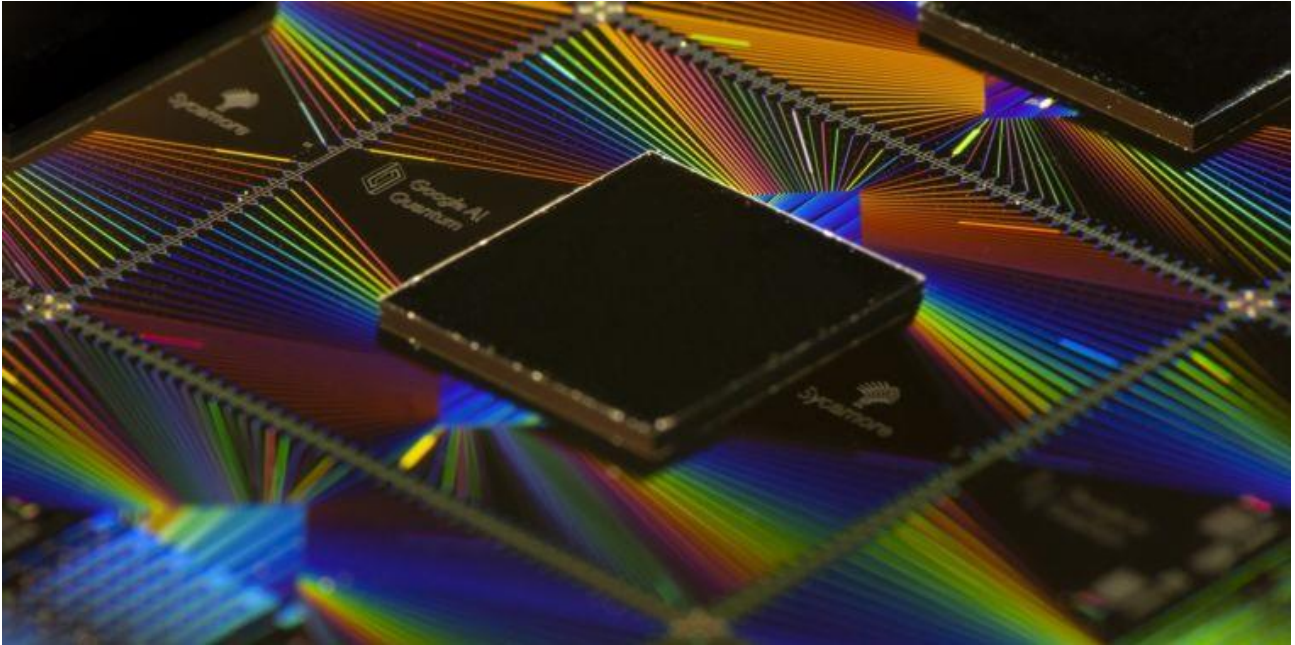


Error Correction



*“To be an Error and to be Cast out is part of God’s Design”
-William Blake*

Trabalho realizado por: Ricardo da Silva Correia

Número: PG47607

Curso: Mestrado em Engenharia Física

UC: Computação Quântica

Docentes: Professor Luís Soares Barbosa e Professor Renato Neves

Conteúdo

Introdução.....	3
Correção de erros no domínio clássico	4
Correção de erros no domínio quântico	6
Aspetos importantes a ter em conta	6
Circuitos quânticos para a correção de erros.....	7
The three qubit bit flip code	7
The three qubit phase flip code.....	12
The Shor code	15
Considerações importantes a reter	18
Abordagem a progressos científicos acerca da correção de erros quânticos. 19	
Conclusão	21
Referências	22

Introdução

Nos sistemas de processamento de informação a presença de **ruído/erros** é algo extremamente comum. Como tal, busca-se construir os sistemas de tal modo que eliminem o ruído completamente, e quando isso não é possível, tenta-se protegê-los contra esses efeitos.

Por exemplo, os componentes dos computadores modernos são extremamente fiáveis, tendo uma taxa de falhas tipicamente inferior a um erro em 10^{17} operações.

Devido a essa reduzida taxa de falhas, assume-se na maior parte dos casos práticos, que os componentes dos computadores são imunes ao ruído.

Por outro lado, existem sistemas que sofrem bastante com a presença de ruído e como tal é necessário implementar técnicas sofisticadas que minimizem/removam o seu efeito. No entanto, os conceitos chave por trás dessas técnicas são facilmente compreendidos.

A **ideia chave** de tudo isto é que se quisermos proteger uma mensagem contra os efeitos do ruído, então devemos codificar a mensagem adicionando alguma **informação redundante**. Assim, mesmo que alguma da informação na mensagem codificada seja corrompida pelo ruído, haverá redundância suficiente na mensagem codificada para que seja possível recuperar ou decodificar a mensagem de modo que toda a informação na mensagem original seja recuperada.

Correção de erros no domínio clássico

No domínio clássico, costuma-se corrigir o efeito do ruído (caso não seja muito elevado) enviando repetições da mensagem que se pretende enviar, assim o recetor consegue perceber qual é a mensagem original mesmo que essa tivesse sido corrompida por ruído em algumas ocasiões.

