

---

KIT QUANTUM (Q)

# Entrelaçamento:

Laboratório para Alunos do Ensino Médio

*Manual do Aluno/a*



WOMEN SUPPORTING  
WOMEN IN THE SCIENCES

## Conhecer um Cientista



Linda Bih

Numfor

*Aluna de doutoramento, Nelson Mandela African Institution of Science and Technology, Arusha e WS2 Lab Kit Design, Entanglement*

Sobre mim:

Recentemente, defendi meu doutoramento em

Ciência e Engenharia de Materiais pelo Instituto Africano de Ciência e Tecnologia Nelson Mandela, em Arusha, Tanzânia, e minha pesquisa de doutoramento se concentrou em tratamento de águas residuais, biocarvão, cerâmica, geopolímeros e materiais de construção sustentáveis. Como cientista de materiais com formação em química, também sou apaixonado por ciência quântica devido ao seu potencial de inovação na área. Acredito que fomentar a compreensão da ciência quântica desde o início pode inspirar a próxima geração de cientistas a enfrentar desafios globais.

Qual é a minha filosofia? Ao longo da minha carreira, segui um princípio que me guiou: "Tenho meu próprio caminho e o seguirei com diligência e propósito". Essa filosofia me permitiu focar no meu próprio desenvolvimento, em vez de me comparar aos outros. Tem sido uma jornada de aprendizado contínuo, resiliência e dedicação, onde cada desafio foi enfrentado com determinação e cada sucesso foi reflexo de um esforço consistente.

# Declaração de missão

A missão deste laboratório é ensinar alunos do ensino médio (idades entre 12 e 18 anos) sobre entrelaçamento e medição de estados entrelaçados por meio de experimentos e actividades análogas.

## Conteúdo

1. Introdução aos kits de laboratório WS2 .....	5
1.1. Informações sobre o WS2 .....	5
1.2. Vocabulário-chave.....	5
1.3. Pergunta-chave.....	6
1.4. Objectivo .....	6
2. Contexto dos Tópicos Principais .....	6
2.1. Entrelaçamento e Correlação.....	6
2.2. Lista de Suprimentos .....	8
2.3. Informações de segurança .....	8
3. Experimentos.....	9
3.1. Questões pré-laboratoriais .....	9
3.2. Part I. “Medindo” pelo tacto .....	10
3.2.2. Materiais.....	10
3.2.4. Resultados .....	11
3.3. Parte II: Tangled!.....	15
3.3.1. Informações Adicionais.....	15
3.3.2. Materiais.....	15
3.3.3. Procedimento (trabalho em grupos de 2 ou 4) .....	16
3.3.4. Perguntas pós-actividade.....	17
4. Desafio de Design.....	18
4.1 Questões de Design .....	19
4.2 Esboço de Design.....	20

5. Fontes ..... 21

# 1. Introdução aos kits de laboratório WS2

## 1.1. Informações sobre o WS2

A Women Supporting Women in the Sciences (WS2), uma organização internacional que une e apoia mulheres de nível de pós-graduação e profissional e aliadas em ciência, tecnologia, engenharia e matemática (STEM), recebeu um Fundo de Inovação da Sociedade Americana de Física (APS) em 2020 para formar equipes internacionais a fim de projectar e distribuir kits de laboratório de física e ciência dos materiais de baixo custo para alunos do ensino fundamental e médio, predominantemente na África Oriental. Os kits de laboratório utilizaram recursos locais e incluíram tópicos especialmente relevantes para meninas, a fim de estimular seu interesse por disciplinas STEM. De 2020 a 2023, mais de 5.100 alunos da África Oriental em mais de 40 escolas se envolveram com nossos kits de laboratório, sendo 62% meninas.

A WS2 recebeu seu segundo Fundo de Inovação da APS em 2025 para apoiar outra Iniciativa de Kits de Laboratório, desta vez com foco em tópicos quânticos. Para mais informações sobre a WS2, visite nosso site em [ws2global.org](https://ws2global.org).

