

# A teoria da informação quântica e sua computação na Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF)

Quantum Information Theory and its Computation in the Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF)

Fernando Shinoske Tagawa de Lemos Pires<sup>\*1</sup>, Nathan Willig Lima<sup>2</sup>,  
Paulo de Tarso Artencio Muzy<sup>3</sup>, Wilson Ricardo Matos Rabelo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Porto Alegre, RS, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Física, Departamento de Física, Porto Alegre, RS, Brasil.

<sup>3</sup>Universidade de São Paulo, Instituto de Estudos Avançados, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>4</sup>Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, PA, Brasil.

Recebido em 13 de junho de 2024. Revisado em 28 de junho de 2024. Aceito em 30 de junho de 2024.

Nesta comunicação no formato de *Resource Letter*, reunimos e classificamos 47 artigos publicados na Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF) que abordam aspectos teóricos, experimentais, interpretativos e históricos fundamentais da Teoria da Informação Quântica e sua Computação. Nosso objetivo com a realização desta *Resource Letter* é contribuir com estudantes, professores e pesquisadores em Física que tenham interesse em desenvolver pesquisa ou incorporar as temáticas da área em cursos de graduação e pós-graduação, inclusive como uma maneira moderna de abordagem dos fenômenos quânticos a partir do conceito de informação e suas aplicações.

**Palavras-chave:** Teoria da informação quântica, computação quântica, fundamentos de mecânica quântica, teoria da informação.

In this communication in the format of *Resource Letter* we gathered and classified 47 papers published on Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF) that address theoretical, experimental, interpretive and historical fundamental aspects of Quantum Information and its Computation. Our objective with this *Resource Letter* is to contribute to students, teachers and researchers in Physics who are interested in developing research or incorporating the themes of the area into undergraduate and postgraduate courses, even as a modern way of approaching quantum phenomena based on the concept of information and its applications.

**Keywords:** Quantum information theory, quantum computing, foundations of quantum mechanics, information theory.

## 1. Introdução

A Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF) registrou ao longo das duas últimas décadas um acervo de publicações sobre o tema *computação quântica*, como denominação genérica que reúne desde contribuições sobre os fundamentos da Mecânica Quântica e da Teoria da Informação, até exposições específicas sobre Algoritmos, Comunicação, Programação e Ótica aplicados ou decorrentes da aplicação de formalismos e fenômenos quânticos à computação. A existência desse acervo reflete algumas características da produção científica e do desenvolvimento na área: a maturidade dos pesquisadores; a sintonia com a sua relevância tecnológica; e a importância de disseminá-lo como conhecimento organizado.

Para fazer jus a essa natureza exemplar do tratamento do tema, esse artigo tem o objetivo de identificar esse

acervo de publicações valendo-se do modelo de comunicação das *resource letters* [1] publicadas, por exemplo, no reconhecido periódico *American Journal of Physics*. Esse modelo de apresentação, organiza-se a partir de uma introdução, onde são expostas as escolhas dos conceitos e desenvolvimentos relevantes para a formação na área; seguida do elenco de artigos publicados na revista com uma breve anotação de seus achados e sua importância; e como conclusão uma resenha crítica do acervo, destacando outros assuntos complementares ao tema principal que poderiam ser objeto de publicação futura.

## 2. Por Que Uma Resource Letter?

O que qualifica as contribuições desse acervo é, além de sua coerência com o alto nível educativo do periódico, a identidade de interesse pelo tema dos fundamentos, da abordagem didática e da aplicação de ferramentas desenvolvidas na área da *teoria da informação e sua*

\*Endereço de correspondência: feshinoske@outlook.com

*computação quântica*, que resumimos na designação genérica de *computação quântica*. Esse esforço da comunidade acadêmica e da revista de se posicionar na vanguarda do tratamento de um tema contemporâneo e de seu desenvolvimento tecnológico, justificam o objetivo desse artigo, qual seja, o de coletar essas comunicações científicas e tratá-las como acervo unificado de conhecimento disponibilizado para os interessados principalmente em reproduzi-lo para a formação de profissionais na área.

As publicações coletadas na RBEF se caracterizam, sobretudo, por apresentar temas de pesquisa atualíssima em sua abordagem tecnológica imediatamente decorrente da pesquisa científica em curso. A maturidade dos pesquisadores decorre de que o país já teve na década de 1980, pesquisadores inseridos nos principais desenvolvimentos do tema, como os professores Amir Caldeira [2, 3] e Luiz Davidovich [4, 5] e tem hoje importantes grupos de pesquisa e formação de pessoas espalhados pelo país com ampla conexão internacional. Além disso, os autores possuem dois artigos publicados na RBEF e que fazem parte do escopo dessa revisão, um deles aborda as contribuições de Feynman para a dissipação e computação quântica [6] e o outro aborda elementos de ótica quântica [7].

A sintonia com a relevância tecnológica demonstra a atenção que as aplicações em áreas como segurança de dados, comunicação, otimização, sensoriamento e criptografia têm demandado no setor privado e no setor de defesa nacional, para além de seu interesse acadêmico. Mas é o reconhecimento da importância de disseminar esse conhecimento, que infelizmente está ausente do sistema educacional superior brasileiro ordinário, no qual não é sistematicamente incluído nem tratado nas graduações em física, matemática, engenharia, computação e comunicação. Aí, o tema não comparece como carga didática obrigatória, nem na generalidade da denominação *computação quântica* nem na especificidade das teorias que a suportam. Sob o aspecto de sua organização, esse acervo não cogita de recuperação histórica, pois os autores têm, voluntariamente, se destacado por selecionar criteriosamente temas em pesquisa, que poderiam ser qualificados como pesquisa fundamental, e apresentá-los em sua natureza aplicada, instrumental e tecnológica. Sob o aspecto da audiência que alcança, o acervo atende a atenção de outros públicos, de outras instituições públicas e privadas, configurando um ambiente interdisciplinar, que é uma novidade alvissareira no campo da ciência física, como campo da reflexão dos pesquisadores e do interesse da RBEF.

O condão de nossa comunicação, no formato de uma *resource letter*, é contribuir com pesquisadores, docentes e estudantes, principalmente interessados no ensino na área, destacando na revista em tela, o conjunto coerente de exposições que pode ser utilizado como material didático. Entretanto, quando coligimos o conhecimento na área em uma revista específica como a RBEF,

identificamos a prontidão dos pesquisadores brasileiros para a formação de pessoas, visando o desenvolvimento do país na área e a qualidade que se agregou como saber e instrumento organizado na revista. Assim, ao assumirmos a pretensão de introduzir a prática da exposição por meio de uma *resource letter*, um modelo nem sempre lembrado entre nós, valorizamos a capacidade conjunta do setor de pesquisa em prover instrumentos para o avanço da educação em ciências e provocamos o acadêmico a fazer uso colaborativo de sua produção e reflexão valorizando o mérito da formação científica em um tema contemporâneo e de fronteira que tem a atenção do mercado, dos profissionais, da sociedade e pretende ter a atenção do Estado. Nesse sentido, a contribuição da RBEF excede o mero registro e acesso às contribuições e se configura como um espaço qualificado de saber para o país em um tema que congrega ciência, tecnologia e ensino de modo especial.

Essa abordagem valoriza o predicado da RBEF de se posicionar como fonte fundamental de publicações de artigos e materiais didáticos de Física, destinado aos cursos de graduação e pós-graduação e sugere que perguntemos: como esse tema é tratado na RBEF? O trabalho de reunir, organizar, e comentar criticamente, as publicações sob esse ponto de vista unificado, mostrou que se estruturou um conjunto suficiente e original de conhecimentos para a introdução e desenvolvimento do tema. Esperamos que o presente trabalho seja uma referência da fundamentação e aplicação na área e que contribua com aqueles que a ela se dedicam como um caminho estruturado e coerente de estudo e a inauguração de um espaço na RBEF para comunicações no formato de *resource letters*.

### 3. Teoria Quântica e Computação

O acervo disponibilizado pela RBEF permite contemplar a mudança estrutural da física no século XX, organizando para finalidades pedagógicas os argumentos a partir do surgimento da computação quântica e do conceito de informação. Essa perspectiva reflete a recuperação teórica de fundamentos da Mecânica Quântica sob a ótica das aplicações demandadas pela computação e se apresenta nos artigos publicados os quais abordam, exemplarmente, argumentos da natureza conceitual e fenomenológica das teorias físicas ao lado de aplicações imediatas, refletindo o diálogo científico do período e seu desenvolvimento especial.