Para se perceber as possíveis vantagens de se enviar repetições, aqui vai um exemplo:

Suponhamos que se pretende enviar um bit através de um canal ruidoso. O efeito do ruído nesse canal é trocar o bit com uma probabilidade $p > 0$, e tem uma probabilidade de $1 - p$ de não ser trocado:

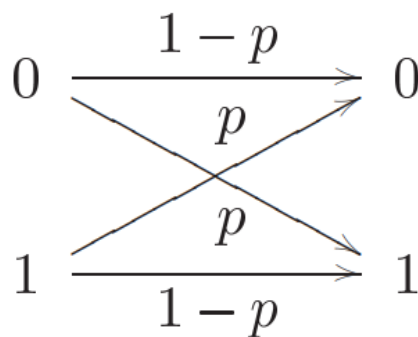


Figura 1 - Esquema do canal ruidoso

Uma forma de proteger este bit contra o efeito do ruído é substituir este bit por 3 cópias de si mesmo:

$$\begin{aligned} 0 &\rightarrow 000 \\ 1 &\rightarrow 111 \end{aligned}$$

É comum chamar às cadeias de bits 000 e 111 como **0 lógico** e **1 lógico**, uma vez que desempenham o papel do bit 0 e do bit 1, respetivamente.

Enviando as 3 cópias do bit que queremos enviar, o recetor vai receber 3 bits e com isso pode decidir qual é o bit original que se pretendia enviar. Suponhamos que o recetor recebeu 001, caso a probabilidade do canal comutar o bit não seja elevada então é provável que o bit 1 tenha sido originado pela comutação do bit 0, e devido a isso o recetor pode concluir que se pretendeu enviar o bit 0.

Este tipo de decodificação baseia-se nos bits que aparecem mais vezes, ou seja, se aparece mais 0's então o bit é o 0, se aparece mais vezes 1's então o bit é o 1.

Neste exemplo, a decodificação falha se dois ou mais bits são comutados, sendo que a probabilidade de isso acontecer é $3p^2(1 - p) + p^3$, e por isso a probabilidade de acontecer um erro passa a ser $p_e = 3p^2 - 2p^3$.

Sem esta codificação, a probabilidade de ocorrer um erro é de p , mas com esta codificação a probabilidade passa a ser p_e . Desta forma este tipo de codificação torna a transmissão mais fiável, $p_e < p$, se $p < 1/2$.

Este tipo de estratégia, designa-se “*repetition code*”, uma vez que se codifica a mensagem a ser enviada através de várias repetições da mesma.

Muitas técnicas sofisticadas foram desenvolvidas na teoria da correção de erros através de códigos clássicos, contudo, a ideia chave é sempre codificar as mensagens acrescentando **redundância** suficiente para que a mensagem original seja recuperável depois do ruído ter atuado sobre a mensagem codificada.

Correção de erros no domínio quântico

Aspetos importantes a ter em conta

Com a exploração e desenvolvimento da computação quântica, surgiu também a necessidade de criar **circuitos de correção de erros quânticos** de forma a proteger os estados quânticos contra o efeito do ruído.

Apesar dos computadores quânticos solucionarem problemas exponencialmente mais rápido (em geral) do que os computadores clássicos, estes são também muito suscetíveis a erros, como ruído externo, gates defeituosas, medições defeituosas, etc.

Um dos grandes pioneiros no que toca a corrigir erros quânticos foi o matemático **Peter Shor**. Ele baseou-se na ideia clássica de repetir as entradas e verificar qual era o “intruso”, fazendo assim uma adaptação quântica da mesma.

Para fazer esta adaptação quântica, ele teve de ter em conta os seguintes aspetos:

- **Teorema da não clonagem:** não se pode, em geral, clonar um estado quântico arbitrário com 100% de probabilidade de êxito.
- **Continuidade dos erros:** podem ocorrer um conjunto de erros contínuos no mesmo qubit. Identificar e corrigir esses erros podem aparentemente necessitar de precisão infinita e recursos infinitos.
- **Medidas destroem o estado quântico:** na correção de erros no domínio clássico observa-se a saída do canal e decide-se o procedimento a adotar. As observações/medições na mecânica quântica, geralmente, colapsam o estado e tornam a sua recuperação impossível.

Apesar destes três aspetos darem a ideia que não se pode utilizar a estratégia clássica abordada no capítulo anterior, Peter Shor provou o contrário. Ele utilizou o entrelaçamento quântico e outras estratégias que abordarei nos circuitos a seguir, de forma a conseguir detetar e corrigir erros que possam acontecer nos qubits.

Circuitos quânticos para a correção de erros

The three qubit bit flip code

Um dos circuitos criados por Shor foi o “**The three qubit bit flip code**”, este consiste no seguinte:

Num dado canal quântico, os qubits são inalterados (sem introdução de erros) com uma probabilidade $1 - p$, e são comutados (introdução de erro) com uma probabilidade p . No fundo, um estado $|\psi\rangle$ é transformado no estado $X|\psi\rangle$ com probabilidade p , sendo X a matriz de pauli x ou por outras palavras o “**bit flip operator**”.

Este tipo de canal designa-se “**bit flip channel**”, e aplicamos sobre ele o “**the three qubit bit flip code**”, que identifica e corrige a presença destes erros (se houver um erro ou menos em todos os qubits).

