

## **Refrigeração via conversão de recursos quânticos**

Franklin Luis dos Santos Rodrigues Jr.  
Orientador: Gabriel T. Landi

### **Resumo**

Um dos principais avanços na formulação contemporânea da mecânica quântica consiste na identificação de uma série de recursos que podem ser consumidos para realizar tarefas específicas. O caso mais conhecido é o da teoria de recurso do emaranhamento. Mas, recentemente, diversas outras teorias de recurso vêm se mostrando importantes como, por exemplo, a teoria de recursos da pureza ou da coerência. Neste projeto propomos um estudo da relação entre as teorias de recursos da coerência e do emaranhamento com a termodinâmica, através das chamadas operações térmicas. Como aplicação, propomos estudar a concepção de um refrigerador funcionando exclusivamente via coerência. Ou seja, um dispositivo que transfere calor de um reservatório frio para um reservatório quente consumindo coerência (ao invés de trabalho), usando emaranhamento como um recurso intermediário. Tendo em vista o interesse crescente da comunidade em fortalecer as relações entre termodinâmica e informação quântica, acreditamos que este projeto seja oportuno e apropriado para um mestrado.

# 1 Introdução

Propriedades genuinamente quânticas, como o emaranhamento [1], oferecem a possibilidade de realizar tarefas que não são possíveis com a física clássica como, por exemplo comunicações mais seguras, metrologia de alta precisão e computação quântica. Um dos principais avanços na descrição teórica destas aplicações foi a identificação da mecânica quântica como uma *teoria de recursos*. Nesta teoria, identifica-se uma série de recursos que são consumidos para realizar as tarefas em questão. Esta formulação teve início com a teoria de recursos do emaranhamento [2] e foi em seguida estendida para outros recursos como pureza [3], assimetria [4], atermalidade [5], etc. As teorias de recursos na mecânica quântica foram motivadas por formulações análogas utilizadas na termodinâmica. No entanto, ao contrário da termodinâmica, onde os recursos fundamentais são em geral calor e trabalho, na mecânica quântica abrem-se uma série enorme de diferentes possíveis recursos.

Mais recentemente, a coerência, princípio mais básico da mecânica quântica, foi identificada como um recurso [6]. A coerência é vista, de certa maneira, como um recurso fundamental do qual os outros podem ser derivados. Assim, uma pergunta natural consiste em identificar as leis que regem a conversão de recursos. Diversos trabalhos vem sendo feitos nesta direção, principalmente nos últimos dois anos [7–19].

Recentemente, na Ref. [15] os autores mostraram que a coerência pode ser amplificada utilizando um gradiente de temperatura. Este corresponde ao primeiro resultado mostrando que um recurso clássico (neste caso calor) pode ser usado para amplificar um recurso quântico. Neste trabalho propomos estudar o efeito inverso. Ou seja, o uso da coerência como um mecanismo para alterar o fluxo de calor, criando assim um refrigerador. Como descreveremos a seguir, isso é possível primeiro convertendo coerência em emaranhamento e, em seguida, utilizando o emaranhamento para reverter o fluxo de calor entre dois reservatórios [20].

Tendo em vista o interesse crescente da comunidade em relacionar termodinâmica e informação quântica, acreditamos que este projeto seja extremamente oportuno. Além disso, por versar sobre assuntos importantes da atualidade, como emaranhamento, coerência, sistemas quânticos abertos, etc., vemos esse projeto como uma ótima oportunidade para familiarizar o estudante com conceitos e técnicas que lhe serão úteis no futuro como formação geral em física.

## 2 Formulação teórica

Seja  $|i\rangle$  uma base ortonormal de um sistema quântico arbitrário. Dizemos que uma matriz densidade é *incoerente* na base  $|i\rangle$  quando ela é diagonal nesta base:

$$\delta = \sum_i \delta_{ii} |i\rangle\langle i|. \quad (1)$$

Denotamos também por  $\mathcal{S}$  o conjunto de matrizes densidade incoerentes. Definimos agora uma operação incoerente como qualquer mapa físico  $\mathcal{E}(\rho)$  que leva estados incoerentes em estados incoerentes: ou seja  $\mathcal{E}(\delta) \in \mathcal{S}$  [6]. Sob a ótica desta classe de operações, portanto, qualquer estado que não é incoerente representa um recurso. É dessa maneira que teorias de recurso em geral são definidas. Uma ressalva imediata a esta formulação, é que a escolha de base é arbitrária. A princípio, um sistema completamente isolado não possui uma base preferencial. No entanto, adotamos aqui a perspectiva de que bases preferenciais podem emergir devido à interação de um sistema com o seu ambiente. São nestes casos onde uma teoria de recursos para a coerência ganha relevância.