A Mecânica Quântica estrutura-se como uma teoria independente, a partir de 1925, com o trabalho de Werner Heisenberg, em que se indica a não comutabilidade entre grandezas físicas como posição e momentum [8], consolida-se como teoria fundamental da matéria ao longo do século passado, sendo apresentada em livros didáticos de nível superior [9–12] e se assenta na formação de físicos e químicos na atualidade. Já a Teoria Matemática da Comunicação de Shannon [13] e a

formulação de um modelo de computação de Turing [14] e von Neumann [15], um pouco mais tardias, lançaram as bases da computação e da comunicação e tornaram-se campo principalmente da engenharia e a eletrônica aplicada. Sob a perspectiva tecnológica enquanto a Mecânica Quântica fundamentava a ciência e uso dos materiais, Turing e von Neumann estabeleciam o modelo lógico de processamento e Shannon reconhecia a informação como uma grandeza física mensurável, lançando as bases da comunicação.

Assim, é na interação teórica dessas disciplinas que se desenvolve o nosso tema, pois os desenvolvimentos suscetíveis de aplicação tecnológica, requeriam uma fundamentação sólida e sugeriam mudanças estruturais na interpretação física dos fenômenos acessados pela experiência. Essa transformação da relação entre teoria e experiência está na origem da reflexão de Feynman acerca da capacidade necessária para simular sistemas físicos microscópicos. Semelhante reflexão já estava presente no argumento de Pauli [16] acerca da insuficiência da mecânica estatística clássica, que embora também uma teoria probabilística, não descrevia o comportamento de determinados fenômenos da matéria na escala microscópica. Na raiz dessas questões está o fato experimental da quantização e o conceito de amplitude de probabilidade, o qual reconhecido por Born [17] como a estrutura matemática sujeita a um cálculo expresso pela simbologia estabelecida por Dirac [18], permite que Pauli se refira a nova mecânica como uma Teoria da Complementaridade, em analogia à Teoria da Relatividade, valorizando a natureza dual do comportamento da matéria. É von Neumann [19] que formaliza essa perspectiva de Pauli estabelecendo o espaço de Hilbert com a álgebra do sistema simbólico de Dirac e a interpretação física do processo de medida identificado por Born, como a estrutura matemática linear das amplitudes de probabilidade e não da distribuição de probabilidades ela mesma. Essa estrutura matemática estava estabelecida para após o desenvolvimento da computação no pós-guerra, recepcionar a nova computação das informações mensuráveis em uma base computacional cuja lógica, agora não distributiva, explicitava a condição de linearidade e dualidade da interpretação fenomenológica que seria depois apontada por Feynman para simular o mundo microscópico. Essa abordagem lógica da aplicação da teoria da matéria à computação ressalta a capacidade dos sistemas físicos microscópicos de implementar o registro, o cálculo e a medida da informação em um processo físico sem análogo clássico, e identifica o desenvolvimento da *computação quântica* como um momento da interação entre ciência e tecnologia análogo, por exemplo, ao uso da termodinâmica e do eletromagnetismo no século XIX para o desenvolvimento de máquinas e ferramentas. E o acervo da RBEF permite coletar material específico para comunicar pedagogicamente esse desenvolvimento.

É imediato reconhecer que a Teoria Quântica excede uma mecânica – ou uma teoria da evolução espaço-temporal de sistemas físicos – quando é examinada com o conceito de informação. Ela sugere toda uma concepção da natureza e sua descrição pela ciência, pois lhe acrescenta variáveis, formalismos e processos, por exemplo, um processo de medida, estranhos ao paradigma clássico, motivando debates sobre fundamentos e constatações experimentais irrefutáveis que não se encaixavam na visão de coordenação espaço-temporal determinística clássica. Inaugura-se com o famoso debate entre Einstein e Bohr no congresso de Solvay de 1927, uma discussão sem precedentes na física, na qual se inseriam visões sobre a própria natureza do saber científico e suas capacidades. É exemplar o resultado da publicação do artigo de Einstein, Podolski e Rosen [20], que aventou razões, por décadas consideradas argumentos especulativos ou metafísicos, e que se mostraram em 1964, com a publicação da desigualdade de Bell, uma questão solúvel pela observação e medida.

A *computação quântica*, como área ampla de aplicação desse conhecimento em ferramentas tecnológicas, mostrou-se na atualidade capaz de exemplificar uma visão de ciência com dois atributos diferenciais: problemas fundamentais são abordados e tratados concomitantemente com sua aplicação e seu desenvolvimento em ferramentas; sua ação sobre públicos diversos torna explícita a interdisciplinaridade. Essas características confirmam a argumentação de Wiener [21] que designou por *cibernética* esse novo movimento científico e técnico de *controle e comunicação no animal e na máquina* tão sugestivo da repercussão e uso da ciência e da técnica na contemporaneidade.

Subsidiariamente, mas de modo muito relevante e original, a reflexão sobre o tema da *computação quântica* desenvolvido em uma *teoria da informação quântica*, Walmsley e Knight [22], DiVincenzo [23], Wilde [24], Mermin [25], Vedral [26] oferecem um caminho pedagógico para a inovação e atualização dos cursos regulares de mecânica quântica e mecânica estatística na formação de físicos, matemáticos e engenheiros. Seguindo a argumentação de Shannon e Weaver [13], o estabelecimento da informação como grandeza física já sugere que os sistemas físicos microscópicos sejam considerados do ponto de vista do registro da informação e da implementação do seu cálculo, tornando imediato o conceito de entropia. Esse é o paradigma utilizado, por exemplo, por Balian [27], Fuchs [28] Mézard e Montanari [29], Tisoc e Beltrán [30]. Entre nós é digno de nota a iniciativa pioneira de Carlos Yokoi do Instituto de Física da Universidade de São Paulo [31] de, em suas aulas do curso de pós-graduação de Mecânica Estatística ainda na década de 1990, seguir essa abordagem, iniciando sua apresentação pela formulação da mecânica quântica no espaço de Hilbert no formalismo de Dirac enfatizando de início o método do operador densidade para introduzir

o ensemble grande canônico de Gibbs, ligando-o imediatamente aos conceitos de informação de Shannon e de entropia de von Neumann.

Dada a relevância do desenvolvimento tecnológico do período como estímulo ao desenvolvimento da ciência, é fundamental reconhecer o intenso investimento de atores privados e públicos, como grandes corporações IBM, Google, empresas e iniciativas privadas fundadas para atuar especialmente na área, como D-Wave e o governo dos Estados Unidos em ações organizadas na área e os setores nacionais de Defesa. Enquanto as corporações disponibilizam recursos de engajamento da sociedade e divulgação do tema, o governo dos EUA já em 1999, iniciou o projeto *Quantum Act*, cujo objetivo era estabelecer uma coordenação, só experimentada anteriormente no esforço de guerra para desenvolvimento de armas nucleares, do campo da computação quântica naquele país. De acordo com o relatório sobre Ciência da Informação Quântica da oficina da *National Science Foundation* (NSF) em 1999:

O potencial das tecnologias quânticas da informação já estão começando a ser reconhecidas pelas empresas comerciais e pela defesa nacional. Mas para que este potencial seja devidamente concretizado, será extremamente necessário um apoio estável a longo prazo destinado a questões científicas fundamentais. ([32, p. 6] – tradução nossa).

No relatório de 2016 do *National Science and Technology Council* do governo dos Estados Unidos, por outro lado, é apontado que a teoria quântica é raramente ensinada fora dos departamentos de Física [33, p. 8], configurando um problema importante para a área, visto que é necessário uma compreensão robusta de seus fundamentos para que o desenvolvimento de ferramentas na área continue. Uma das recomendações daquela instituição é que se proceda a uma urgente mudança no sistema educacional para incluir o tratamento sistemático de temas afetos à área.

Entre nós, o Exército Brasileiro é responsável por um programa estratégico de Defesa Cibernética e está entre os primeiros exércitos do planeta a estabelecer um Comando de Guerra Cibernética, à semelhança de uma quarta arma, ao lado das forças terrestre, aérea e marítima e chefiado pelo Exército, cooperativamente com a Marinha e a Aeronáutica. No campo acadêmico, entretanto, não somente a teoria quântica não é abordada fora do contexto da formação de físicos e químicos, bem como muitos cursos de graduação, mesmo nessas áreas, não incorporam tratamento aprofundado sobre os temas demandados pelo relatório como emaranhamento, processos de medida, informação quântica e a teoria matemática da comunicação. Temas mais gerais como Ótica, instrumentais como Álgebra Linear ou fenomenológicos que se expressam em aparatos experimentais de Stern-Gerlach e de simulações como o interferômetro de Mach-Zehnder se, ocasionalmente abordados, não

são apresentados como experimentos fundamentais para a computação quântica, mas como eventos de valor histórico localizado. É salutar identificar no acervo organizado pela RBEF o tratamento de todos esses temas e a disponibilização de material que atende plenamente à sugestão do relatório em tela.