Para elaborar este tipo de circuito, é necessário codificar o estado $a|0\rangle + b|1\rangle$ em $a|000\rangle + b|111\rangle$ (estado entrelaçado), sendo que esta estratégia respeita o teorema da não clonagem. O estado $|000\rangle$ designa-se **qubit lógico** $|0_L\rangle$ e o estado $|111\rangle$ designa-se **qubit lógico** $|1_L\rangle$. Entende-se por qubit lógico, um qubit que é imune ou parcialmente imune a ruídos, sendo este constituído por qubits físicos.

O circuito capaz de realizar essa codificação é o seguinte:

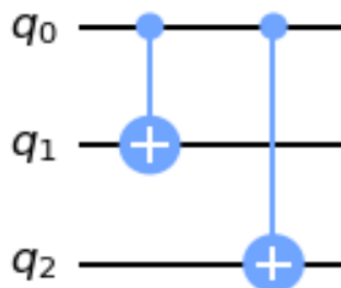


Figura 2 - Criação de qubits lógicos com 3 qubits físicos

Onde q_0 poder ser um estado genérico $a|0\rangle + b|1\rangle$ e q_1, q_2 são do estado $|0\rangle$.

Cada um dos 3 qubits vai passar pelo canal de comutação de bit e devido a isso podem ser introduzidos erros.

Para tentar identificar e corrigir o erro, é necessário aplicar as seguintes etapas:

- **Deteção de erro ou diagnóstico de síndrome:** este tipo de deteção de erros consiste em uma medição/ ou circuito capaz de identificar o erro, sem que colapse ou altere o estado que se pretende analisar. Em geral utilizam-se “**ancilas**”, que nada mais são do que qubits auxiliares, de forma a se poder realizar medições ou alterações sem que o estado a corrigir seja alterado. Este tipo de medições soluciona o terceiro aspeto que se tem de ter em conta para realizar a adaptação quântica.
- **Recuperação:** dependendo do valor do diagnóstico de síndrome, são realizadas operações de forma a recuperar o estado quântico sem erros.
Por exemplo, se o diagnóstico de síndrome indicar que existe um erro bit flip no qubit 0, então a etapa da recuperação aplica uma gate X nesse mesmo qubit.

Com estas estratégias em mente, implementou-se o “**the three qubit bit flip code**” no Qiskit. Como tal utilizou-se a montagem da **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** para criar os qubits lógicos de 3 qubits físicos, e de seguida criou-se um circuito capaz de identificar a origem do erro (deteção de erro ou diagnóstico de síndrome):

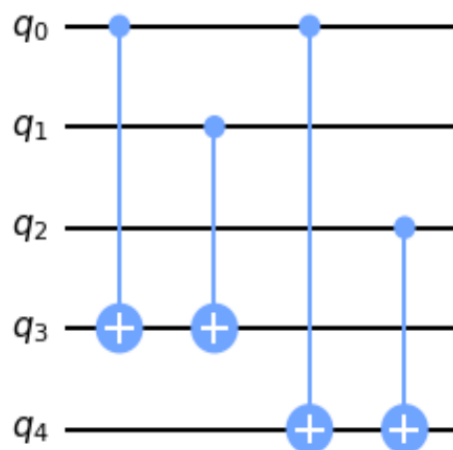


Figura 3 - Circuito de deteção de erros para 3 qubits

Os qubits q_0, q_1 e q_2 são os 3 qubits que compõem o qubit lógico, e os qubits q_3 e q_4 são as ancilas (elas são sempre iniciadas no estado $|0\rangle$).

Caso q_0, q_1 e q_2 sejam $|000\rangle$ então as CNOT nunca são ativas e as duas ancilas mantêm-se no estado $|00\rangle$, ou seja, todos os qubits são iguais e isso quer dizer que não houve nenhum erro

bit flip. Caso q_0, q_1 e q_2 sejam $|111\rangle$ então todas as CNOT são ativas, porém as ancilas mantêm o estado $|00\rangle$ à saída uma vez que as CNOT são aplicadas duas vezes a cada ancila, sendo este mais uma situação na qual não ocorreram erros bit flip.

Se ocorre um erro bit flip no qubit q_0 , ou seja, se este fosse diferente dos outros dois, então as ancilas iam ter à saída $|11\rangle$.

Fazendo a mesma análise para o caso de ocorrer um erro bit flip no qubit q_1 , as ancilas iam ter à saída $|10\rangle$, e para o caso de ocorrer um erro bit flip no qubit q_2 , as ancilas iam ter à saída $|01\rangle$.

Tendo o circuito da detecção de erros bit flip já criado, então teve de se arranjar uma estratégia para conseguir recuperar o estado inicial quando este é sujeito a um erro bit flip (recuperação). Como tal implementei o seguinte circuito, na qual decidi introduzir manualmente um erro bit flip no qubit q_1 :

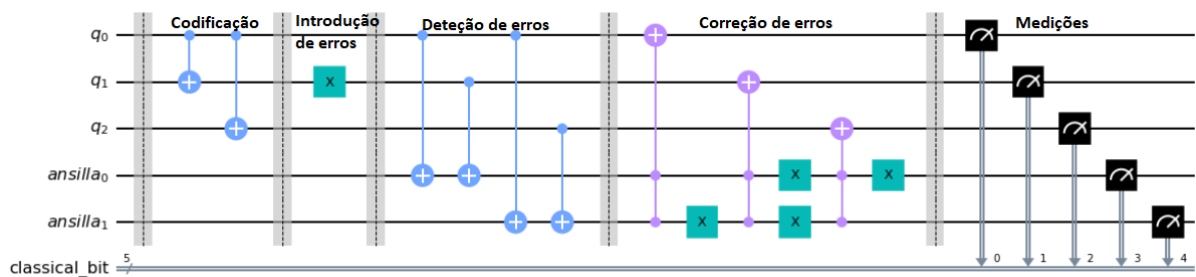


Figura 4 - “the three qubit bit flip code”

Para corrigir este tipo de erros utilizei três gates Toffoli.