O WS2 é patrocinado pelo Fundo de Inovação da APS, pelo Fórum APS sobre Educação, pelo Centro de Pesquisa em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Northwestern e pelo Departamento de Assuntos Estudantis Multiculturais da Universidade Northwestern. O WS2 é extremamente grato aos voluntários responsáveis pelo projecto do kit de laboratório por seu árduo trabalho e aos consultores externos (SciBridge e Projekt Inspire) por sua orientação. O WS2 também agradece e reconhece o PhysicsQuest (<https://www.aps.org/initiatives/physics-education/physicsquest>) e o Quantum Explorations Student Toolbox (QuEST) pelos experimentos que serviram de base para o conteúdo do kit de laboratório.

## 1.2. Vocabulário-chave

- Quântico – unidade fundamental envolvida nas interações nas escalas atômica e subatômica (exemplos: quantum de luz é fóton; quantum de electricidade é elétron)
- Entrelaçamento – fenômeno em que duas ou mais partículas quânticas se ligam de modo que a medição do estado de uma determina instantaneamente o estado da outra, independentemente da distância
- Superposição – a ideia de que uma partícula quântica pode existir em vários estados ao mesmo tempo até ser medida ou observada

- Medição – o processo de observação de um sistema quântico que força o sistema a se tornar um estado único e definido

### 1.3. Pergunta-chave

- Como o entrelaçamento é definido na mecânica quântica?

### 1.4. Objectivo

O objectivo deste manual de laboratório é introduzir o entrelaçamento quântico por meio de actividades e experimentos. Os alunos refletirão sobre como partículas entrelaçadas em superposição podem ser medidas para compreender informações sobre ambas as partículas instantaneamente, independentemente da distância entre elas. Isso será demonstrado analogamente com bolas, utilizando a "medição" pelo tacto, e com um jogo.

## 2. Contexto dos Tópicos Principais

### 2.1. Entrelaçamento e Correlação

Você já jogou uma moeda para o alto e esperou para ver se daria cara ou coroa? E se a moeda pudesse dar cara e coroa ao mesmo tempo até você olhar para ela? Essa ideia estranha é chamada de superposição e é um conceito-chave na mecânica quântica, que é basicamente o estudo da matéria em escalas muito pequenas. Na verdade, quântico significa a menor unidade de algo. Agora imagine que você tem dois balões de cores diferentes, um azul e um vermelho. Agora você dá um balão para um amigo do outro lado do mundo e fica com o segundo balão, mas ainda não sabe as cores dos balões. Se fossem balões quânticos, diríamos que os balões estão em estados de superposição, o que significa que são vermelhos e azuis. Esses balões quânticos também têm outra propriedade interessante: estão interligados, também conhecida como correlacionados. Assim que você verifica a cor de um balão, instantaneamente sabe a cor do outro, mesmo que eles estejam em lados opostos do mundo. Essa conexão misteriosa é conhecida como entrelaçamento e também ocorre

em sistemas quânticos. O entrelaçamento fornece correlações instantâneas entre duas coisas após a medição, que é o processo de observação que força o estado de algo a se tornar definido (e não em um estado de superposição).

Então, como funcionam esses efeitos quânticos? Quando uma partícula quântica, como um fóton, que é a menor unidade de luz, não está sendo observada, ela existe em uma mistura de múltiplas possibilidades. Mas, no momento em que é medida, ela "escolhe" um estado definido. Da mesma forma, partículas entrelaçadas permanecem misteriosamente ligadas, resultando de uma interação em algum momento de sua história. Essa ligação ou correlação significa que a medição de uma determina instantaneamente o estado da outra (como demonstrado visualmente na Figura 1), independentemente da distância entre elas. Isso desafia nossa compreensão cotidiana de causa e efeito.