#### 4. Estrutura da Revisão

A elaboração deste artigo de fundamentação pode ser dividida em duas etapas: a primeira tratou da busca por artigos direcionados a algum aspecto específico de computação quântica; a segunda tratou da busca por artigos sobre os fundamentos de mecânica quântica que dão subsídios à teoria da computação quântica.

Iniciamos a revisão utilizando o repositório do SciELO para a Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF), buscamos pelas palavras “computação quântica” e “informação quântica” e suas respectivas versões em inglês, porém o repositório retornou poucos resultados. Na tentativa de reunir a maior quantidade de trabalhos publicados na RBEF resolvemos olhar título por título de todos os artigos publicados na revista entre os anos de 1979 até Junho de 2024<sup>1,2</sup>. Durante a busca manual com relação ao título das publicações, foram utilizados quatro parâmetros norteadores: i) o título refere-se a ensino de mecânica quântica; ii) conceitos e experimentos fundamentais para a computação e informação quântica; iii) aplicações tecnológicas da computação e informação quântica e; iv) títulos esotéricos sobre mecânica quântica. A partir destes parâmetros foram encontrados 32 artigos que mencionam pelo menos uma vez os termos “computação quântica” e “informação quântica”.

Do conjunto de 32 artigos, sete foram excluídos pois apenas mencionam a computação e informação quântica como exemplos das potenciais aplicações tecnológicas dos conceitos de mecânica quântica explorados nos artigos. Após o primeiro filtro, fizemos a leitura do resumo, introdução e conclusão dos 25 artigos restantes, após essa leitura dinâmica, outros três artigos foram removidos do escopo desta revisão, pois, assim como os outros sete trabalhos, apenas tangenciam as áreas de computação e informação quântica e suas respectivas subáreas. Dois destes artigos são parte de uma edição especial em comemoração do aniversário de 100 anos de Richard Feynman e, embora mencionem a participação de Feynman na gênese da teoria da computação quântica, os artigos focam nas contribuições de Feynman para o nascimento da nanotecnologia. Restaram 22 artigos para classificação.

A segunda parte da revisão tratou da busca por artigos sobre os fundamentos de mecânica quântica e teoria

<sup>1</sup> Nossa intenção ao procurar os artigos manualmente era evitar que trabalhos importantes não fossem incluídos, pois no início da busca pelas palavras-chave percebemos que alguns artigos importantes não eram encontrados, evidenciando uma possível fraqueza no algoritmo de busca do SciELO

<sup>2</sup> Última busca feita no dia 25/06/2024.

clássica da informação, duas áreas necessárias para a teoria da computação quântica. De modo semelhante à primeira busca, olhamos todos os artigos publicados na RBEF de 1979 até Junho de 2024. Considerando as palavras-chave “entrelaçamento”, “emaranhamento”, “Teorema de Bell”, “Desigualdade de Bell”, “Interferômetro de Mach-Zehnder”, “spin”, “óptica quântica”, “Stern-Gerlach”, “Teoria da medida quântica”, “decoerência”, “sistemas abertos”, “Princípio da Incerteza”, “teoria da informação”, “entropia da informação”, “Shannon”, “Turing” e suas respectivas versões em inglês e espanhol, foram encontrados 32 artigos. Durante a leitura dinâmica dos 32 trabalhos, seis foram excluídos, pois tratavam-se de artigos de aplicação dos fundamentos de mecânica quântica a um determinado problema teórico, experimental ou tecnológico, totalizando 26 artigos.

## 5. Artigos Organizados Por Área Temática

Nesta seção propomos uma classificação dos 48 artigos selecionados de acordo com as suas respectivas áreas temáticas, artigos que endereçam mais de uma área temática foram classificados em uma categoria *pluritemática*. Os artigos foram divididos em seis categorias gerais: A) Fundamentos de Mecânica Quântica; B) Teoria Clássica da Informação; C) Fundamentos de Computação Quântica; D) Criptografia Quântica; E) Aplicações de Computação Quântica e; F) Proposições pedagógicas.

A categoria A é constituída por artigos sobre os principais fundamentos de mecânica quântica necessários para o entendimento da Física que subsidia a teoria da Computação Quântica (CQ), vale destacar que aspectos importantes de mecânica quântica foram excluídos desta revisão por não serem tão cruciais para os desdobramentos da CQ, como o formalismo ondulatório da equação de Schrodinger. A categoria B foi criada especialmente para os artigos cujo foco principal é apresentar a história e os conceitos da teoria clássica da informação. A categoria C engloba os fundamentos teóricos, experimentais e históricos da CQ. A categoria D engloba os artigos que abordam protocolos de chaves quânticas para a Criptografia Quântica e a categoria E é dedicada aos artigos que apresentam aplicações da CQ.

No que diz respeito a categoria F, enfatizamos que estes artigos poderiam ser classificados também nas outras categorias gerais em suas respectivas subcategorias de acordo com suas áreas temáticas, contudo, o apelo didático-pedagógico desses artigos aparece de forma muito explícita nos objetivos e propósitos de cada trabalho, portanto, decidimos criar uma categoria especial, que pretende direcionar aquele leitor que esteja em busca de artigos sobre fundamentos de mecânica, computação e informação quânticas com enfoque didático. As subcategorias: 1) aplicações de mecânica

quântica para a computação quântica e; 2) Ensino de mecânica quântica e computação quântica foram criadas para tentar separar com mais precisão os artigos.

### A. Fundamentos de mecânica quântica

Os artigos incluídos nesta categoria tratam dos conceitos, experimentos e interpretações fundamentais necessários para uma compreensão robusta da Física que subsidia a teoria da computação quântica. Toda teoria física é constituída por três elementos: fenômenos; formalismo; interpretações. Os fenômenos quânticos mais fundamentais para o entendimento da computação quântica são a interferência, que gera a superposição de estados, o entrelaçamento e a decoerência. Desse modo, incluímos artigos que abordam esses aspectos fenomenológicos em algum nível. Como já é conhecido da literatura, existem dois caminhos possíveis para o início do estudo da mecânica quântica. É comum em cursos de graduação em Física a aproximação com a mecânica quântica iniciar pela formulação ondulatória a partir da equação de Schrodinger e em um curso sequencial é abordado o formalismo matricial da mecânica quântica. Contudo, ambos os formalismos são equivalentes, como demonstrado por Schrodinger. Portanto, é perfeitamente viável o estudo de mecânica quântica começar a partir do formalismo matricial, sem mencionar funções de onda. Dessa forma, os artigos selecionados nesta revisão privilegiam os elementos fundamentais da mecânica quântica no formalismo proposto inicialmente por Heisenberg.

Em 2022, Olival Freire Jr. foi o editor do *Oxford Handbook of the History of Quantum Interpretations* [34], fornecendo uma visão geral histórica dos contrastes que estão no coração da mecânica quântica há 100 anos, o livro reúne contribuições de mais de 50 pesquisadores em temas de Física, História e Filosofia. No que diz respeito às interpretações, de acordo com Ostermann e Prado [35], em decorrência do caráter interdisciplinar da computação quântica, é necessário dedicar certa atenção para os problemas conceituais e interpretativos da mecânica quântica. Artigos que abordam esses problemas também foram incluídos nessa categoria. É importante destacar que a subcategoria *pluritemáticos* engloba os artigos que aprofundam em mais de uma área temática.

#### 1 Emaranhamento, Teorema de Bell e paradoxo EPR

1. J. Pinochet e D. R. Líbano. Una demostración simple de la desigualdad de Bell basada en la teoría elemental de conjuntos. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **38**, 3, (2016). Este artigo possui dois objetivos bem definidos, primeiramente, os autores propõem uma demonstração da desigualdade de Bell a partir da teoria elemental de conjuntos, visando o objetivo de esclarecer o significado e o alcance do teorema de Bell em relação ao paradoxo EPRB. O segundo