Caso não ocorresse erros bit flip, nenhuma gate Toffoli era ativada e por isso o estado era inalterado, se ocorresse um erro bit flip no qubit q_0 apenas a gate Toffoli aplicada a esse qubit era ativada, de forma a comutar o qubit q_0 e recuperar o estado inicial. Para o caso de se introduzir um erro bit flip no qubit q_1 ou q_2 a estratégia é a mesma, só que agora é ativa a Toffoli associada ao respetivo qubit.

Como é de esperar, o resultado das medições foi o seguinte:

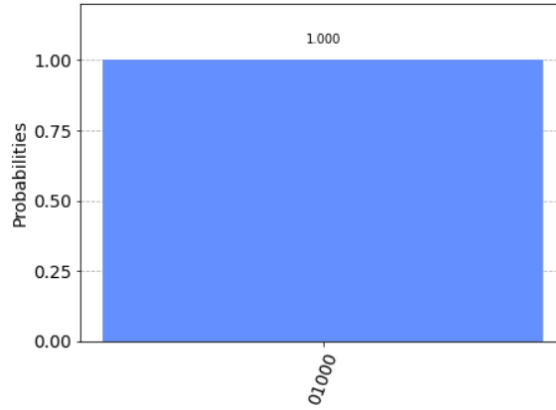


Figura 5 - Gráfico das medidas do circuito da figura 4

Ou seja, obteve-se 00010 à saída com 100% de probabilidade.

Como no circuito acima o estado inicial dos qubits q_0 , q_1 e q_2 são $|0\rangle$, então o produto tensorial resulta em $|000\rangle$, que é exatamente o resultado das medidas à saída do circuito da **Erro! A origem da referência não foi encontrada..**

Os dois últimos qubits são os resultados das ancilas, e tal como vimos atrás, quando ocorre um erro bit flip no q_1 o resultado das ancilas é $|10\rangle$, tal como se verificou nas medições.

De seguida implementou-se uma estratégia de criar erros bit flip automáticos a partir da utilização de mais 3 qubits, na qual utilizava a gate Rx que tem a seguinte forma matricial:

$$R_x = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) & -i\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ -i\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) & \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{pmatrix}$$

Os 3 qubits vão se designar e_0 , e_1 e e_2 , sendo todos iniciados no estado $|0\rangle$.

Aplicando a matriz nos 3 qubits, a probabilidade do estado $|0\rangle$ passar ao estado $|1\rangle$ é de $(\sin\left(\frac{\theta}{2}\right))^2$ e caso isso aconteça então é aplicado um erro bit flip no respetivo qubit q_0 , q_1 e q_2 .

O circuito com essa alteração implementada é o seguinte:

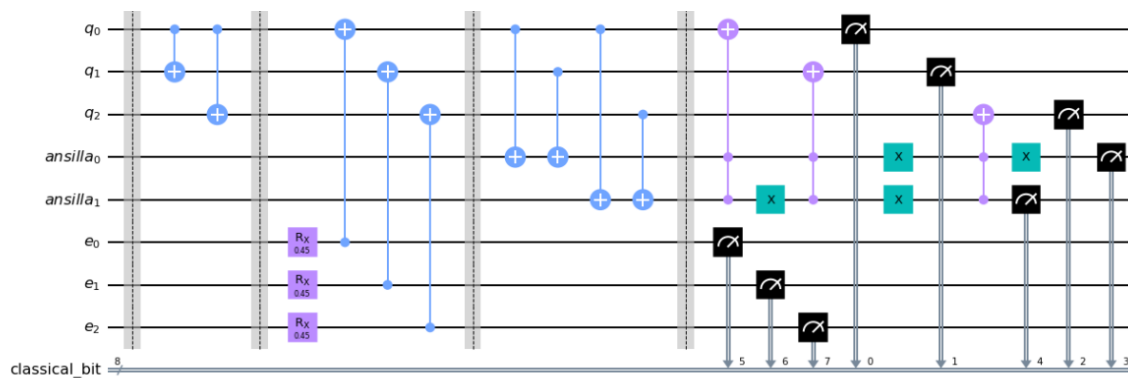


Figura 6 - “the three qubit bit flip code” com erros automáticos

(Retirou-se a última barreira para o circuito caber no mesmo plot)

Para o circuito acima, utilizou-se um $\theta=0.45$, pois assim a probabilidade dos qubits e_0 , e_1 e e_2 passarem a $|1\rangle$ é de apenas 5%.