Considere agora 3 qubits A, B e C. Suponha que os qubits A e B são preparados em estados térmicos a temperaturas distintas. Já o qubit C é preparado em um estado arbitrário, que potencialmente possui coerências em alguma base. Seja  $\sigma_x = |0\rangle_x\langle 1|$  o operador de abaixamento do qubit  $x \in \{a, b, c\}$ . Analisaremos então a dinâmica de três corpos gerada pelo Hamiltoniano

$$H_{abc} = g(\sigma_a^\dagger \sigma_b \sigma_c + \sigma_b^\dagger \sigma_a \sigma_c). \quad (2)$$

Neste tipo de interação o qubit C funciona como um intermediador que permite a troca de energia entre A e B. Além disso, se tomamos como base preferencial de C a base computacional  $|0\rangle$  e  $|1\rangle$ , esse tipo de interação, do ponto de vista de C, gera um mapa incoerente. Portanto, ele se encaixa no quadro da teoria de recursos da coerência.

Mais do que, mostraremos nesta dissertação que a interação gerada por (2) pode ser interpretada como dando origem a dois processos independentes. O primeiro é a transferência de energia entre A, B e C, que é um processo predominantemente clássico. O segundo, que ocorre em paralelo, é a conversão de coerência de C em emaranhamento entre A e B. Dessa forma, estamos consumindo a coerência em C com

o intuito de correlacionar A e B. O próximo passo é estudar a evolução entre A e B somente quando ambos começam em um estado emaranhado. Este problema foi estudado recentemente em [20], onde foi mostrado que o emaranhamento pode ser consumido com o intuito de reverter o fluxo de calor, do frio para o quente, funcionando assim como um agente refrigerador. Em suma, através destes mecanismos é possível conceber uma máquina que consome coerência para atuar como um refrigerador.

### 3 Objetivos do projeto

O problema descrito na seção anterior corresponde a um toy model simplificado de como recursos quânticos pode ser utilizados para realizar operações térmicas. Parte do objetivo desta dissertação consistirá em generalizar tais idéias para sistemas mais complexos. Para que isso seja possível, o estudante deverá se familiarizar com as teorias de recursos da mecânica quântica e com o formalismo de sistemas quânticos abertos. Concluída esta etapa, o próximo passo será desenhar possíveis experimentos onde este tipo de dispositivo pode ser testado.

Assim, os objetivos principais do trabalho são:

- Estudo das teorias de recursos do emaranhamento [2], coerência [6] e atermalidade [5]. Tempo estimado: 6 meses.
- Busca bibliográfica sobre os resultados mais recentes a respeito da conversão de recursos quânticos [10, 12]. Tempo estimado: 3 meses.
- Elaboração das leis que regem a conversão de coerência para emaranhamento e, em seguida, de emaranhamento para atermalidade. Tempo estimado: 3 meses.
- Concepção de possíveis experimentos utilizando íons aprisionados e qubits supercondutores para implementar estas idéias. Tempo estimado: 4 meses.

O cronograma acima foi planejado para ter a duração de 1 ano e meio. O restante do tempo será dedicado às disciplinas e à elaboração da dissertação.

### 4 Conclusões

O presente projeto visa introduzir o estudante às teorias de recursos de sistemas quânticos, além de aplicá-las para problemas na fronteira entre a termodinâmica quântica e a informação quântica. Esta é uma linha de pesquisa onde se tem visto um número grande de trabalhos recentes, em revistas de alto impacto. Por tal motivo, acreditamos que o projeto venha em uma hora apropriada, permitindo que o estudante fique atualizado na fronteira do conhecimento neste campo de pesquisa. Antecipamos que o projeto possa render 1 ou 2 trabalhos em bons periódicos internacionais.