- objetivo é apresentar uma nova demonstração matemática da desigualdade de Wigner-d’Espagnat. São utilizados apenas conceitos elementares de teoria de conjuntos e probabilidade. A partir desta demonstração é possível argumentar a favor da não-localidade e do antirrealismo da mecânica quântica.
2. L. S. Fassarella. O Experimento de Hardy: a mais simples prova da violação do realismo local EPR. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **41**, 4, (2019). O experimento de Hardy é discutido a fim de demonstrar de forma simples que a desigualdade de Bell é violada nesse experimento, consequentemente fortalecendo o caráter não realista e não local da mecânica quântica. O experimento consiste de um par de partículas fermiônicas (elétron-pósitron) que atravessam Interferômetros de Mach-Zehnder e são medidas por detectores separados espacialmente. A reformulação de Mermin é revisitada e o argumento de Hardy-Mermin é explicado.
  3. A. Valdés-Hernández, C. G. Maglione, A. P. Majtey e A. R. Plastino. Entanglement and the ticking of the clock. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, São Paulo, **42**, (2020). Neste artigo, os autores têm como propósito introduzir o conceito de entrelaçamento, dentro da abordagem atemporal da mecânica quântica, aos leitores não especializados. O problema do tempo na mecânica quântica é discutido. A ideia do universo ser composto por um relógio C e um sistema R (o resto do Universo) é apresentada, nesse cenário, a evolução temporal emerge como um fenômeno consequente do entrelaçamento entre o relógio e o resto do Universo. Utilizando um pouco de formalismo, é demonstrado que existe uma relação quantitativa direta entre o entrelaçamento exibido pelo sistema composto e a evolução dinâmica do sistema R.
  4. R. Wagner, N. W. Lima e S. Duarte. Uma reconstrução didática da apresentação original do Teorema de Bell: Sobre o Paradoxo de Einstein, Podolsky e Rosen. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **44**, (2022). Uma reconstrução didática do teorema de Bell é apresentada, a novidade deste trabalho é partir do experimento de Mermin a fim de construir uma analogia à desigualdade de Bell, partindo do concreto em direção ao abstrato. O objetivo dos autores com esse movimento é contribuir com o ensino da Teoria Quântica (TQ), resgatando um episódio histórico com implicações profundas para os desenvolvimentos conceituais, experimentais e filosóficos subsequentes da TQ.
  5. R. R. Machado e C. E. Aguiar. Demonstrações simples de desigualdades de Bell. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **45**, (2023). Demonstrações da desigualdade de Bell propostas por Herbert e Peres são apresentadas neste artigo. As demonstrações são apresentadas a partir de um experimento com pares de fótons e não com partículas de spin  $1/2$ , arranjo originalmente proposto por Bell. Os autores argumentam que um experimento com pares de fótons possibilita o uso de argumentos semiclássicos que resultam em resultados idênticos aos da mecânica quântica, dessa forma, estudantes com conhecimentos básicos de ótica podem acompanhar a discussão.
  6. J. Pinochet. La desigualdad de Bell y las fantasmagóricas acciones a distancia. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **46**, (2024). Neste artigo, o autor tem dois objetivos principais: oferecer uma exposição simples e atualizada da desigualdade de Bell aos especialistas e proporcionar uma nova derivação matemática da desigualdade de Wigner-d’Espagnat (WD) que se destaca por sua simplicidade matemática e conceitual. Ao longo do texto o autor discute o paradoxo EPR e constrata os resultados da desigualdade WD com as previsões da Mecânica Quântica. Nas duas últimas seções o autor discute sobre a ação a distância que se manifesta na correlação quântica das violações das desigualdades de Bell e compara as posições filosóficas realistas e positivistas subjacentes as previsões das desigualdades de Bell.
- ## 2 Experimento de Stern-Gerlach
7. R. Grossi, L. L. Brugger, B. F. Rizzuti e C. Duarte. One Hundred Years Later: Stern-Gerlach Experiment and Dimension Witnesses. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **45**, (2023). Neste artigo celebrativo, os autores propõem uma reformulação do experimento de Stern-Gerlach na linguagem moderna de cenários de preparação e medição. O principal resultado obtido permite descrever o experimento de Stern-Gerlach como um qubit extraindo apenas os dados estatísticos de um cenário de caixa-preta.
- ## 3 Teoria quântica da medida
8. A. G. Santos e J. A. Huguenin. Medidas quânticas: abordagem experimental de medidas POVM em polarização com feixe laser intenso. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **45**, (2023). Neste artigo, o objetivo principal é a realização experimental de medidas com operador positivo valorizado (POVM) a partir de um circuito que realiza medidas POVM em um qubit de polarização. Durante a breve revisão sobre medidas quânticas, projetivas e POVM o conceito de qubit também é revisado, os autores enfatizam que um qubit é qualquer sistema quântico de 2 níveis. Após essa breve descrição matemática, é proposto a interpretação do qubit como graus de liberdade da luz. Por fim, é discutido as medidas POVM em polarização em um circuito óptico.
  9. C. D. Melo, B. Pimentel e J. Ramirez. Teoria algébrica de processos da medida em sistemas quânticos. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **33**, 3, (2011). Utilizando conceitos básicos de álgebra linear, o formalismo

variacional de Schwinger é apresentado com o objetivo de construir uma estrutura algébrica dos processos de medida em mecânica quântica a partir do conceito de símbolo de medida.

#### 4 Interferômetro de Mach-Zehnder

10. F. OSTERMANN e S. D. PRADO. Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **27**, 2, p. 193-203, (2005). Neste artigo, são exploradas quatro interpretações da mecânica quântica: i) ondulatória realista; ii) complementaridade; iii) muitos mundos; e iv) dualista-realista a partir do fenômeno de interferência em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder (IMZ). O arranjo experimental do IMZ é apresentado na forma clássica e quântica.
11. D. Soares-Pinto e C. Naves. O Interferômetro de Mach-Zehnder e a Escolha Retardada Quântica. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **43**, (2021). Utilizando o IMZ, que possibilita a simulação de um experimento de fenda dupla, é possível analisar o experimento de escolha retardada quântica proposto por Wheeler, fazendo uso de uma partícula auxiliar que controla o resultado: comportamento corpuscular ou ondulatório. Quando o resultado da partícula auxiliar não é considerado, o comportamento do sistema é intermediário entre uma descrição puramente corpuscular e uma puramente ondulatória. Esse resultado sugere a necessidade de uma revisão do princípio de complementaridade para que a possibilidade de uma componente do arranjo experimental estar em superposição seja levada em conta. As conclusões obtidas permitem associar os comportamentos corpuscular e ondulatório as distribuições de probabilidades resultantes da correlação entre a partícula principal e a partícula auxiliar.

#### 5 Spin

12. J. R. Sousa e C. A. Dartora. Um estudo didático da dinâmica de spins. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **43**, (2021). A pretensão deste trabalho é apresentar as ferramentas necessárias para a compreensão da dinâmica de spins e algumas aplicações simples. Os autores estudam a dinâmica de spins, do ponto de vista clássico e quântico, sob a ação de um campo de Radiofrequência (RF) rotacional no plano  $xy$  e um campo magnetostático na direção do eixo  $z$ . As soluções (clássica e quântica) desse problema são análogas, o resultado da equação de Bloch se relaciona com o valor esperado do spin, na solução quântica e com o vetor de magnetização, na solução clássica. O problema do campo transversal irrotacional é resolvido, contudo as soluções clássica e quântica são aproximadas e não exatas.

#### 6 Óptica quântica

13. C. Valverde, A. N. Castro, E. P. Santos e B. Baseia. Alguns aspectos da óptica quântica usando campos luminosos em modos viajantes. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **37**, 2, (2015). Neste artigo os autores propõem uma breve discussão acerca dos modos viajantes em campos luminosos, a partir de um arranjo experimental composto por um ou dois separadores de feixe, espelhos e detectores de fótons. O objetivo a ser atingido é mostrar detalhadamente os estados de entrada do campo luminoso no arranjo óptico e em quais estados o campo óptico emerge na saída do arranjo experimental. Um dos resultados obtidos é a produção de estados entrelaçados a partir da superposição de dois estados coerentes.
14. L. Davidovich. Os quanta de luz e a ótica quântica. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **37**, 4, (2015). Neste trabalho, o autor apresenta um panorama da Física Quântica. A narrativa é construída de modo que são discutidas de forma conceitual a radiação de corpo negro, lei de Planck, teoria da emissão induzida, o maser, o laser, a óptica quântica e, por fim, a informação quântica.

#### 7 Sistemas quânticos abertos

15. J. Maziero. A representação de Kraus para a dinâmica de sistemas quânticos abertos. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **38**, 2, (2016). Motivados pela simplificação feita em livros didáticos a respeito da interação de sistemas quânticos com o meio ambiente, em geral, assume-se que os sistemas são fechados, neste artigo, o autor apresenta a representação de Kraus para sistemas abertos, que são a maioria dos sistemas físicos reais. Defende-se que a representação de Kraus pode ser muito útil para o estudo de sistemas que exibem emaranhamento, não localidade, coerência quântica e discórdia quântica, ou seja, sistemas de interesse da ciência da informação quântica.

#### 8 historiográficos

16. A. M. M. Filho, I. Silva. O experimento WS de 1950 e as suas implicações para a segunda revolução da mecânica quântica. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **41**, 2, (2019). Neste trabalho, os autores resgatam o episódio histórico do experimento de Wu-Shaknov (WS), este experimento é considerado como um pioneiro na representação do fenômeno do entrelaçamento quântico. O objetivo do artigo é discutir sobre o impacto dos resultados obtidos por Wu e Shaknov para as discussões posteriores sobre os fundamentos da mecânica quântica e para a segunda revolução quântica. Simetricamente a isso, os autores buscam trazer para a superfície do debate historiográfico o papel da mulher no

desenvolvimento científico, que segundo os autores, ainda é muito negligenciado pela historiografia tradicional.