Como tal os resultados das medidas foram os seguintes:

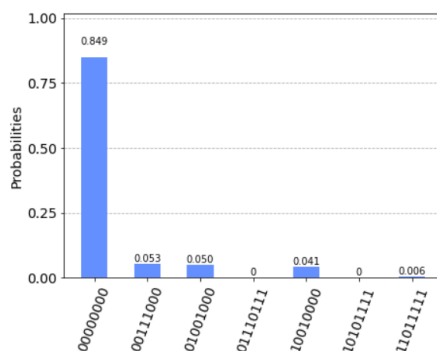


Figura 7 - gráfico das medidas do circuito da figura 6

Na figura podemos ver que:

- em 84.9% dos casos não ocorreram erros;
- em 14.4% dos casos, ocorreu apenas um erro e este foi corrigido;
- em 0.7% dos casos, ocorreu mais que um erro e estes não foram corrigidos.

Realizou-se também experiências para o caso de $\theta=1.16$ (30% de chance de ocorrer erro), $\theta=1.58$ (50% de chance de ocorrer erro) e $\theta=1.99$ (70% de chance de ocorrer erro) sendo os resultados os seguintes:

Para $\theta=1.16$:

- em 32.4% dos casos não ocorreram erros;
- em 46.6% dos casos, ocorreu apenas um erro e este foi corrigido;
- em 21.2% dos casos, ocorreu mais que um erro e estes não foram corrigidos.

Para $\theta=1.58$:

- em 11.8% dos casos não ocorreram erros;
- em 37% dos casos, ocorreu apenas um erro e este foi corrigido;
- em 51.2% dos casos, ocorreu mais que um erro e estes não foram corrigidos.

Para $\theta=1.99$:

- em 2.9% dos casos não ocorreram erros;
- em 17.2% dos casos, ocorreu apenas um erro e este foi corrigido;
- em 79.9% dos casos, ocorreu mais que um erro e estes não foram corrigidos.

Nota: Estes circuitos foram construídos para qubits q_0, q_1 e q_2 todos no estado $|0\rangle$, porém a parte da “codificação” podia ter sido diferente, como colocar estes 3 qubits no estado $|1\rangle$ e depois aplicar o circuito ou até mesmo criar uma “codificação” capaz de criar algo como $a|000\rangle + b|111\rangle$ (utilizando uma gate Rx no qubit q_0 por exemplo). Para qualquer um destes casos este circuito funcionava adequadamente.

Como podemos ver pelos resultados apresentados, este circuito tem melhorias no que toca á correção de erros bit flip caso a probabilidade de um erro ocorrer seja menor que 50%, tal como justificado no caso clássico do capítulo “Correção de erros no domínio clássico”.

Como se pode verificar, o “**three qubit bit flip code**” não acrescenta nada de muito novo relativamente á estratégia clássica. Porém no domínio quântico pode ocorrer erros de fase (erros phase flip), na qual a fase relativa do estado quântico é comutada, sendo que no domínio clássico estes tipos de situações não acontecem.

Devido a isso, Peter Shor criou um novo circuito, o “**three qubit phase flip code**”.

The three qubit phase flip code

Num dado canal quântico, o qubit é mantido inalterado com probabilidade $1 - p$, e a fase relativa de $|0\rangle$ e $|1\rangle$ é comutada com probabilidade p . No fundo o que está a acontecer é que se aplica o **operador Z** com probabilidade p , levando a que o estado $a|0\rangle + b|1\rangle$ passe a $a|0\rangle - b|1\rangle$ e vice-versa.

Para criar o circuito capaz de identificar e corrigir este tipo de erro, segue-se exatamente os mesmos procedimentos e respeita-se as mesmas regras que o “**three qubit bit flip code**”.

Como tal começa-se por criar os **qubits lógicos** através do seguinte circuito:

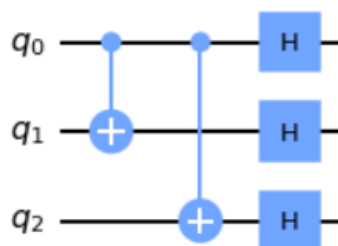


Figura 8- Criação dos qubits lógicos

Onde q_0 poder ser um estado genérico $a|0\rangle + b|1\rangle$ e q_1, q_2 são do estado $|0\rangle$.

O resultado á saída deste circuito é $a|+++ \rangle + b|--- \rangle$.

Nota: $Z|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) = |-\rangle$ e $Z|-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) = |+\rangle$

Tendo os qubits lógicos criados, é necessário criar um circuito capaz de detetar os erros phase flip, tal como se fez no circuito do subcapítulo anterior.

Como tal implementou-se o seguinte circuito:

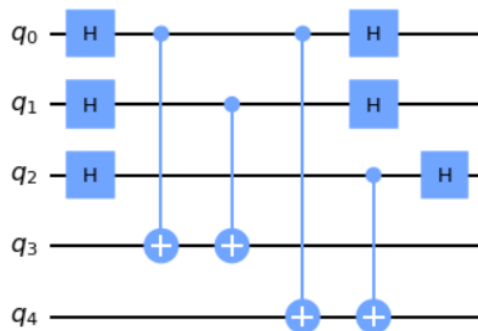


Figura 9 - Circuito para deteção de erros de fase para 3 qubits

Este circuito de detecção de erros é praticamente igual ao realizado no “**three qubit bit flip code**”, apenas se colocou gates de Hadamart antes e depois.

O motivo destas gates de Hadamart é inicialmente converter os qubits lógicos para a base $|0\rangle$ e $|1\rangle$ e realizar exatamente a mesma estratégia de detecção que no circuito “**three qubit bit flip code**”. No final torna-se a aplicar gates de Hadamart de forma a voltar a converter os qubits lógicos para a base $|+\rangle$ e $|-\rangle$.