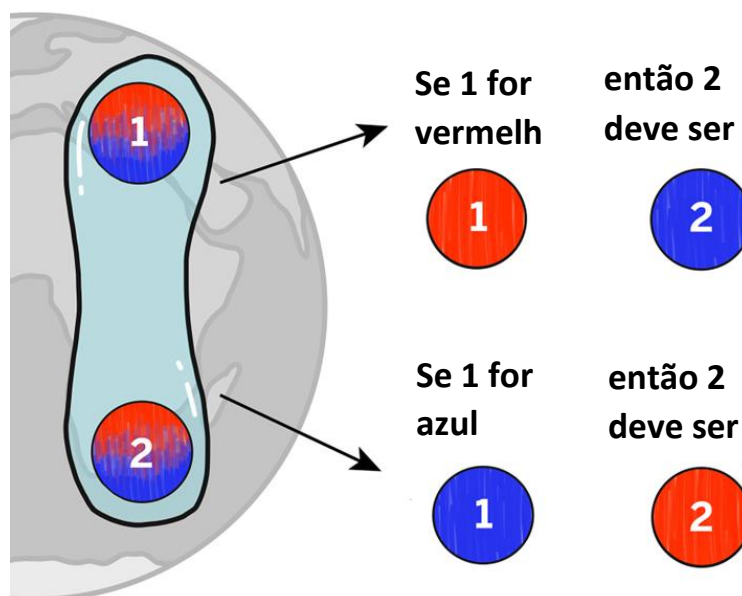


Figura 1. Uma demonstração da regra do entrelaçamento usando partículas entrelaçadas de duas cores, onde se a primeira partícula for vermelha, sabemos imediatamente que a segunda partícula é azul, e vice-versa. Fonte: <https://quantumatlas.umd.edu/entry/entanglement/>.

Os cientistas há muito tempo são fascinados por essas estranhas propriedades quânticas, que são diferentes do que é observado em objectos clássicos. Essas ideias foram exploradas teoricamente pela primeira vez por cientistas famosos como Albert Einstein, Niels Bohr e Erwin Schrödinger. Einstein se referiu ao entrelaçamento como "ação fantasmagórica à distância" porque parecia tão bizarro e contraintuitivo. Evidências experimentais provando que os sistemas quânticos se comportam dessa maneira extraordinária surgiram mais tarde, baseadas no trabalho de John Bell, que formulou a desigualdade de Bell para testar os limites do comportamento clássico versus quântico.

Compreender esses comportamentos quânticos é crucial porque constitui a base de muitas tecnologias modernas, incluindo computação quântica, criptografia espaço-espaço, espaço-Terra e sistemas de comunicação. Por exemplo, os protocolos de comunicação quântica formam a base para o teletransporte quântico e a distribuição quântica de chaves (QKD). No teletransporte quântico, o entrelaçamento é usado para transmitir informações quânticas (estado da partícula) sem transferi-la fisicamente. Na QKD, partículas entrelaçadas são usadas para gerar chaves de criptografia comprovadamente seguras. Qualquer tentativa de espionagem interrompe o entrelaçamento, alertando imediatamente os usuários sobre uma violação.

## 2.2. Lista de Suprimentos

- Copos idênticos
- Dois tipos de bolas com pesos muito diferentes (como metal e plástico)
- Marcador
- Tecido (como uma venda)
- Moedas com dois lados transparentes (identificados como cara e coroa)
- Peças de jogo entrelaçadas (cartas de jogo, tabuleiros de jogo, cartões de pontuação impressos)
- Balança (opcional)

## 2.3. Informações de segurança

Antes de os alunos iniciarem o laboratório, levem em consideração as seguintes questões de segurança:

- Ao se deslocar para locais diferentes ou para trás de uma divisória, especialmente com os olhos vendados, fique atento aos obstáculos para evitar acidentes.

## 3. Experimentos

### 3.1. Questões pré-laboratoriais

1. O que significa duas coisas estarem entrelaçadas (em um sentido mecânico quântico)?
2. O que significa algo estar em superposição (no sentido da mecânica quântica)?
3. O que significa medir algo (no sentido da mecânica quântica)?
4. Como você pode forçar algo a estar em um estado definido e não em superposição?