17. W. F. O. Bispo, D. F. G. David e O. Freire Junior. As contribuições de John Clauser para o primeiro teste experimental do teorema de Bell: uma análise das técnicas e da cultura material. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **35**, 3, (2013). Neste trabalho, os autores realizaram uma análise sobre os materiais e as técnicas que permitiram a realização do primeiro teste experimental das desigualdades de Bell entre 1970 e 1972 e discutem sobre a possibilidade do teste ter sido realizado anos antes. Também é enfatizado o não reconhecimento imediato das contribuições de Clauser em decorrência do preconceito que se tinha na época com pesquisadores em fundamentos de mecânica quântica.
18. C. P. S. Neto e O. Freire Junior. Herch Moysés Nussenzveig e a ótica quântica: consolidando disciplinas através de escolas de verão e livros-texto. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **35**, 2, (2013). A difusão e consolidação da ótica quântica na América Latina é discutida a partir dos dois primeiros cursos ministrados em 1968 na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro e na Escola Latino-Americana de Física em 1970 pelo físico Herch Moysés Nussenzveig. Após os cursos, Nussenzveig publicou alguns livros-texto que foram escritos com base em suas notas de aula e desempenharam um papel fundamental na divulgação da ótica quântica em países de língua inglesa, os dados que os autores possuíam não foram suficientes para analisar o impacto dos livros-texto nos países da América Latina.

## 9 Clonagem Quântica

19. C. Ronde e S. M. Bianchi. A remark on Quantum Cloning. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **41**, 4, (2019). Nesta curta nota sobre a clonagem quântica, os autores enfatizam que o teorema de impossibilidade de cópia da mecânica quântica é válido apenas para entidades discerníveis, ou para entidades que não interagem uma com a outra, mas cujas propriedades intrínsecas sejam equivalentes. Ou seja, para entidades quânticas com propriedades intrínsecas iguais, o teorema não é válido, de modo que entidades indiscerníveis adquirem o mesmo operador de estado, sendo assim, não só suas propriedades intrínsecas se tornam indiscerníveis, mas também suas propriedades extrínsecas.

## 10 Pluritemáticos

20. J. R. C. Piqueira. Teoria quântica da informação: impossibilidade de cópia, entrelaçamento e teletransporte. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **33**, 4, (2011). A teoria quântica da informação pode ser entendida

como a generalização quântica da teoria clássica da informação de Shannon, para isso é necessário levar em consideração os fenômenos quânticos de entrelaçamento entre estados e a não possibilidade de cópia de um estado quântico. Os objetivos do autor são aprofundar nos conceitos acima expostos para explicar suas aplicações tecnológicas como criptografia quântica, codificação quântica superdensa e teletransporte. Para isso, o autor recapitula algumas noções fundamentais da formulação de Dirac da mecânica quântica, produtos tensoriais e portas quânticas.

21. A. M. Velásquez-Toribio. Teoria da medida, decoerência e a interpretação de Montevideu da mecânica quântica. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **44**, (2022). Neste trabalho, o problema da medida na mecânica quântica é discutido e o autor evoca a introdução da teoria da decoerência como um importante avanço no entendimento dos processos de medida quântica. Sequencialmente, é apresentado o problema da medida como foco da pluralidade de interpretações da mecânica quântica. A partir disso, discute-se a interpretação de Montevideu de forma resumida, a fim de proporcionar uma solução para o problema da medida, ainda que de forma incompleta. Essa interpretação representa um novo jeito de olhar para esse problema.

## B. Teoria Clássica da Informação

A teoria da informação desempenha um papel fundamental para a teoria quântica da informação. Cinco dos seis artigos classificados nesta categoria abordam tanto conceitos específicos de teoria da informação, como entropia e informação mútua, quanto aplicações em neurociência e sistemas dinâmicos. Além disso, há também um trabalho historiográfico que traz um panorama dos caminhos percorridos pelos pesquisadores na gênese da teoria clássica da informação.

### 1 Historiográficos

22. A. B. Pena e C. C. Silva. Da comunicação à informação: quando a prática se sobrepõe à teoria. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **44**, (2022). Neste texto, os autores traçam um panorama geral dos caminhos percorridos pelos pesquisadores da gênese da teoria da informação, analisando fontes primárias e evidenciando o teor gradual e colaborativo da formação de uma nova área de estudos. Os autores também buscam apresentar os motivos que levaram os trabalhos posteriores a Shannon a se afastarem das questões ontológicas da teoria. Uma crítica a concepção de Shannon como o fundador da teoria da informação é veiculada e argumentos acerca dos motivos que o colocaram nessa posição são discutidos. Durante o período analisado foi possível perceber uma mudança no foco das pesquisas, indo

em direção a aplicações tecnológicas em detrimento de uma compreensão do significado da informação.

## 2 Entropia

23. L. C. Araújo, J. P. H. Sansão e H. C. Yehia. Influência da lei de Zipf na escolha de senhas. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **38**, 1, (2016). Quatro abordagens para elaboração de senhas são analisadas à luz da teoria da informação. Impondo a restrição de que uma senha deve equilibrar segurança computacional e facilidade de uso por leigos, ao final da análise das quatro abordagens é possível concluir que a estratégia com a melhor relação de compromisso entre maximização da entropia e facilidade de memorização é a utilização de acrônimos.
24. J. Maziero. Entendendo a entropia de von Neumann. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **37**, 1, (2015). O autor inicia com uma revisão dos postulados da mecânica quântica com o objetivo de discutir a entropia de von Neumann como uma generalização da entropia de Shannon. Para facilitar a compreensão, os autores propõem um jogo simples.
25. M. Tisoc e J. V. Beltrán. Mutual Information: A way to quantify correlations. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **44**, (2022). Iniciando pela noção de que não é possível medir a informação diretamente, mas a partir do ganho ou perda de informação, o conceito de correlação entre variáveis aleatórias é construído. A partir disso, o problema de quantificação de correlações é enunciado, a informação mútua é proposta para responder esse problema. No contexto da Física trabalha-se com sistemas clássicos e quânticos, portanto, os autores definem a informação mútua clássica e a generalizam para o caso quântico. A interpretação dos termos das definições de informação mútua é feita utilizando os conceitos de entropia clássica e quântica da informação.

## 3 Neurociência

26. V. L. Cordeiro, R. F. O. Pena e C. A. C. Ceballos. Shimoura R. O.; Roque A. C. Aplicações da teoria da informação à neurociência. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **41**, 2, (2019). A partir de simulações computacionais e dos modelos de neurônio de Poisson e integra-e-dispara, os autores utilizam conceitos da teoria da informação, como entropia e informação mútua, para quantificar a informação contida nos trens de disparos neuronais.

## 4 Sistemas Dinâmicos

27. Á. R. Vasconcellos, C. G. Rodrigues e R. Luzzi. Complexidade, auto-organização e informação em sistemas dinâmicos. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **37**, 2, (2015). Os temas da complexidade,

auto-organização e informação são discutidos a partir do vínculo com a teoria de sistemas dinâmicos. Conclui-se que a estatística preditiva da teoria da informação com o enfoque de inferência científica de Jeffreys-Jaynes e as ideias de Maxwell, Gibbs e Boltzmann mostra-se como um formalismo promissor na aproximação lógico-matemática para o tratamento de sistemas dinâmicos.

## C. Fundamentos de Computação quântica

Os artigos classificados nesta categoria aprofundam em pelo menos um aspecto fundamental da teoria da computação quântica e são divididos em cinco subcategorias. Na primeira subcategoria estão os artigos que falam sobre os conceitos fundamentais para a implementação de algoritmos quânticos, em particular os algoritmos de Deutsch, Deutsch-Josza e Grover, simulações desses algoritmos em computadores clássicos, computadores quânticos como o da IBM e no Interferômetro de Mach-Zehnder. Na segunda subcategoria está um artigo que aprofunda na computação quântica adiabática; a terceira subcategoria contém um artigo que relaciona a Dinâmica de Campos Térmicos e Computação Quântica; a quarta categoria contém um artigo que vincula a arquitetura de computadores com um sistema físico; um artigo sobre história da Computação Quântica compõe a quinta categoria.