Quanto ao circuito de correção de erros, foi também muito idêntico ao circuito do subcapítulo anterior, apenas se passou as gates Toffoli a gates Z controladas.

Ou seja, se há um erro no primeiro qubit, basta aplicar a gate Z nele, pois converte um estado $|+\rangle$ em $|-\rangle$ e um estado $|-\rangle$ em $|+\rangle$.

O circuito completo, introduzindo um erro phase flip no primeiro qubit, é o seguinte:

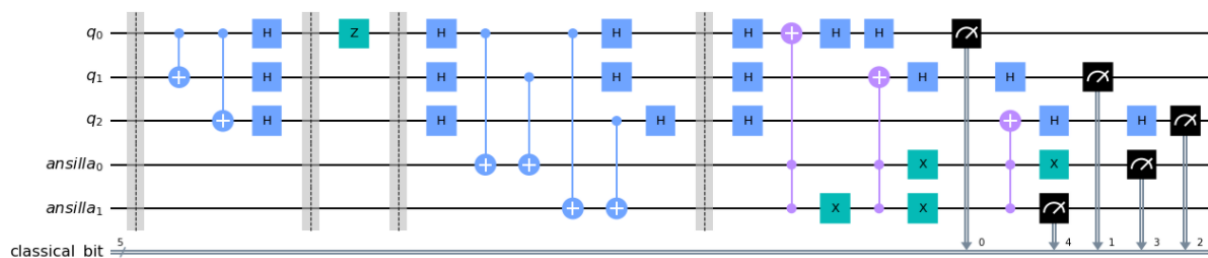


Figura 10 - "The three qubit phase flip code"

Como não encontrei no Qiskit uma gate Z que pudesse ser controlada por mais que 1 qubit, utilizei uma gate Toffoli aplicada ao respetivo qubit, só que precisei de operar com uma gate de Hadamart antes e depois ($H X H = Z$).

Também não encontrei um medidor que medisse na base $|-\rangle$ em $|+\rangle$, como tal tive de colocar antes de cada medidor uma gate de Hadamart de forma a poder converter para a base $|0\rangle$ e $|1\rangle$, que é a base que os medidores da figura medem.

Os resultados das medições para o circuito da figura acima são:

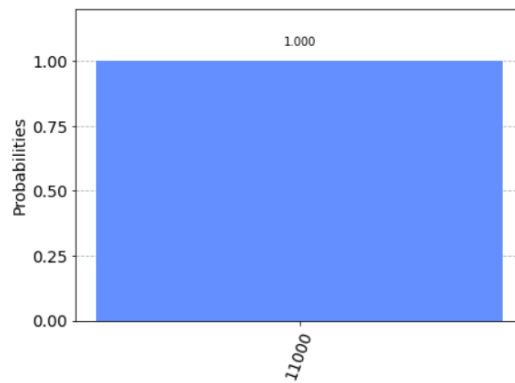


Figura 11 - Gráfico das medidas do circuito da figura 4

Temos mediu-se 00011 em 100% dos casos.

Na figura 10, q_0, q_1 e q_2 estão no estado $|0\rangle$, levando a que a codificação converta esses 3 qubits para $|+\rangle$, ficando por isso com $|+++ \rangle$.

Ao introduzir o erro de fase no primeiro qubit ficamos com $| - + + \rangle$ e o circuito de deteção de erros registou 11, tal como se pode ver no gráfico. Depois apenas se aplicou a gate Z controlada no primeiro qubit passando a ter $| + + + \rangle$ novamente. No final converteu-se o estado $| + + + \rangle$ para a base $|0\rangle$ e $|1\rangle$ e mediu-se os 3 qubits, registando 000 tal como o gráfico mostra, podendo assim concluir que o circuito faz aquilo que é suposto fazer.

Tal como no “**three qubit bit flip code**”, este circuito apenas corrige adequadamente caso ocorra apenas um erro, sendo que a probabilidade de o circuito falhar é também $p_e = 3p^2(1 - p) + p^3$, na qual $p_e < p$ se $p < 1/2$.

De seguida será abordado outro circuito importante nesta temática, sendo ele também criado por Peter Shor.

The Shor code

O “**the Shor code**” é capaz de detetar e corrigir erros arbitrários, ou seja, é capaz de corrigir erros de phase flip, bit flip e até ambos ao mesmo tempo.

Este circuito é um circuito bastante mais sólido e com muita mais utilidade que os dois circuitos falados anteriormente, como tal também é mais complexo. Devido a isso serão apenas abordadas algumas características que acho mais importantes, como a codificação dos qubits lógicos, o comportamento deste circuito para solucionar erros de bit flip e/ou de phase flip e as suas fraquezas.

Para criar os qubits lógicos começa-se inicialmente por codificar de acordo com a codificação adotada no “**three qubit phase flip code**”:

- $|0\rangle \rightarrow |+++\rangle$
- $|1\rangle \rightarrow |--\rangle$

De seguida, codifica-se cada um desses qubits com base na codificação adotada no “**three qubit bit flip code**”:

- $|+\rangle = \frac{|0\rangle+|1\rangle}{\sqrt{2}} \rightarrow \frac{|000\rangle+|111\rangle}{\sqrt{2}}$
- $|-\rangle = \frac{|0\rangle-|1\rangle}{\sqrt{2}} \rightarrow \frac{|000\rangle-|111\rangle}{\sqrt{2}}$

Este tipo de codificação que utiliza a hierarquia dos níveis chama-se **concatenação**.

