

JORNADA PCI/CBPF

APRESENTAÇÃO DE PÔSTER – 2019/2020



BOLSISTA:	ALEXANDRE BARON TACLA
E-MAIL:	TACLA@CBPF.BR
SUPERVISOR:	FERNANDO DE MELO
TÍTULO DO PROJETO:	NOVAS ABORDAGENS PARA A SIMULAÇÃO CLÁSSICA DE SISTEMAS QUÂNTICOS DE MUITOS CORPOS

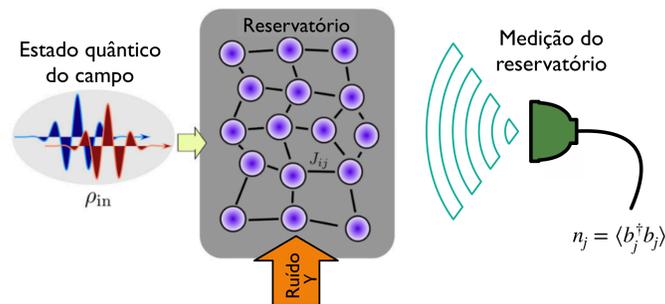
INTRODUÇÃO

Computadores com centenas de bits quânticos já estão em operação, buscando solucionar problemas cuja alta complexidade desafia os limites do que é tratável pela computação clássica. Porém, esses dispositivos têm sua operação limitada pela presença de ruídos, que reduzem a coerência quântica e contaminam a computação com erros. Sem ainda contar com mecanismos de combate a erros, a operação desses dispositivos precisa ser validada em relação a simulações clássicas, que servem como referência na validação e calibração desses sistemas [1].

Neste projeto, investigamos o uso de reservatórios quânticos como uma nova plataforma para o processamento de informação quântica na presença de ruídos [2]. Especificamente, buscamos estabelecer um método novo aproximado para determinar se dois sistemas de dimensão infinita estão emaranhados quanticamente. Esse é um problema reconhecidamente de difícil solução e que tem diversas aplicações em tecnologias quânticas.

SISTEMA

Motivados por estudos recentes [2], consideramos o sistema ilustrado na figura abaixo, que consiste de dois modos do campo eletromagnético que interagem com um reservatório quântico. O reservatório é formado por uma rede de partículas quânticas acopladas de acordo com a matriz de amplitudes J_{ij} . O ruído no sistema se deve a flutuação no número de partículas no reservatório, devido a trocas com o ambiente externo.



O hamiltoniano do reservatório é dado por

$$H_R = \sum_{i,j} J_{i,j} (b_i^\dagger b_j + b_j^\dagger b_i)$$

e a interação com os dois modos do campo eletromagnético é da forma

$$H_I = \sum_{\alpha=1}^2 \sum_j W_{\alpha,j} (a_\alpha b_j^\dagger + a_\alpha^\dagger b_j)$$

onde o operador b_i aniquila partículas no sítio i do reservatório, a_α representa o operador de aniquilação do modo α do campo, e a matriz $W_{\alpha,j}$ define as amplitudes do acoplamento entre o campo e os sítios do reservatório.

De forma geral, a dinâmica quântica do sistema pode ser descrita pela equação mestra

$$i\hbar \frac{d\rho}{dt} = [H_R + H_I, \rho] + \frac{i\gamma}{2} \sum_j 2b_j \rho b_j^\dagger - b_j^\dagger b_j \rho - \rho b_j^\dagger b_j$$

Após a interação com os modos do campo, o número médio de partículas n_j em cada sítio do reservatório é medido. Nosso objetivo é criar um protocolo que, a partir dessa informação, permita determinar se o estado inicial ρ_{in} do campo é emaranhado ou não, como descrito a seguir.

DETECÇÃO DE EMARANHAMENTO

Determinar de forma eficiente se o estado inicial desconhecido do campo, ρ_{in} , é emaranhado é um problema em aberto. Nosso objetivo aqui é tentar resolver esse problema de forma aproximada, buscando identificar ingredientes físicos e padrões nas medições do reservatório que revelem uma assinatura típica de estados emaranhados do campo.

Para verificar se isso é, em princípio, possível, estudamos a evolução do sistema para estados térmicos comprimidos do campo, que, escritos na base de Fock, são da forma

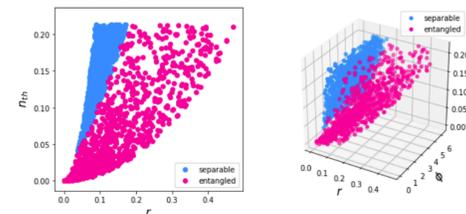
$$\rho_{in} = S \left(\sum_{n_1, n_2} \rho_{n_1}^{th} \rho_{n_2}^{th} |n_1, n_2\rangle \langle n_1, n_2| \right) S^\dagger$$

onde

$$S = \exp \left(r e^{i\phi} a_1^\dagger a_2^\dagger - r e^{-i\phi} a_1 a_2 \right)$$

$$\rho_{n_\alpha}^{th} = \left(\frac{1}{1 + n_{th}} \right) \left(\frac{n_{th}}{1 + n_{th}} \right)^{n_\alpha}$$