### 1 Algoritmos Quânticos, programação e simulação de algoritmos quânticos

28. G. E. M. Cabral, A. F. D. Lima e B. Lula Júnior. Interpretando o algoritmo de Deutsch no interferômetro de Mach-Zehnder. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **26**, 2, p. 109-116, (2004). Neste artigo é enfatizado a importância do fenômeno de interferência como subsídio para a Computação Quântica (CQ) e a utilização deste fenômeno na resolução do problema proposto por Deutsch. O problema de Deutsch consiste em descobrir se uma função é constante ou balanceada calculando-a uma vez, ao invés de duas vezes. No presente artigo, os autores criticam a abstração com a qual é ensinado o algoritmo de Deutsch, impossibilitando a compreensão dos fenômenos físicos subjacentes (interferência). O artigo é estruturado de uma forma que permite a conclusão de que o interferômetro de Mach-Zehnder possui a mesma estrutura matemática do algoritmo de Deutsch.
29. M. A. José, J. R. C. Piqueira e R. D. D. Lopes. Introdução à programação quântica. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **35**, 1, (2013). O estudo da programação quântica permite a avaliação da funcionalidade dos algoritmos quânticos em computadores clássicos, visto que ainda não existe um computador quântico mais geral. Desse modo, similarmente ao que a máquina de Turing possibilitou, simulando

o computador clássico, o computador quântico simulado em um computador clássico fomenta o desenvolvimento das linguagens de programação e algoritmos próprios para o ambiente quântico.

30. P. H. Grosman, D. G. Braga e J. A. Huguenin. Realização experimental da simulação do algoritmo de Deutsch com o interferômetro de Mach-Zehnder. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **41**, 2, (2019). O objetivo do artigo é demonstrar experimentalmente que o Interferômetro de Mach-Zehnder (IMZ) possui as propriedades necessárias para simular o algoritmo de Deutsch e, possivelmente, outros algoritmos quânticos sem a necessidade de preparação de estados quânticos puros da luz. Os resultados obtidos demonstram que a interpretação do algoritmo pelo IMZ possui limitações.
31. J. E. Castillo, Y. Sierra e N. L. Cubillos. Classical simulation of Grover's quantum algorithm. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **42**, (2020). O artigo inicia com uma contextualização sobre a relevância do desenvolvimento da computação quântica e das potencialidades dos algoritmos quânticos como o algoritmo de Grover. Conceitos fundamentais de mecânica quântica são recapitulados antes dos autores apresentarem a estrutura matemática do algoritmo de Grover. Finalmente, uma simulação do algoritmo é apresentada utilizando-se a linguagem de programação Java, com a finalidade de comparar o tempo de resposta entre o algoritmo de Grover e dois algoritmos clássicos.
32. V. L. O. Sena e D. O. Soares-Pinto. O isomorfismo inesperado entre um sistema de bilhar e um algoritmo quântico. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **43**, (2021). Neste trabalho, os autores propõem uma concatenação entre o sistema de bilhar e o algoritmo de Grover para o cálculo dos algoritmos de  $\pi$ . Após um contraste entre os sistemas de bilhar e o algoritmo de Grover, conclui-se que o estudo desse isomorfismo é ótimo para fomentar discussões sobre teoria dos números e algoritmos quânticos, porém não é viável utilizar estes sistemas para resolver o problema do cálculo dos algoritmos de  $\pi$ .
33. A. N. Oliveira, E. V. B. Oliveira, A. C. Santos e C. J. Villas-Boas. Algoritmos quânticos com IBMQ Experience: Algoritmo de Deutsch-Jozsa. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **44**, (2022). Após uma breve contextualização histórica, os autores apresentam as ferramentas matemáticas necessárias para o entendimento de algoritmos quânticos e implicações físicas e tecnológicas destes algoritmos. Os algoritmos de Deutsch e Deutsch-Jozsa são apresentados como exemplos do ponto de vista teórico, matemático e experimental, visto que os autores implementam estes dois algoritmos nos computadores quânticos da IBM. Para um melhor entendimento dos algoritmos mencionados, foi enfatizado as características dos *quantum query algorithms (QQA)* e do mecanismo de caixa-preta. Após a implementação dos algoritmos, foi possível concluir a superioridade do computador quântico na análise das características de uma função em relação ao computador clássico.
34. W. M. S. Alves e J. C. C. Felipe. Algoritmos Quânticos usando o Qiskit: Uma abordagem para o ensino de informação e computação quântica. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **44**, (2022). Neste artigo, são abordados os aspectos teóricos da computação quântica com o objetivo de apresentar os resultados da simulação dos algoritmos de Deutsch e a transformada de Fourier Quântica utilizando os computadores quânticos da IBM através do Qiskit. As análises dos resultados são feitas tanto do ponto de vista do computador clássico, quanto dos computadores quânticos da IBM. Ao final, é feita uma comparação das diferenças de ganho e performance entre o computador clássico e o quântico.

## 2 Adiabática

35. P. J. P. Souza, T. M. Mendonça, E. V. B. Oliveira e C. J. Villas-Boas. Computação Quântica Adiabática: Do Teorema Adiabático ao Computador da D-Wave. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **43**, (2021). Neste artigo, os autores discutem os fundamentos físicos e matemáticos da Computação Quântica Adiabática (CQA), demonstrando o teorema adiabático e as condições de adiabaticidade. Na sequência, o método do *annealing* quântico, utilizado pela empresa D-Wave, é apresentado. Por fim, o algoritmo de Grover adiabático é discutido como uma aplicação da CQA e o problema do caixeiro viajante é apresentado como uma forma de construir os algoritmos.

## 3 Dinâmica de Campos Térmicos

36. G. Petronilo, M. Araújo e C. Cruz. Simulating thermal qubits through thermofield dynamics: an undergraduate approach using quantum computing. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **45**, (2023). Neste artigo, uma abordagem de ensino para simulações de bits quânticos térmicos utilizando a Dinâmica de Campos Térmicos (DCT) é apresentada. Um dos objetivos dos autores é fornecer uma prova de conceito sobre a implementação de qubits térmicos em um computador quântico a partir da DCT acessível a estudantes de graduação que tenham interesse nessa área. Os resultados obtidos representando um qubit com a esfera de Bloch, escrita em termos da transformação de Bogoliubov, permite a construção de qubits térmicos em um computador quântico da IBM, tornando mais intuitivo para os desenvolvedores de algoritmos quânticos. Por fim, este trabalho fornece uma introdução a área da DCT mediada pela computação quântica de modo acessível a professores e estudantes de graduação.

#### 4 Arquitetura da computação

37. G. P. L. M. Fernandes, A. C. Ricardo, F. R. Cardoso e C. J. Villas-Boas. Íons Aprisionados como Arquitetura para Computação Quântica. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **45**, (2023). O objetivo deste artigo é apresentar as características que garantem aos sistemas de íons aprisionados a condição de arquitetura que permite implementar o computador quântico. O algoritmo de teletransporte quântico é implementado e discutido como aplicação desta arquitetura. Por fim, são apresentadas as vantagens e limitações desse sistema.

#### 5 Historiográficos

38. A. Caldeira. Feynman, dissipação e computação quântica. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **40**, 4, (2018). Neste trabalho de cunho celebrativo, as contribuições de Richard Feynman para as áreas de dissipação e computação quântica são apresentadas. O texto pode ser dividido em uma parte sobre dissipação quântica e outra sobre computação quântica. Na seção destinada às contribuições de Feynman na gênese da computação quântica evidencia-se que sua primeira palestra sobre o tema ocorreu no encerramento de um evento sobre os fenômenos quânticos dissipativos.

#### D. Criptografia quântica

A Criptografia Quântica é uma área que se concentra na segurança da transmissão de informações e dados. Nesta categoria trazemos dois artigos que abordam protocolos de chaves quânticas.

##### 1 Chaves quânticas

39. G. Rigolin e A. A. Rieznik. Introdução à criptografia quântica. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **27**, 4, p. 517–526, (2005). Os quatro protocolos de distribuição de chaves quânticas que fundaram a área da criptografia quântica são apresentados em uma linguagem acessível a estudantes de graduação em Física. A discussão inicia com uma breve contextualização sobre a importância da transmissão de informações de forma secreta em que apenas o emissor e o receptor têm acesso à informação. O problema de utilizar um canal clássico de transmissão de informação é que não há garantias de que a informação foi transmitida com absoluta segurança, existe a possibilidade de um terceiro participante estar interceptando esse canal. Por outro lado, em um canal quântico o transmissor e o receptor têm certeza de que a mensagem foi transmitida em segurança, pois as leis da mecânica quântica garantem isso. Após a contextualização inicial os autores apresentam os protocolos BB84,

E91, BBM92 e B92, enfatizando os conceitos físicos que dão subsídios a esses protocolos quânticos. Ao final do artigo, os autores reforçam a acessibilidade do texto para os graduandos em Física e recomendam o ensino de Criptografia Quântica em cursos de Física, bem como o ensino dos protocolos apresentados.