## 3.2. Part I. “Medindo” pelo tacto

### 3.2.1. Questões pré-experimentais

1. Se um item, como uma bola ( imagine que a bola não é uma bola normal, mas uma bola “quântica”), está em um estado de superposição onde é pesado e leve, como você poderia forçá-lo a ter um dos dois pesos?
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
2. Se duas bolas “quânticas” são entrelaçadas de tal forma que, se uma for pesada, a outra deve ser leve, e então as duas bolas são colocadas em estados de superposição, o que a medição do peso de uma das bolas lhe diz instantaneamente sobre a outra bola?

### 3.2.2. Materiais

- Copos
- Dois tipos de bolas com pesos bem diferentes (como metal e plástico)
- Tecido para venda
- Balança (opcional)

### 3.2.3. Procedimento (trabalho em grupos de 2 a 4)

1. Se você tiver uma balança, prossiga para a próxima etapa. Se não tiver uma balança, pule para a etapa 5.
2. Permita que todos no grupo adivinhem os pesos das duas bolas diferentes e registem os palpites.
3. Pese as bolas uma de cada vez e registre os pesos.
4. Anuncie o membro do grupo que chegou mais perto dos pesos correctos.
5. Permita que todos no grupo sintam as duas bolas para entender suas diferenças de peso. Você pode numerar as bolas nº 1 e nº 2 ou dar-lhes nomes para facilitar a identificação.
6. Atribua papéis aos membros do grupo:
  - a. Um aluno será o "preparador".
  - b. Um aluno será o "experimentador".
  - c. Um aluno será o "registador".
7. O registador coloca a venda sobre os olhos do experimentador.
8. O preparador coloca uma bola em um copo cada.
9. O preparador entrega um copo ao experimentador com os olhos vendados.
10. O experimentador adivinha qual bola está no copo que está segurando, bem como no outro copo.
11. O registador registra o palpite.
12. Repita os passos 9 a 11 cinco vezes.
13. O experimentador remove a venda e observa os resultados.
14. Repita os passos 6 a 13 com papéis diferentes para os membros do grupo.

### 3.2.4. Resultados

Use esta tabela para registrar os palpites para os pesos das bolas. Os pesos correctos das bolas podem ser listados na primeira linha.

Nome	Bola #1 Palpite	Mais próximo?	Bola #2 Palpite	Mais próximo?
Peso Correcto				

Use estas tabelas para registrar os palpites do experimentador sobre qual bola está no copo que ele está segurando e qual bola está no outro copo que ele não está segurando. Há várias tabelas para quando os papéis no grupo são reatribuídos.

Registador:

Experimentador:

Julgamento	Adivinhe qual bola está no copo que o experimentador está segurando	Adivinhe se o experimentador não está segurando a bola no copo	Correcto? (Sim ou Não)
#1			
#2			
#3			
#4			
#5			

Registador:

Experimentador:

Julgamento	Adivinhe qual bola está no copo que o experimentador está segurando	Adivinhe se o experimentador não está segurando a bola no copo	Correcto? (Sim ou Não)
#1			
#2			
#3			
#4			
#5			

Registador:

Experimentador:

Julgamento	Adivinhe qual bola está no copo que o experimentador está segurando	Adivinhe se o experimentador não está segurando a bola no copo	Correcto? (Sim ou Não)
#1			
#2			
#3			
#4			
#5			

### 3.2.5. Questões pós-experimento

1. Você consegue perceber facilmente a diferença entre os pesos das duas bolas ao segurá-las?
2. Se descrevermos as bolas nos copos mecanicamente, quais eram seus pesos antes de serem sentidas pelo experimentador?
3. Como o conhecimento do peso de uma bola impactou o conhecimento sobre a outra bola? A distância entre os dois copos/bolas importou?
4. Se descrevermos as bolas nos copos mecanicamente, diríamos que elas estão entrelaçadas ou não? Explique o porquê.
5. Com que frequência o experimentador acertou as bolas nos copos? Se ele não acertou todas as vezes, explique por que você acha que isso aconteceu.
6. Qual era o papel do membro do grupo que era o “preparador” no sentido da mecânica quântica?

## 3.3. Parte II: Tangled!

Esta seção é baseada na actividade Tangled do PhysicsQuest (American Physical Society).

