de um termo de quarta ordem. A utilização de circuitos contendo as junções de Josephson permite que sejam projetados sistemas com transições energéticas diferentes entre os níveis de autoestados. Com isso, é possível selecionar dois estados para representarem o subespaço de informação. Ressalta-se que, assim como os átomos também possuem um poço de potencial com valores distintos entre as transições energéticas, dispositivos supercondutores como os estudados neste projeto podem ser referidos como átomos artificiais.

C. Balun

As junções de Josephson apresentam impedâncias da ordem de poucos Ohms [6]. Contudo, as cavidades responsáveis por transportar os sinais até esses sistemas apresentam impedância da ordem de 50 Ω . Assim, a realização de um casamento de impedância, garantindo a maior taxa de transferência de potência, é fundamental para o bom funcionamento de circuitos de computação quântica.

Com isso, pode-se utilizar um balun (*balanced to unbalanced*) para realizar o acoplamento entre os sistemas quânticos, por exemplo, o *qubit*, e a cavidade responsável por coletar e mandar informação do mesmo. O balun consiste em um dispositivo que converte um sinal desbalanceado em um sinal balanceado [7]. Além disso, no domínio da radiofrequência, circuitos como o balun são de extrema importância para a realização de casamento de impedância [8]. Um modelo simples de balun pode ser encontrado na Figura 2.

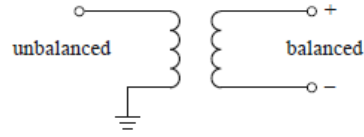


Figura 2. Modelo de balun com um transformador [7].

Para este trabalho, estudou-se o balun do tipo Marchand [9], muito utilizado na indústria de micro-ondas.

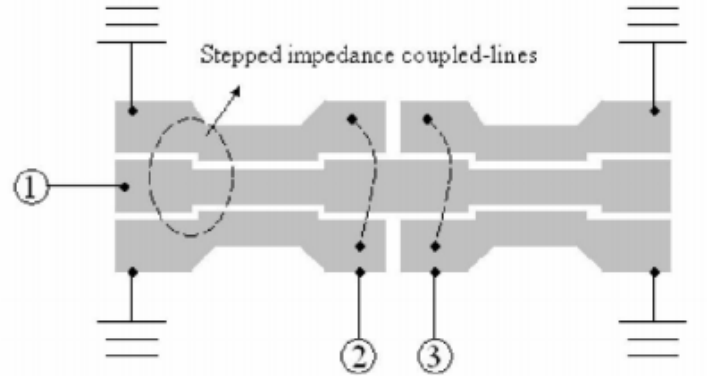


Figura 3. Modelo de balun do tipo Marchand CPW [10].

Com ajuda desse tipo de tecnologia seria possível acoplar sistemas quânticos no terminal balanceado (porta 2 e 3 da Figura 3) e realizar medições desses sistemas no terminal desbalanceado (porta 1 da Figura 3).

III. RESULTADOS

Para realizar as simulações eletromagnéticas dos sistemas estudados neste projeto, foi utilizado o software *CST Studio Suite*. Além disso, para a confecção e o design dos desenhos

dos circuitos a serem simulados, recorreu-se ao software *Klayout*, o qual gera arquivos do tipo GDS que são aceitos pelo programa *CST*.

A. Cavidade

Antes de começar a desenvolver o projeto do balun (*balanced to unbalanced*), estudou-se o comportamento de uma cavidade no software *CST*. A cavidade simulada no programa apresenta frequência de operação de 5.9 GHz, impedância característica de 49,32 Ω e possui dois capacitores com a geometria presente na Figura 4.

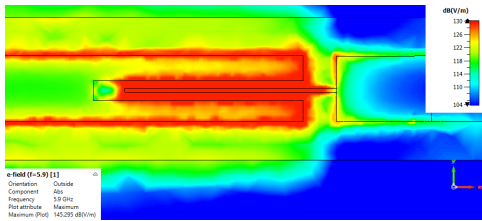


Figura. 4. Distribuição de campo elétrico do capacitor da cavidade simulada no *CST*.