40. A. Camargo, L. O. Pereira, W. F. Balthazar e J. A. O. Huguenin. Simulação do protocolo BB84 de criptografia quântica utilizando um feixe laser intenso. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **39**, 2, (2017). Um experimento simples para simular a distribuição de chaves criptográficas através do protocolo BB84, possibilitando uma demonstração dos princípios de funcionamento do protocolo BB84 é apresentado. A apresentação deste experimento pretende estender as discussões básicas sobre informação quântica para o campo experimental. O experimento pode ser utilizado em laboratórios didáticos de cursos de Física e Engenharia.

#### E. Aplicações de Computação Quântica

Embora existam diversas áreas de aplicação da computação quântica, na RBEF apenas um artigo é destinado a uma dessas áreas. O artigo apresenta uma introdução da computação quântica aplicada ao mercado financeiro.

##### 1 Finança Quântica

41. A. Canabarro, T. M. Mendonça, R. Nery, G. Moreno, A. S. Albino, G. F. Jesus e R. Chaves. Quantum finance: um tutorial de computação quântica aplicada ao mercado financeiro. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **44**, (2022). Neste trabalho são explorados os fundamentos da computação quântica em uma investigação de um problema do mercado financeiro: a otimização de portfólio. A solução para o problema é baseada no *Quantum Approximate Optimization Algorithm* (QAOA). Por fim, é disponibilizado um tutorial em um Jupyter Notebook sobre os principais conceitos da computação quântica aplicados ao mundo das finanças com códigos tanto clássicos quanto quânticos para a resolução da otimização de portfólio.

#### F. Proposições pedagógicas

Nesta categoria temos um artigo que traz atividades experimentais para aprendizagem de aspectos da computação quântica. Quatro artigos que propõem o ensino de elementos de Computação Quântica e o complemento do ensino de Mecânica Quântica a partir da plataforma de Computação Quântica da IBM. Por último, trazemos dois artigos que abordam de forma didática os conceitos de dualidade onda-partícula e o princípio da incerteza.

## 1 Aplicações de mecânica quântica para a computação quântica

42. J. Castrillón, O. Freire Júnior e B. Rodriguez. Mecânica quântica fundamental, uma proposta didática. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **36**, 1, (2014). Seis seqüências didáticas são apresentadas, enfatizando o aspecto fenomenológico da teoria quântica, justificando, portanto, seus conteúdos. Os aspectos de computação quântica surgem como atividades experimentais sobre aplicação dos conceitos de superposição e entrelaçamento, reforçando a importância de se atribuir significado ao formalismo matemático da mecânica quântica e como é possível aplicar este formalismo em desenvolvimento tecnológico.

## 2 Ensino de mecânica quântica e computação quântica

43. A. C. Santos. O Computador Quântico da IBM e o IBM Quantum Experience. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **39**, 1, (2016). O computador quântico da IBM e sua plataforma *IBM Quantum Experience* (IBM-QE) são apresentados tanto como proposta didática, quanto como divulgação científica. Os autores destacam o potencial didático da ferramenta IBM-QE quando conceitos de computação e informação quântica são introduzidos.
44. W. R. M. Rabelo e M. L. M. Costa. Uma abordagem pedagógica no ensino da computação quântica com um processador quântico de 5 q-bits. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **40**, 4, (2018). O objetivo do artigo é investigar o IBM-Q<sup>3</sup> como recurso pedagógico para o ensino de conceitos básicos de computação quântica. Uma proposta de ensino utilizando a plataforma da IBM-QE é apresentada pelos autores. Um roteiro de quatro projetos de circuitos quânticos é apresentado e os resultados obtidos sugerem que o computador quântico da IBM é uma ferramenta pedagógica eficaz para uso em tarefas como montagem e execução de blocos simples de circuitos quânticos e também para análise de algoritmos quânticos mais avançados.
45. É. M. Alves, F. D. S. Gomes, H. S. Santana e A. C. Santos. Simulating single-spin dynamics on an IBM five-qubit chip. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **42**, (2020). Neste artigo, os autores demonstram a potencialidade da plataforma IBM-QE enquanto ferramenta pedagógica para o ensino de mecânica quântica, ressaltando a falta de recursos e implementações experimentais que completam os cursos teóricos. É realizada uma investigação experimental sobre sistemas dinâmicos de spin único que

interagem com campos magnéticos estáticos e dependentes do tempo. Em particular, dois fenômenos são investigados: o comportamento ressonante de um sistema dinâmico de spin único acoplado a um campo magnético rotacionando e a precessão de Larmor. Ao final, os autores incentivam o uso da plataforma IBM-QE como ferramenta complementar para o ensino de mecânica quântica a partir de uma abordagem experimental.

46. G. F. Jesus, M. H. F. Da Silva, T. G. D. Netto, L. Q. Galvão, F. G. O. Souza e C. Cruz. Computação quântica: uma abordagem para a graduação usando o Qiskit. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **43**, (2021). Neste artigo, os autores trazem o Qiskit como um recurso pedagógico para aulas de computação quântica para estudantes de graduação em Física e áreas próximas. O texto é estruturado como um roteiro de aula. Inicialmente, conceitos básicos de computação quântica são apresentados seguidos das ferramentas computacionais necessárias para a realização dos projetos. Os algoritmos de Grover e teleporte quântico são apresentados e executados.
47. C. J. H. Cavalcanti, F. Ostermann, J. S. Netto e N. W. Lima. Teaching wave-particle complementarity using the Virtual Mach-Zehnder Interferometer. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **42**, (2020). Neste artigo, os autores propõem o ensino da complementaridade da dualidade onda-partícula utilizando um Interferômetro de Mach-Zehnder (IMZ) virtual. O formalismo de Dirac é introduzido dentro do contexto do IMZ virtual. A complementaridade onda-partícula é apresentada de modo qualitativo e quantitativo. Conceitos de visibilidade, previsibilidade e indistinguibilidade são discutidos a partir de padrões de interferência intermediários. Por fim, com o objetivo de ilustrar a aplicação desse software em sala de aula, os autores trazem situações vividas por estudantes de graduação em um curso de Física Quântica.
48. G. G. Rosa, N. W. Lima e C. J. H. Cavalcanti. Diferentes proposições do princípio da incerteza para posição e momentum: integrando formalismo matemático, fenomenologia e interpretações no ensino da teoria quântica. *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **44**, (2022). Neste texto, os autores têm como objetivo ampliar as discussões sobre o Princípio da Incerteza fornecendo um panorama geral e uma proposta de exploração didática. O Princípio da Incerteza é explorado de três frentes distintas separadamente: fenomenologia, formalismo matemático e interpretações. No âmbito fenomenológico, o microscópio de raios gama e um elétron passando por uma fenda (experimentos mentais propostos por Heisenberg) são discutidos e deriva-se deles a relação de incerteza. No que diz respeito ao formalismo matemático, quatro derivações históricas são feitas, as de Heisenberg e Weyl para as variáveis posição e momentum e as de Robertson e

<sup>3</sup> O IBM-Q é um processador quântico com 5 q-bits que pode ser acessado remotamente pela plataforma da IBM.

Schrodinger para quaisquer observáveis A e B. Ao final, quatro interpretações do Princípio da Incerteza são apresentadas, divididas em ônticas (intrínseca e estatística) e epistêmicas (erro-perturbação e erro-erro).

## 6. Discussão

Durante a elaboração dessa revisão, foi possível identificar algumas lacunas nas publicações sobre os fundamentos de mecânica quântica que subsidiam a Computação Quântica. Temas como spin, o experimento de Stern-Gerlach e sistemas quânticos abertos possuem apenas um artigo. Alguns temas importantes como o papel dos Espaços de Hilbert no formalismo matemático, as relações entre spin, bits quânticos e o experimento de Stern-Gerlach, a física da teoria clássica da informação e o fenômeno da decoerência são alguns exemplos que merecem certa atenção e podem ser mais explorados.

Também foi possível identificar que há uma grande quantidade de publicações sobre algoritmos quânticos e programação em comparação com outras áreas fundamentais para a Computação Quântica, contudo, algoritmos quânticos importantes não foram explorados com profundidade, como por exemplo o algoritmo de Shor. A partir dessa revisão, sugerimos pelo menos quatro áreas temáticas com grande potencial de pesquisa para os fundamentos da Computação Quântica: Algoritmos Quânticos, Computação Quântica Adiabática, Dinâmica de Campos Térmicos e Arquitetura da Computação. Sem dúvidas existem outras que também requerem atenção da comunidade de pesquisadores, como correção de erro quântico, que aparece na *Resource Letter* sobre Computação Quântica do *American Journal of Physics* [36].