Esta concatenação necessita de 9 qubits, sendo o resultado o seguinte:

- $|0\rangle \rightarrow |0_L\rangle = \frac{(|000\rangle+|111\rangle)(|000\rangle+|111\rangle)(|000\rangle+|111\rangle)}{2\sqrt{2}}$
- $|1\rangle \rightarrow |1_L\rangle = \frac{(|000\rangle-|111\rangle)(|000\rangle-|111\rangle)(|000\rangle-|111\rangle)}{2\sqrt{2}}$

Circuito que realiza esta codificação:

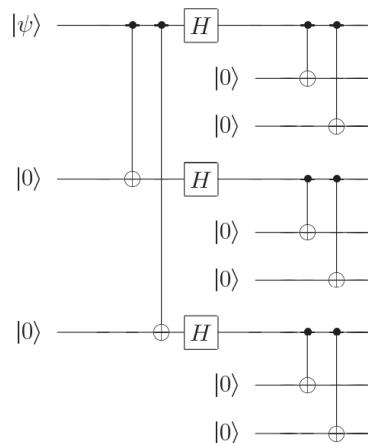


Figura 12 - Circuito de codificação de 9 qubits para o "the Shor code"

E como é que o “**the Shor code**” identifica e corrige caso aconteça, por exemplo, um erro bit flip no primeiro qubit?

Tal como no “**three qubit bit flip code**” são realizadas medições de deteção de erro, onde se verifica se o primeiro qubit é igual ao segundo e se o primeiro qubit é igual ao terceiro, e como

ocorreu um erro bit flip no primeiro qubit, então o primeiro qubit não será igual nem ao segundo nem ao terceiro qubit. Com base nessa medição, realiza-se a correção adequada, que neste caso é simplesmente comutar o primeiro qubit.

E como se identificava um erro de phase flip, que ocorresse por exemplo em algum dos 3 qubits pertencentes ao primeiro conjunto?

Digo em algum dos 3 qubits pertencentes ao primeiro conjunto pois independentemente de qual qubit seja alvo de erro, o resultado será o mesmo.

Para detetar o erro, realiza-se também medições de deteção de erro na qual comparam o sinal do primeiro conjunto com o segundo conjunto de qubits e de seguida compara-se o sinal do primeiro com o terceiro conjunto. No caso de ter ocorrido um erro phase flip em algum dos qubits do primeiro conjunto, então as medidas de síndrome irão verificar que o sinal do primeiro conjunto é diferente dos outros dois, e como tal faz-se a correção aplicando uma gate Z em qualquer um dos qubits do primeiro conjunto.

E se tivesse ocorrido um erro bit flip e um phase flip no primeiro qubit?

Então este circuito iria detetar primeiro o erro bit flip e corrigia-o e de seguida detetava o erro phase flip e corrigia-o.

Sendo assim o **“the Shor code”** permite corrigir combinações de erros bit flip e phase flip.

Este circuito apresenta também **algumas falhas** tal como os anteriores, como por exemplo não conseguir corrigir adequadamente se acontecer um erro bit flip no primeiro qubit e outro no segundo ou então um erro de phase flip em dois conjuntos diferentes.

Mas apesar disto apresenta melhorias significativas face aos dois circuitos falados anteriormente, proporcionando uma ideia de como os circuitos de correção de erros podem ser trabalhados de forma a serem cada vez mais sólidos, criando qubits lógicos cada vez mais imunes a erros.

Considerações importantes a reter

Com a análise dos subcapítulos anteriores, nomeadamente os circuitos apresentados, verificou-se que se pode criar circuitos que criam qubits lógicos cada vez mais imunes a erros, para tal são necessários mais qubits físicos de forma a introduzir mais redundância, e também de mais gates para se realizar as operações necessárias. Esta complexidade que cresce com a melhoria dos qubits lógicos introduz algumas limitações na correção de erros, uma delas é que para criar um circuito composto por um número adequado de qubits lógicos, com uma grande imunidade a erros, são necessárias umas dezenas ou até centenas de qubits físicos, sendo que o máximo de qubits físicos que existe num computador quântico é 127 (Eagle da IBM), sendo por isso uma limitação. Outra limitação é que a utilização de mais qubits físicos e gates faz com que o sistema se torne mais instável.

No fundo, estas duas limitações são os “calcanhares de Aquiles” da correção de erros quânticos, porém os investigadores mostram-se otimistas e acreditam que ambas as limitações vão ser ultrapassadas com o passar dos anos e que num futuro próximo se possam construir computadores quânticos com uma grande imunidade a erros, tal como se vê hoje em dia nos computadores clássicos.

Abordagem a progressos científicos acerca da correção de erros quânticos

Para além de explicar como alguns erros quânticos podem ser resolvidos, achei de igual forma importante falar sobre os progressos científicos acerca da correção de erros quânticos que têm sido falados ultimamente.

Como tal decidi fazer um breve resumo e análise a uma notícia que saiu no dia 19 de dezembro de 2021 no site “physicsworld”, denominada “Physicists achieve fault-tolerant control of an error-corrected qubit”.