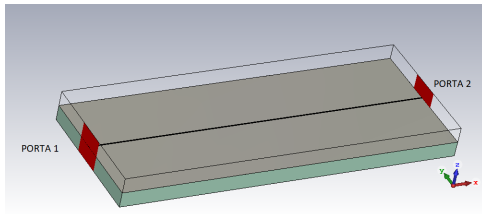


Figura. 5. Cavidade simulada no *CST*.

Simulando apenas o sinal enviado pela porta 1 do circuito presente na Figura 5, obteve-se o padrão de campo elétrico ao longo da cavidade presente na Figura 6.

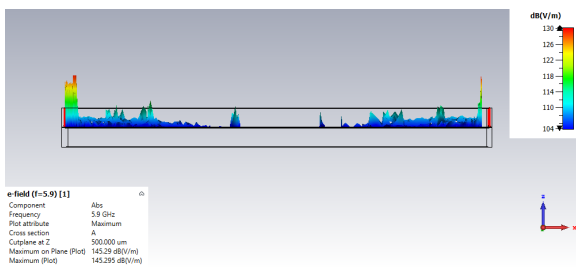


Figura. 6. Simulação do campo elétrico em dB ao longo da cavidade.

Da Figura 6, nota-se que o campo elétrico é quase nulo no centro do circuito e apresenta maiores magnitudes perto dos capacitores de entrada e saída das portas (portas 1 e 2 da Figura 5, respectivamente).

B. Balun Marchand

Por fim, utilizando o *Klayout* para alterar o circuito da cavidade projetado anteriormente, desenvolveu-se o circuito do balun no *CST*.

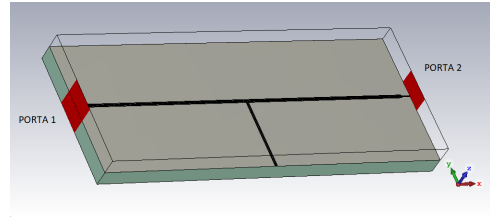


Figura. 7. Balun do tipo Marchand simulado no *CST*

A frequência de operação do circuito foi de 6.5 GHz e a impedância característica medida na linha de transmissão entre a porta 1 e a porta 2 presentes na Figura 7 foi 49,35 Ω , apresentando pouca alteração em relação ao que foi medido apenas na cavidade ressonante.

Simulando o circuito, obteve-se a seguinte distribuição de campo elétrico presente nas figuras 8 e 10.

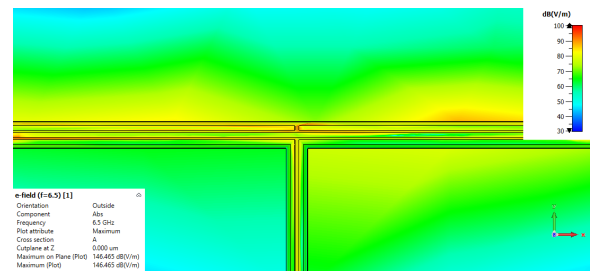


Figura. 8. Distribuição de campo elétrico no centro do balun do tipo Marchand, utilizando apenas a porta 1 como fonte de campo elétrico.

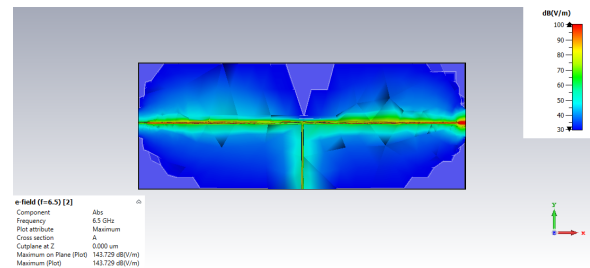


Figura. 9. Distribuição de campo elétrico do balun do tipo Marchand, utilizando apenas a porta 2 como fonte de campo elétrico.