### 3.3.1. Informações Adicionais

A mecânica quântica pode ter algumas consequências notáveis, e é difícil para nós visualizá-las e relacioná-las, visto que só temos experiência com coisas muito grandes em comparação. Considere computadores quânticos que usam qubits em vez de bits clássicos (1s e 0s). O que é um qubit? Um qubit é um sistema que pode estar em uma superposição matemática de dois estados diferentes ao mesmo tempo. Nesta actividade, usaremos uma moeda girando para transmitir a ideia, então vamos pensar no 1 e no 0 como cara (H) e coroa (T) de uma moeda. Para uma moeda honesta, o estado de superposição é metade H e metade T.

Em um computador quântico real, os qubits são implementados usando muitos sistemas físicos diferentes, como spins de elétrons (para cima versus para baixo), estados de energia de um átomo ou íon, ou a direção em pequenos loops de corrente supercondutora. A medição destrói a superposição e produz um resultado probabilisticamente. Em nosso exemplo particular, ela converte a superposição da moeda girando em cara (H) ou coroa (T) com igual probabilidade.

O entrelaçamento pode ocorrer quando há múltiplos qubits. Classicamente, isso não é possível, e múltiplos lançamentos de moedas reais simultâneos não se impactam, mas são independentes e suas probabilidades são dadas por um produto. Em contraste, em um estado entrelaçado, a medição da primeira moeda "quântica" impacta o que é possível para a segunda. Esse tipo específico de estado entrelaçado é chamado de estado de Bell. Neste jogo, você observará a distinção entre o estado clássico de produto e um estado entrelaçado por meio da medição de moedas (qubits).

### 3.3.2. Materiais

- Moedas (ou fichas de pôquer) com cara e coroa claras (ou marcadas com H e T)
- Cartas de jogo
- Tabuleiros de jogo
- Cartões de pontuação impressos

### 3.3.3. Procedimento (trabalho em grupos de 2 ou 4)

1. Pratique girar sua moeda como um pião. Pratique batendo-a para baixo para "medi-la" e batendo-a para pará-la no lugar. Observe a aleatoriedade de suas medições.
2. Familiarize-se com o tabuleiro do jogo e as folhas de pontuação.
3. Se estiverem em grupos de 2, cada pessoa terá uma moeda. Se estiverem em grupos de 4, formem duplas para que duas pessoas joguem contra outras duas pessoas (os membros da equipe podem se alternar girando a moeda).
4. Preencha a parte superior do seu cartão de pontuação e escolha o lado que você está apostando, cara (C) ou coroa (T). Isso determina de qual lado da moeda você marcará pontos.
  - a. Observações: Como os lados são igualmente prováveis, não há vantagem para C ou T. Além disso, um jogador escolher um lado não significa que o outro jogador não possa escolher o mesmo lado. Escolher o mesmo lado não significa que os jogadores obtenham a mesma pontuação.
5. Para cada rodada, escolha um estado de jogo: não entrelaçado, estado entrelaçado 1: deve corresponder ( $\Phi$ ), ou estado entrelaçado 2: deve anti-corresponder ( $\Psi$ ). Recomenda-se que você faça uma de cada estado de jogo por partida, pelo menos no início. Coloque a carta de estado de jogo à vista dos jogadores durante a rodada.
6. Para cada tentativa (entrelaçado) em uma rodada:
  - a. Dois jogadores giram suas moedas (como piões) em direção ao centro de seu tabuleiro individual, de fora da borda. Se a moeda cair ou sair do tabuleiro, pegue-a imediatamente e continue tentando girá-la para o centro.
  - b. O jogador com a primeira moeda a chegar ao meio do tabuleiro bate sua moeda no chão, "medindo-a".
    - i. Se estiver no estado de jogo produto (não entrelaçado), o segundo jogador imediatamente bate sua moeda no chão, "medindo" a sua também.
    - ii. Se estiver em qualquer um dos estados entrelaçados, o segundo jogador "bate" sua moeda entre as mãos, impedindo-a de girar.
      1. Se estiver no estado entrelaçado 1:  $\Phi$ , ele joga sua moeda para que ela corresponda à moeda do jogador um.
      2. Se estiver no estado entrelaçado 2:  $\Psi$ , ele joga sua moeda para que ela fique oposta à moeda do jogador um.