Nesta notícia, é falado que um grupo de investigadores da Universidade de Maryland, nos EUA, utilizaram um determinado método de correção de erros de forma a mostrar a tolerância a falhas em um único qubit lógico, demonstrando todas as etapas de preparação, gates lógicas e a respetiva correção de erros.

Os qubits, nesta experiência, consistiam em iões de itérbio suspensos em cima de uma “armadilha de Pauli de radiofrequências” e controlados por feixes laser individuais. As vantagens de usar iões presos em vez de qubits supercondutores (que são os preferidos em muitas empresas de computação quântica) é que incluem taxas de erros mais baixas e melhor conectividade entre qubits, embora utilize uma tecnologia mais avançada para os poder criar.

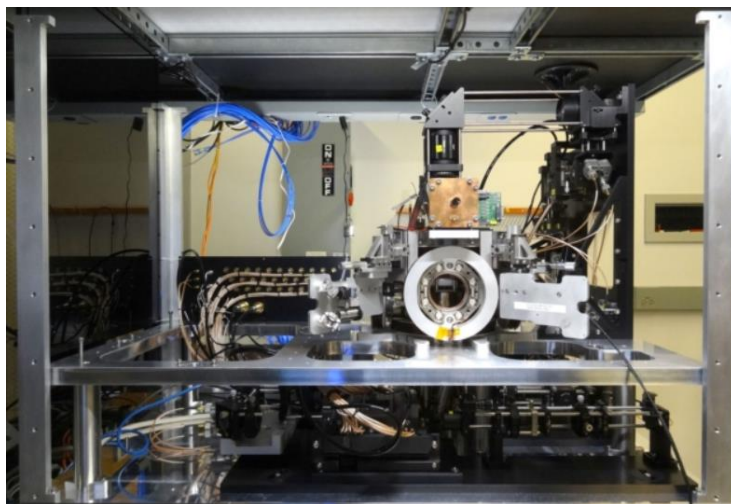


Figura 13 - O computador quântico de iões suspensos numa armadilha de Pauli de radiofrequências usado pela equipa de Maryland para demonstrar o controlo tolerante a falhas de um único qubit lógico

O método de correção de erros utilizado pela equipa de investigadores foi o “**Bacon-Shor code**”, na qual utilizava 13 qubits, onde 9 deles eram qubits físicos utilizados para codificar o qubit lógico e 4 qubits eram utilizados como auxiliares.

Com esse método, os investigadores mostraram que podiam controlar os estados dos qubits lógicos de maneira tolerante a falhas e corrigir quaisquer erros de qubit únicos que ocorressem. A equipa também mostrou que as taxas de erro no qubit lógico eram menores do que as taxas de erro correspondentes a usar um protocolo tolerante a falhas.

A notícia também refere que esta equipa de investigadores foi a primeira a mostrar que era possível obter estes resultados sem um protocolo de correção de erros tolerante a falhas, e até então ninguém tinha conseguido mostrar, na prática, o comportamento de um qubit lógico quando sujeito a erros.

A equipa também espera conseguir fazer com que os qubits lógicos superem os físicos, sendo que um dos seus próximos objetivos é tentar manter um estado quântico livre de erros ao longo do tempo, realizando a correção de erros repetidamente. Para realizar este passo, será necessária a deteção de erros no meio do circuito, onde os iões são fisicamente separados para que alguns possam ser medidos sem afetar os outros. A parte difícil é que, quando se volta a “montar” os iões, estes podem aquecer e por isso é necessário implementar um sistema de arrefecimento de iões, sem que isso destrua a informação quântica.

Por fim esta notícia refere que esta equipa também pretende demonstrar o controlo de falhas entre dois qubits, sendo que para fazer isso eles pretendem implementar uma série de operações quânticas.

Ao analisar esta notícia, pode-se verificar mais uma vez que a correção de erros quânticos tem vindo a alcançar novas metas, através de equipas dedicadas área, possibilitando que num futuro próximo os computadores quânticos sejam praticamente imunes a erros.

Conclusão

A elaboração deste trabalho permitiu-me compreender melhor a temática dos erros quânticos, que até então não fazia ideia da sua existência nem dos avanços que a ciência tinha alcançado. Desta forma, tenho agora um conhecimento mais rico acerca deste assunto e com um sentimento de satisfação pessoal por ter conseguido realizar e perceber este trabalho.

Um especial obrigado ao professor Luís Soares Barbosa e ao professor Renato Neves por terem solicitado a realização deste tipo de trabalhos, que na minha opinião acabam por permitir aos alunos uma aprendizagem sólida e bem mais interessante do que os métodos convencionais.

Referências

- Chuang, M. A. (2010). *Quantum Computation and Quantum Information*. USA: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.
- Inspire, Q. (20 de Janeiro de 2015). *Quantim Inspire-By QuTech*. Obtido de Code example: Repetition code: <https://www.quantum-inspire.com/kbase/repetition-code/>
- Violaris, M. (19 de dezembro de 2021). Quantum Computing. *Physicists achieve fault-tolerant control of an error-corrected qubit*, p. 2.
- Yamaguchi, F. (23 de maio de 2005). *QI-School*. Obtido de Quantum error correction: http://www.appi.keio.ac.jp/Itoh_group/spintronics/pdf/QC2005/QI-School-2005-10.pdf