Das figuras 8 e 10, nota-se que existe um sinal sendo transmitido dos terminais desbalanceados (portas 1 e 2 presentes na Figura 7) para o terminal balanceado. Isto é, existe uma interação eletromagnética entre os terminais desbalanceados da cavidade com os balanceados. Caso fosse acoplado um sistema quântico, por exemplo, um ressonador mecânico ou um *qubit*, aos terminais desbalanceados, alterações nesse sistema resultariam em mudanças nos campos eletromagnéticos medidos no terminal desbalanceado.

IV. CONCLUSÃO

O desenvolvimento de tecnologias para melhorar o acoplamento de sistemas quânticos com os sistemas de medição dos mesmos é de extrema importância. Principalmente, para

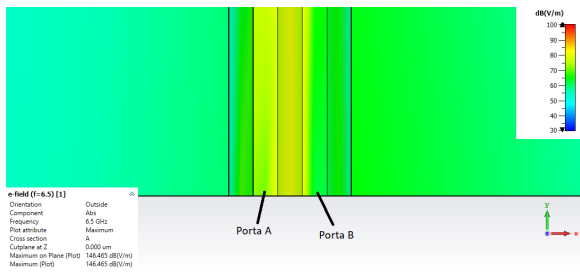


Figura. 10. Distribuição de campo elétrico das portas balanceadas do balun do tipo Marchand, utilizando apenas a porta 2 como fonte de campo elétrico.

sistemas de informação quântica, nos quais medições mal-sucedidas acarretam na total destruição da informação. Assim, a utilização do balun pode facilitar muito a aquisição de informação de *qubits* a serem processadas. Caso fosse possível realizar mais simulações e houvessem condições mais favoráveis à realização de experimentos presenciais, seria possível otimizar o balun e começar fabricação dos primeiros dispositivos para teste.

REFERÊNCIAS

- [1] M. A. Nielsen and I. L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information*, 10th ed. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2010.
- [2] J. M. Gambetta, J. M. Chow, and M. Steffen, "Building logical qubits in a superconducting quantum computing system," *npj Quantum Information*, vol. 3, no. 1, p. 2, 12 2017. [Online]. Available: <http://www.nature.com/articles/s41534-016-0004-0>
- [3] J. Koch, T. M. Yu, J. Gambetta, A. A. Houck, D. I. Schuster, J. Majer, A. Blais, M. H. Devoret, S. M. Girvin, and R. J. Schoelkopf, "Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper pair box," *Physical Review A*, vol. 76, no. 4, p. 042319, Oct. 2007. [Online]. Available: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.76.042319>
- [4] A. F. Kockum and F. Nori, *Quantum Bits with Josephson Junctions*. Springer, Cham., 2019.
- [5] S. M. Girvin, "Circuit QED: superconducting qubits coupled to microwave photons," in *Quantum Machines: Measurement and Control of Engineered Quantum Systems*. Oxford University Press, 6 2014, pp. 113–256. [Online]. Available: <http://www.oxfordscholarship.com/view/10.1093/acprof:oso/9780199681181.001.0001/acprof-9780199681181-chapter-3>
- [6] Y. Tsutsumi, H. Kanaya, and K. Yoshida, "Design and performance of an electrically small slot loop antenna with a miniaturized superconducting matching circuit," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2005.
- [7] D. Pozar, *Microwave engineering*, 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2012.
- [8] M. Steer, *Microwave and RF Design - A Systems Approach*, 1st ed. SciTech Publishing, INC., 2010.
- [9] N. Marchand, "Transmission-line conversion transformers," *Electronics*, vol. 17, no. December, pp. 142–145, 1944.
- [10] J. S. Sun, G. Y. Chen, S. Y. Huang, C. J. Huang, K. L. Wu, and Y. D. Chen, "The wideband marchand Balun transition design," in *ISAPE 2006 - 2006 7th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, Proceedings*, 10 2006, pp. 796–799.