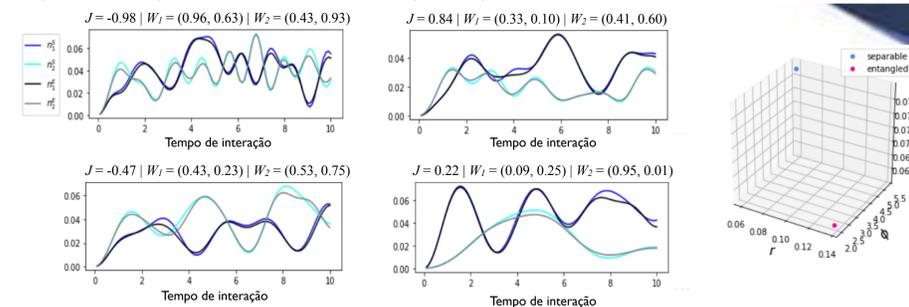
Para esses estados, há critérios matemáticos que permitem determinar de forma simples se o estado é emaranhado ou separável [3]. Na figura abaixo mostramos os parâmetros r , ϕ , n_{th} de 1000 estados térmicos comprimidos aleatórios emaranhados (magenta) e separáveis (azul).



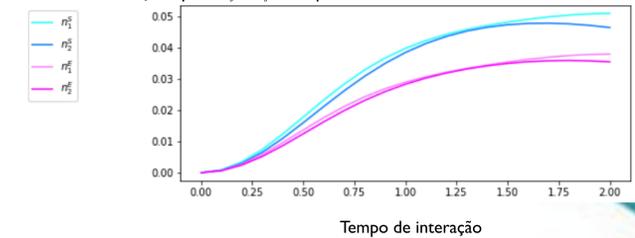
Pela figura, fica claro que há uma separação entre os parâmetros que definem estados térmicos comprimidos emaranhados e separáveis. Isso nos motiva a pensar que o estado inicial do campo possa dar origem a dinâmicas do reservatório tipicamente diferentes, dependendo se o estado inicial é emaranhado ou não. Para testarmos essa hipótese, simulamos a dinâmica quântica do sistema para diversos estados iniciais e acoplamentos aleatórios, de forma a determinar as medições do reservatório típicas para estados emaranhados e separáveis. Em seguida, estudamos diferentes modos de inferir se ρ_{in} é emaranhado, dada a similaridade de sua evolução aos resultados típicos esperados.

SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Por simplicidade, consideramos aqui um modelo mínimo de um reservatório fermiônico com dois sítios, inicialmente no vácuo e sem ruído. Simulamos a dinâmica quântica do sistema campo-reservatório para milhares de configurações aleatórias distintas, envolvendo centenas de acoplamentos e centenas de estados térmicos comprimidos do campo (emaranhados e separáveis). Apesar da simplicidade do modelo, a dinâmica do sistema é não-linear e altamente não-trivial, variando significativamente em função dos acoplamentos. Abaixo mostramos, como exemplo, o sinal de medição (ocupação dos sítios do reservatório) em função do tempo de interação, simulado para quatro configurações distintas de acoplamentos, e para um estado inicial do campo emaranhado (E) e um estado separável (S). Note que, apesar da forte diferença em relação às amplitudes dos acoplamentos, o sinal de medição não apresenta grandes variações em relação aos estados iniciais.

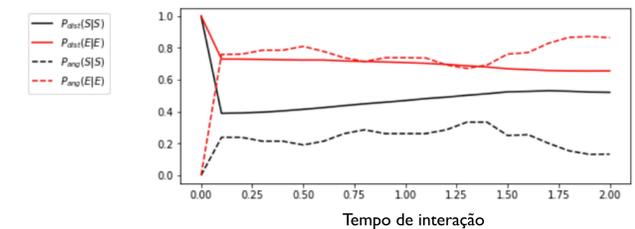


Na figura abaixo, mostramos a medição esperada típica para estados emaranhados (E) e separáveis (S) em função do tempo de interação, resultante do sinal de medição médio de 16800 configurações diferentes. Note que, como esperado, os sinais de medição típicos n_j^E e n_j^S se separam



RESULTADOS

Uma vez determinadas as componentes n_j^E e n_j^S dos sinais de medição médios, podemos criar um algoritmo para classificar novas medições n_j de acordo com sua proximidade em relação às médias. Essa proximidade pode ser definida em termos da distância euclidiana (dist) entre as medições ou em termos da distância angular (ang). Abaixo mostramos a probabilidade de sucesso de ambas as estratégias de classificação em um conjunto de 4200 configurações novas. A probabilidade de sucesso (condicional) de ambas estratégias é significativamente maior para estados emaranhados (E) do que para estados separáveis (S), chegando a uma taxa de acerto máxima de aproximadamente 90% para $P_{ang}(E|E)$ e 75% para $P_{dist}(E|E)$.



DISCUSSÃO

Nossos resultados preliminares sugerem que é, de fato, possível classificar o estado inicial do campo a partir do comportamento médio esperado do reservatório. Porém, estamos ainda estudando o comportamento físico do sistema e investigando diferentes maneiras de aperfeiçoar nosso protocolo e aumentar o índice de acerto.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Boixo et al, Nature Physics **10**, 218 (2014); T.F. Rønnow et al, Science **345**, 420 (2014); V. Havlíček et al, Nature **567**, 209 (2019);
- [2] S. Ghosh et al, npj Quantum Information (2019)5:35
- [3] G. Adesso, A. Serafini, and F. Illuminati Phys. Rev. A **70**, 022318 (2004).