
PROJETO DE PESQUISA

Programa de Iniciação Científica e Tecnológica – CBPF

Nome do Orientador e Coordenação (Pesquisador/Tecnologista/Pós-doc):

Alan Carlos Maioli

Nome do pesquisador ou tecnologista e Instituição de Pesquisa Externa: (Coorientador ou Colaborador externo, se houver):

Não há.

Nome do Supervisor e Coordenação: (Pesquisador/Tecnologista):

Evaldo Mendonça Fleury Curado COTEO

Título do Projeto:

Estudo de sistemas quânticos abertos e determinação de diferentes regimes de decaimentos

Palavra-chave:

Mecânica Quântica, Sistemas Abertos, Equação de Lindblad

Área de conhecimento:

Mecânica Quântica e Física-matemática

Pré-requisitos desejáveis (se houver):

Ter cursado ou cursar a disciplina de mecânica quântica

Pré-requisitos obrigatórios (se houver):

Não há

Possibilidade de orientação remota:

(x) Sim

() Não

Resultante do Projeto:

Preparação do bolsista para área científica, e produção de produto educacional/didático, com possibilidade de publicação de artigo científico em longo prazo.

Rio de Janeiro, 10 de agosto de 2025

PROJETO:

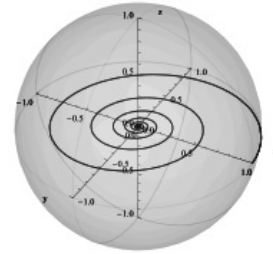
RESUMO:

O presente projeto propõe capacitar alunos de graduação em Física a compreender os fundamentos teóricos de sistemas quânticos abertos, com ênfase na equação de Lindblad (GKSL), dinâmica dissipativa de qubits e o papel de pontos excepcionais (EPs). O projeto combinará estudos analíticos, simulações numéricas e discussões críticas de artigos científicos. Pretende-se proporcionar ao aluno uma formação sólida nos aspectos teóricos e aplicados desses conceitos, contribuindo para sua formação como pesquisador iniciante em Física Teórica.

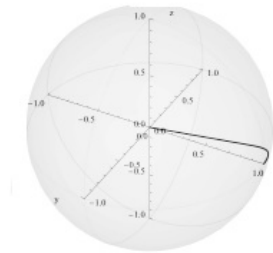
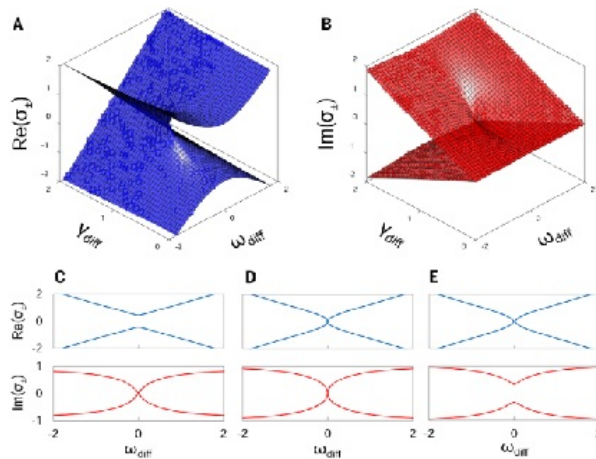
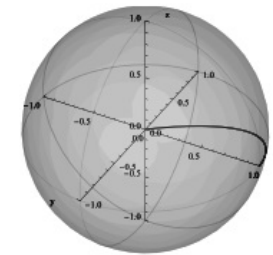
INTRODUÇÃO

Os sistemas quânticos abertos, que interagem com o ambiente ao seu redor, desempenham um papel central em diversas áreas da física moderna, desde a computação quântica até a metrologia de precisão. Diferentemente dos sistemas isolados, sua dinâmica é marcada por efeitos de dissipação e decoerência, descritos de maneira elegante pela equação de Lindblad (GKSL). Um aspecto fascinante desses sistemas é o surgimento de pontos excepcionais (EPs), onde autovalores e autovetores de operadores não-Hermitianos coalescem, levando a comportamentos dinâmicos singulares.

Neste projeto, exploraremos a teoria por trás desses fenômenos, focando na dinâmica de um qubit sujeito a dissipação anisotrópica. Utilizando ferramentas analíticas e simulações numéricas, investigaremos como a competição entre a evolução unitária e a dissipação pode levar a transições entre regimes oscilatórios, críticos e superamortecidos, com os pontos excepcionais atuando como marcadores dessas mudanças qualitativas. O estudo não apenas aprofundará a compreensão teórica dos alunos sobre sistemas quânticos abertos, mas também os preparará para desafios em pesquisa avançada e aplicações tecnológicas.



$$\frac{dA}{dt} = i[H, A] + \sum_k h_k \left[L_k A L_k^\dagger - \frac{1}{2} (A L_k^\dagger L_k + L_k^\dagger L_k A) \right] \equiv \mathcal{L}(A)$$



OBJETIVOS:

Geral:

Esse projeto tem por objetivo introduzir conceitos fundamentais a cerca de mecânica quântica, como evolução temporal, qbits, matrizes de Pauli em sistemas físicos para alunos de graduação que possuam interesse na área, além de familiarizar o bolsista com a área científica via a produção de material didático e/ou artigo científico.