Há uma quantidade razoável de artigos sobre teoria da informação, a relevância desse conhecimento para diversas áreas além da Informação Quântica fica evidente, contudo, há muitas áreas da Informação Quântica a serem exploradas, por exemplo, compressão de dados, redes quânticas e o papel desempenhado pelo emaranhamento quântico na transmissão da informação via canal quântico com ruído, além da criptografia e finança quântica. Outro resultado apontado pela literatura é a carência de artigos sobre aplicações da Computação Quântica em áreas como teletransporte quântico e codificação quântica superdensa. Trabalhos futuros podem suprir essa carência.

Surpreendentemente, encontramos uma quantidade proporcionalmente significativa de artigos com uma preocupação explícita com o ensino de Computação Quântica a nível de graduação (43–46)<sup>4</sup>, um ponto comum a esses artigos é a recomendação da plataforma

da *IBM Quantum Experience* como um recurso pedagógico, configurando-se assim uma possibilidade de futuras pesquisas teóricas e empíricas em Ensino de Física, como por exemplo, aspectos de modelagem didático-científica de algoritmos quânticos.

Sobre o conteúdo dos artigos desse conjunto é reconhecido que os temas e conceitos da teoria quântica são objeto de interpretações, por vezes concorrentes e que apenas o formalismo matemático as unificam. Nesse sentido, sua comunicação para a formação de pessoas por vezes iniciantes na área, na qual se utiliza da expressão verbal explicativa de resultados alcançados pelo formalismo matemático, exige considerável cuidado principalmente com analogias e limites desse tipo de exposição. Considerando a natureza de fronteira desse conhecimento e o aumento esperado de comunicações na área, aconselhamos que se intensifique para as futuras publicações um processo de revisão detalhista para continuar garantindo a qualidade e uniformidade dos tratamentos de acordo com o rigor do formalismo da teoria quântica.

## 7. Considerações Finais

As pesquisas em Teoria da Informação Quântica e sua Computação tendem a aumentar nos próximos anos. Essa é uma área estratégica, tanto do ponto de vista da pesquisa acadêmica quanto do desenvolvimento tecnológico. Se a comunidade científica brasileira deseja ser competitiva nesse cenário, precisa se preocupar com o treinamento de futuros pesquisadores, configurando-se, portanto, uma demanda formativa. É fundamental reconhecer que dado o estágio atual de desenvolvimento das aplicações na área, é recomendado que iniciativas principalmente de ensino, tenham presente o interesse no mercado e das corporações públicas e privadas na área, especialmente no setor de Defesa. As empresas apresentam problemas específicos de segurança e comunicação de dados, automatização, simulação, busca e sensoramento da informação e otimização de processos, que têm atributos para se constituírem em focos de pesquisa e desenvolvimento de soluções para as quais contribuam os jovens físicos, reconhecendo a interdisciplinaridade do campo. Ainda sob o aspecto do ensino a *computação quântica* pode oferecer um caminho para a inovação dos cursos de mecânica quântica como um tema original de introdução imediata dos estudantes a questões de pesquisa e de interesse tecnológico atuais. Assim como outras *Resource Letters*, nosso objetivo com este artigo de fundamentação era reunir os trabalhos publicados na RBEF pertinentes à área como contribuição da comunidade científica para os fundamentos necessários a essa visão complementar do desenvolvimento da computação quântica. Nesse sentido é desejável que a comunidade científica continue submetendo suas comunicações na área atentando para aqueles temas, como a teoria matemática da comunicação, que possam garantir a

<sup>4</sup> Ressaltando que esses artigos são os que compõem a lista de artigos classificados, portanto, não constam na lista de referências ao final do artigo.

completude do esforço da RBEF. A partir disso, esperamos contribuir com estudantes, professores e pesquisadores em física, que tenham interesse em desenvolver pesquisa ou incorporar as temáticas da área em cursos de graduação e pós-graduação, inclusive como perspectiva moderna de abordagem dos fenômenos quânticos sob a ótica do conceito de informação e suas aplicações. A oportunidade dessa nota foi apontada aos autores pelo Prof. Silvio R. A. Salinas, a quem agradecemos. Ele sugeriu o modelo das *resource letters* e orientou-nos na sua execução.

## Agradecimentos

O professor Nathan Willig Lima agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade. O aluno de Mestrado em Ensino de Física Fernando Shinoske Tagawa de Lemos Pires e o Professor Nathan Willig Lima agradecem a Capes pela verba PROEX auferida ao programa de pós-graduação em ensino de Física da UFRGS (PPGenFis).

## Referências

- [1] American Journal of Physics, *AJP Resource Letters*, disponível em: <https://www.aapt.org/Publications/AJP/resLetters.cfm>.
- [2] A.O. Caldeira e A.J. Leggett, *Annals of Physics* **149**, 2 (1983).
- [3] A.O. Caldeira e A.J. Leggett, *Phys. Stat. Mech. Its Appl.* **121**, 3 (1983).
- [4] M. Brune, J.M. Raimond, P. Goy, L. Davidovich e S. Haroche, *Phys. Rev. Lett.* **59**, 17 (1987).
- [5] Y. Aharonov, L. Davidovich e N. Zagury, *Phys. Rev. A.* **48**, 2 (1993).
- [6] A.O. Caldeira, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **40**, 4 (2018).
- [7] L. Davidovich, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **37**, 4 (2015).
- [8] W. Heisenberg, em: *Sources of Quantum Mechanics*, editado por B.L. Van der Waerden (North Holland Publishing Company, Amsterdam, 1967), v. 1.
- [9] C. Cohen-Tannoudji, B. Diu e F. Laloe, *Quantum mechanics* (Wiley-VCH Verlag GmbH, New York, 2019), v. 1.
- [10] J.J. Sakurai, *Modern Quantum Mechanics* (Addison-Wesley, Estados Unidos, 1994).
- [11] D. Griffiths, *Introduction to Quantum Mechanics* (Cambridge University Press, Reino Unido, 2016).
- [12] O. Pessoa Jr, *Conceitos de Física Quântica* (Livraria da Física, São Paulo, 2020), v. 1.
- [13] C.E. Shannon e W. Weaver, *The Mathematical Theory of Communication* (The University of Illinois Press, Illinois, 1964).
- [14] A.M. Turing, *Proceedings of the London Mathematical Society* **42**, 1 (1937).
- [15] J. von Neumann, *IEEE Annals of the History of Computing* **3**, 3 (1981).
- [16] W. Pauli, *Zeitschrift für Physik* **31**, 765 (1925).
- [17] M. Born, *Zeitschrift für Physik* **37**, 863 (1926).
- [18] P.A.M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics* (Oxford University Press, Oxford, 1930).
- [19] J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (Princeton University Press, New Jersey, 1955).
- [20] A. Einstein, B. Podolsky e N. Rosen, *Physical Review* **47**, 777 (1935).
- [21] N. Wiener, *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine* (MIT Press, Paris, 1948).
- [22] I. Walmsley e P. Knight, *Optics and Photonics News* **13**, 11 (2002).
- [23] D.P. DiVicenzo, *Fortschr. Phys.* **48**, 771 (2000).
- [24] M.M. Wilde, *Quantum Information Theory* (Cambridge University Press, Cambridge, 2013).
- [25] N.D. Mermim, *Quantum Computer Science: An Introduction* (Cambridge University Press, Cambridge, 2007).
- [26] V. Vedral, *Introduction to Quantum Information Science* (Oxford University Press, Oxford, 2007).
- [27] R. Balian, *From Microphysics to Macrophysics: Methods and Applications of Statistical Physics* (Springer-Verlag, Berlim, 1991).
- [28] C.A. Fuchs, arXiv:quant-ph/0106166 (2001).
- [29] M. Mézard e A. Montanari, *Information, Physics, and Computation* (Oxford University Press, New York, 2009).
- [30] M. Tisoc e J.V. Beltrán, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **44**, e20220055 (2022).
- [31] C.S.O. Yokoi, Notas de aula do curso de Mecânica Estatística (IFUSP, São Paulo, 1990).
- [32] National Science Foundation, *Quantum Information Science: An Emerging Field of Interdisciplinary Research and Education in Science and Engineering*, disponível em: <https://www.quantum.gov/publications-and-resources/publication-library/>.
- [33] Office of Science and Technology Policy, *Advancing Quantum Information Science: National Challenges and Opportunities*, disponível em: <https://www.quantum.gov/publications-and-resources/publication-library/>.
- [34] O. Freire Jr., O. Darrigol, A. Kojevnikov, G. Bacciagallupi, C. Joas, O. Pessoa Jr e T. Hartz, *The Oxford Handbook of the History of Quantum Interpretations* (Oxford University Press, Oxford, 2022).
- [35] F. Ostermann e S.D. Prado, *Rev. Bras. Ens. Fis.*, **27**, 2 (2005).
- [36] F.W. Strauch, *Am. J. Phys.* **84**, 495 (2016).