- c. Pontuação do entrelaçado:
  - i. O jogador que chegar primeiro ao meio ganha um ponto de habilidade. Marque isso no cartão de pontuação.
  - ii. Se a moeda medida desse jogador corresponder ao lado escolhido para a rodada, ele ganha um ponto de estado. Marque isso no cartão de pontuação.
  - iii. O segundo jogador não ganha nenhum ponto de habilidade, mas se a moeda dele corresponder ao lado escolhido para a rodada, ele ganha um ponto de estado. Marque isso no cartão de pontuação.
7. Repita o passo 6 quantas vezes forem necessárias para completar a rodada. Por padrão, há 11 tentativas (entrelaçados) por rodada. Ao final da rodada, os pontos de habilidade e estado são somados, resultando na pontuação da rodada.
8. Repita os passos 5 a 7 para cada rodada. O(s) jogador(es) que vencer(em) mais rodadas vence(m).
  - a. Observações: por padrão, há 3 rodadas por jogo, com o estado do jogo trocado a cada rodada (recomendado) para incentivar os jogadores a tentarem cada estado do jogo.
9. (opcional) Tente jogar uma partida em que suas equipes fiquem progressivamente mais distantes umas das outras.

### 3.3.4. Perguntas pós-atividade

1. Em um sentido mecânico quântico, o que a moeda girando representava?
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
2. Observando as linhas de “estado” de todo o jogo, há alguma tendência ou parece aleatório?
  - a. Pergunta complementar: Se você jogasse muitas vezes, o que acha que aconteceria com o número de caras e coroas?

3. O que você observa sobre as linhas de estado para ambos os jogadores na rodada de estado do produto e na rodada de estado entrelaçado?
  
4. O resultado do jogo dependia da distância entre os jogadores? Em termos de mecânica quântica, a que isso se assemelha?
  