Específicos:

Compreender a equação de Lindblad (GKSL): Estudar a formulação matemática da equação mestra que descreve a evolução de **sistemas quânticos abertos**. Analisar as propriedades essenciais, como preservação de traço e completude positiva, que garantem a descrição física consistente de processos dissipativos.

Explorar a dinâmica de um qubit dissipativo: Resolver analiticamente a equação de Lindblad para um qubit sujeito a dissipação isotrópica e anisotrópica. Identificar e caracterizar os diferentes regimes dinâmicos (subcrítico, crítico e supercrítico) e suas transições.

Investigar pontos excepcionais (Eps): Entender o conceito de EPs em operadores não-Hermitianos e sua relação com degenerescências não convencionais. Analisar como EPs influenciam a dinâmica do sistema, marcando transições entre comportamentos qualitativamente distintos.

Desenvolver habilidades computacionais: Implementar simulações numéricas (Em **Python** ou **Mathematica**) da evolução temporal do vetor de Bloch para diferentes parâmetros de dissipação. Visualizar trajetórias no espaço de Bloch e interpretar resultados em termos de decaimento e coerência quântica.

Promover conexões com pesquisas atuais: Discutir aplicações dos conceitos estudados em áreas como informação quântica em sistemas abertos. Incentivar a leitura crítica de artigos científicos recentes sobre o tema.

Estimular a escrita científica com a preparação de relatórios parciais e um relatório final do projeto, bem como a participação em eventos acadêmicos (seminários, congressos de iniciação científica).

Produzir um **material educacional** explicando didaticamente os fundamentos e as aplicações do tema aqui proposto.

(Objetivo de longo prazo): Implementar os conceitos em um sistema quântico ainda não abordado na literatura e produzir **artigo científico** em periódico internacional.

Com esses objetivos, o projeto visa não apenas consolidar conhecimentos teóricos, mas também preparar os alunos para desafios em pesquisa avançada, capacitando-os a abordar problemas contemporâneos na fronteira da física quântica.

PLANO DE TRABALHO/ DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES:

A primeira parte do projeto possui um caráter de revisão nas áreas de física e de matemática. Dessa forma, serão abordados conceitos básicos de mecânica quântica, incluindo seus postulados, a equação de Schrödinger, e sua aplicação em um sistema de dois níveis. Enquanto que, em matemática, serão estudados fundamentos relacionados à álgebra SU2 e as matrizes de Pauli.

Em segundo lugar, o aluno irá se familiarizar com a formulação matemática da equação mestra (GKLS) que descreve a evolução de sistemas quânticos abertos. Analisar as propriedades essenciais, como preservação de traço e completude positiva, que garantem a descrição física consistente de processos dissipativos. Com essa base estabelecida, avançaremos para a exploração concreta da dinâmica de um qubit dissipativo. Através de soluções analíticas da equação de Lindblad, investigaremos tanto o caso de dissipação isotrópica quanto a situação mais complexa da dissipação anisotrópica. Este estudo nos permitirá identificar e caracterizar os distintos regimes dinâmicos - subcrítico, crítico e supercrítico - compreendendo as transições entre eles e suas particularidades físicas. Um dos aspectos mais fascinantes deste projeto será a investigação dos pontos excepcionais (EPs) em operadores não-Hermitianos. Nos dedicaremos a entender como estes pontos especiais, onde ocorrem degenerescências não convencionais, influenciam profundamente a dinâmica do sistema, servindo como marcadores de transições entre comportamentos qualitativamente diferentes. Esta análise nos levará às fronteiras do conhecimento atual em física quântica de sistemas abertos. Para complementar e solidificar o entendimento teórico, desenvolveremos

habilidades computacionais práticas. Implementaremos simulações numéricas que nos permitirão acompanhar a evolução temporal do vetor de Bloch sob diferentes condições de dissipação. Através da visualização das trajetórias no espaço de Bloch, aprenderemos a interpretar os resultados em termos de decaimento de coerência quântica e outros fenômenos relevantes. As implementações numéricas serão feitas em Python ou Mathematica (de acordo com a decisão conjunto entre orientador e aluno)

O acompanhamento será feito por meio de reuniões semanais com o orientador, nas quais o aluno poderá discutir dúvidas, apresentar os avanços e receber sugestões de aprofundamento. Para estimular a comunicação científica, o aluno preparará apresentações orais sobre temas específicos estudados ao longo do projeto. Além disso, serão elaborados relatórios parciais, organizando os resultados obtidos, e, ao final do projeto, um relatório científico completo será produzido.

Todo o trabalho será conduzido com foco no desenvolvimento da autonomia de pesquisa, pensamento crítico e habilidades de expressão científica, essenciais para a formação acadêmica do aluno.

RESULTADO ESPERADO:

Espera-se que, ao final do projeto, o aluno tenha adquirido uma compreensão sólida sobre a equação de Lindblad (GKLS), dominando conceitos fundamentais de mecânica quântica de operadores e suas aplicações em sistemas físicos. O aluno deverá ser capaz de construir e analisar exemplos sistemas quânticos abertos, interpretar seus resultados e discutir suas implicações físicas em modelos simples.