Vale mencionar também que este trabalho contará com discussões e possíveis colaborações de diversos pesquisadores estrangeiros que visitarão o IFUSP nos próximos dois anos com projetos de pesquisa recém aprovados. Entre eles mencionamos o Prof. Dragi Karevski, da Université de Lorraine (Projeto USP-COFECUB), o Prof. Mauro Paternostro da Queen's University (Projeto FAPESP-SPRINT) e o Prof. Gerardo Adesso da University of Nottingham (Projeto FAPESP-UoN-UoB). A interação com estes pesquisadores, líderes nas áreas de sistemas quânticos abertos e informação quântica, será de grande valia para a formação geral do estudante.

### References

- [1] M. A. Nielsen and I. L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press, 2000.
- [2] R. Horodecki, M. Horodecki, and K. Horodecki, "Quantum entanglement," *Reviews of Modern Physics*, vol. 81, pp. 865–942, jun 2009.
- [3] M. Horodecki, P. Horodecki, and J. Oppenheim, "Reversible transformations from pure to mixed states and the unique measure of information," *Physical Review A*, vol. 67, p. 062104, 2003.
- [4] G. Gour and R. W. Spekkens, "The resource theory of quantum reference frames: Manipulations and monotones," *New Journal of Physics*, vol. 10, p. 033023, 2008.

- [5] F. G. S. L. Brandão, M. Horodecki, N. H. Y. Ng, J. Oppenheim, and S. Wehner, “The second laws of quantum thermodynamics,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112, no. 11, pp. 3275–3279, 2015.
- [6] T. Baumgratz, M. Cramer, and M. B. Plenio, “Quantifying coherence,” *Physical Review Letters*, vol. 113, p. 140401, 2014.
- [7] I. Devetak and A. Winter, “Distilling common randomness from bipartite quantum states,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3183–3196, 2004.
- [8] J. Åberg, “Catalytic coherence,” *Physical Review Letters*, vol. 113, no. 15, p. 150402, 2014.
- [9] F. G. S. L. Brandão and G. Gour, “The general structure of quantum resource theories,” *Physical Review Letters*, no. 115, p. 070503, 2015.
- [10] A. Streltsov, U. Singh, H. S. Dhar, M. N. Bera, and G. Adesso, “Measuring Quantum Coherence with Entanglement,” *Physical Review Letters*, vol. 115, p. 020403, 2015.
- [11] J. Svozilik, A. Vallés, J. Perina, and J. P. Torres, “Revealing Hidden Coherence in Partially Coherent Light,” *Physical Review Letters*, vol. 115, no. 22, p. 220501, 2015.
- [12] J. Ma, B. Yadin, D. Girolami, V. Vedral, and M. Gu, “Converting Coherence to Quantum Correlations,” *Physical Review Letters*, vol. 116, no. 16, pp. 1–5, 2016.
- [13] M. Weilenmann, L. Kraemer, P. Faist, and R. Renner, “Axiomatic relation between thermodynamic and information-theoretic entropies,” *Physical Review Letters*, vol. 117, p. 260601, 2016.
- [14] K. Chuan Tan, S. Choi, H. Kwon, and H. Jeong, “Coherence, Quantum Fisher Information, Superradiance and Entanglement are Interconvertible Resources,” pp. 1–27, 2017.
- [15] G. Manzano, R. Silva, and J. M. R. Parrondo, “Autonomous thermal machine for amplification and control of energetic coherence,” pp. 1–8, 2017.
- [16] K.-D. Wu, Z. Hou, Y.-Y. Zhao, G.-Y. Xiang, C.-F. Li, G.-C. Guo, J. Ma, Q.-Y. He, J. Thompson, and M. Gu, “Experimental cyclic inter-conversion between Coherence and Quantum Correlations,” pp. 1–8, 2017.
- [17] A. Černoč, K. Bartkiewicz, K. Lemr, and J. Soubusta, “Experimental tests of coherence and entanglement conservation,” 2018.
- [18] T. Kraft and M. Piani, “Genuine Distributed Coherence,” 2018.
- [19] C. Mukhopadhyay, S. Sazim, and A. K. Pati, “Coherence makes quantum systems magical,” 2018.
- [20] K. Micadei, J. P. S. Peterson, A. M. Souza, R. S. Sarthour, I. S. Oliveira, G. T. Landi, T. B. Batalhão, R. M. Serra, and E. Lutz, “Reversing the thermodynamic arrow of time using quantum correlations,” vol. 6, pp. 1–9, 2017.