5. O que foi mais divertido neste jogo?
  
6. O que foi mais desafiador neste jogo?

## 4. Desafio de Design

O Desafio: Projectar um dispositivo que utilize entrelaçamento e superposição

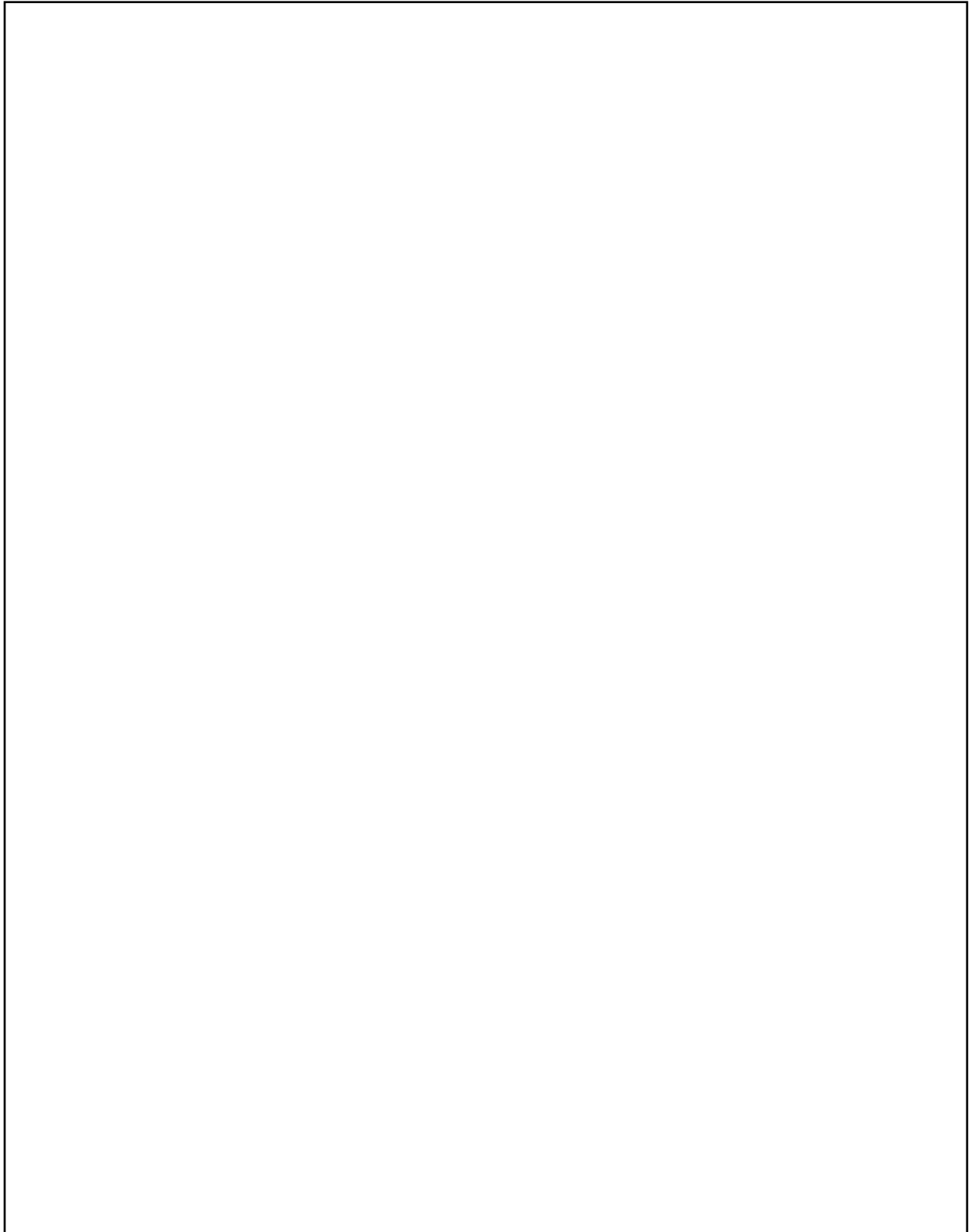
Você aprendeu que o entrelaçamento cria um estado quântico compartilhado entre duas partes ou partículas e que medir uma delas fornece informações sobre a outra (pense nas duas bolas mencionadas anteriormente). Antes da medição, as partículas existiam em superposição, o que significa que existiam simultaneamente em múltiplos estados. Como discutimos anteriormente, existem muitas aplicações intrigantes para entrelaçamento e superposição, incluindo computação quântica, teletransporte quântico e criptografia quântica. Agora, usaremos o que você aprendeu para projectar um dispositivo que possa usar entrelaçamento e/ou superposição para fazer algo útil ou divertido. Para os propósitos deste desafio, você também pode imaginar que o comportamento da mecânica quântica, como entrelaçamento e superposição, se estende a objectos grandes ao seu redor (como balões, copos, bolas, etc.).

## 4.1 Questões de Design

1. Para que o entrelaçamento e a superposição poderiam ser úteis no mundo real? Você pode considerar aplicações no mundo real ou imaginárias, nas quais o entrelaçamento e a superposição se estendem a objectos grandes ao seu redor. Seja criativo e pense de forma ampla.
2. Para que você usará o entrelaçamento e a superposição no seu dispositivo? O seu dispositivo é um dispositivo do mundo real ou imaginário?
3. Como o seu dispositivo atenderá a uma necessidade na sua vida ou na sua comunidade?
4. Que tipos de materiais você precisará para criar o seu dispositivo?

## 4.2 Esboço de Design

Esboce o design do seu dispositivo abaixo.



## 5. Fontes

Entrelaçamento quântico, <https://quantumatlas.umd.edu/entry/entanglement/>.

O que é quântico em física e computação?, por Mary Shacklett e Gavin Wright, <https://www.techtarget.com/whatis/definition/quantum>

PhysicsQuest 2025: Entrelaçado, Sociedade Americana de Física.