

Dipartimento di Fisica Giuseppe Occhialini

Tesi di Laurea Triennale in Fisica

# Esperimenti su singolo qubit:

# implementazione e caratterizzazione di un quantum classifier

**Candidato:**

Galizzi Federico

**Matricola:**

839936

**Relatore:**

Dr. Giachero Andrea

**Correlatore:**

Dr. Carrazza Stefano

Anno Accademico 2020-2021

Sommario

Nel 1981, alla conferenza *“Physics of Computation Conference”*, Richard Feynman affermò la necessità di utilizzare computer basati sui principi della meccanica quantistica per poter indagare al meglio i fenomeni tipici del mondo atomico e subatomico. Computer quindi in grado di sfruttare effetti quali *entanglement*, interferenza e sovrapposizione di stati che l’informatica classica non utilizzava. Nacquero così i concetti di computer quantistico e *quantum computing.* Da allora, fisici, matematici, informatici e ingegneri hanno avuto a che fare con notevoli sfide da affrontare, tra le quali: le difficoltà di costruzione di sistemi così sofisticati e la stesura di algoritmi che possono effettivamente essere svolti da *device* quantistici. A quarant’anni da quella storica conferenza, IBM, che fu tra le promotrici dell’evento, offre un servizio cloud gratuito per imparare ad utilizzare computer quantistici, ad interagire con questi e per testare algoritmi che si basano sui principi del quantum computing. Il lavoro di tesi qui presentato è stato possibile grazie a questo servizio.

Il principale argomento di studio di questa tesi è il bit quantistico, comunemente chiamato *qubit*. Nel primo capitolo viene introdotto il concetto di qubit, presentandolo inizialmente come oggetto puramente matematico; astrazione con la quale i pionieri di questa nuova branca dell’informatica hanno lavorato. Tra essi si ricordano Peter Shor, David Deutsch e Richard Josza a cui si devono gli omonimi algoritmi verificati anni dopo la loro ideazione. Già su piano teorico, infatti, è possibile discutere circa cosa sia possibile e cosa impossibile fare con un qubit. In particolare, si presterà attenzione a come trarre vantaggio da un sistema che può essere in una qualsiasi combinazione di stati ma dal quale si può estrarre informazione classica solo attraverso un’operazione di misura; operazione che è assunta essere proiettiva da uno degli assiomi della meccanica quantistica. Proprio come per i bit tradizionali, gli unici risultati ottenibili da una singola misura applicata ad un qubit sono 0 e 1; indicati anche con |0> e |1>, in notazione di Dirac, per distinguerli dal caso classico.

A questa trattazione seguirà un’altra che più si avvicina alla realizzazione di un computer quantistico elencando e commentando i criteri di Davide DiVincenzo che, nel 2000, propose i requisiti minimi che un computer dovesse avere per essere adatto al quantum computing. Questi criteri, da allora, non sono stati alterati e negli anni successivi sono stati soddisfatti da diverse aziende (Google, IBM, Rigetti, D-Wave) con dispositivi che si basano su tecnologie come: difetti nei reticoli di diamanti, trappole di ioni, risonanza magnetica nucleare in molecole (*NMR*), quantum dots, fotoni e circuiti superconduttori. Di questi ultimi verrà fornita l’intera trattazione dell’Hamiltoniana del relativo sistema. Si è deciso di porre particolare attenzione ai qubit superconduttori in quanto su questa tecnologia si basano i computer di IBM, dunque anche il *backend* utilizzato qui per gli esperimenti. La quale scommette sui qubit superconduttori in quanto sono i più promettenti in materia di scalabilità, ossia sembrano essere i sistemi che permetteranno la costruzione di computer con maggior numero di qubit. Recentemente IBM ha annunciato che rilascerà nel 2023 un backend -*ibmq-condor*- costituito di 1121 qubit. Attualmente, il loro computer di punta ne ha 65.

A termine del capitolo 1 si introduce la *IBM Quantum Experience*, il servizio cloud già citato, e i due *framework* Qiskit e QiskitPulse che contengono le librerie necessarie per la scrittura e l’esecuzione di algoritmi su computer quantistici reali. Più precisamente, Qiskit serve per la costruzione di circuiti quantistici atti a svolgere i programmi tipici del quantum computing. QiskitPulse, invece, permette la creazione di programmi a livello di impulsi e consente quindi di avere un maggiore controllo sui qubit. Come usare questa ulteriore possibilità viene mostrato nel capitolo 2, con l’esperimento di caratterizzazione di un qubit; il quale prevede l’utilizzo di impulsi nella banda delle microonde per trovarne la frequenza di risonanza attraverso tecniche di spettroscopia. Trovata questa, si procede con l’ottimizzazione dei parametri d’impulso necessari per implementare un X *gate* (l’analogo della porta NOT dell’informatica classica), grazie al quale si può far passare il qubit dallo stato fondamentale a quello eccitato e viceversa. Successivamente, si mostrano gli esperimenti necessari per la stima di T1 e T2 (i tempi caratteristici di rilassamento e decoerenza), due parametri fondamentali per soddisfare i criteri di DiVincenzo.

Il capitolo 3 si configura come lavoro di ottimizzazione dell’utilizzo di un qubit. Si studia quindi come poter far transire un qubit da uno stato ad un altro in maniera efficiente; un lavoro necessario in termini di affidabilità degli algoritmi di quantum computing.

Nel quarto capitolo si abbandona l’ambito dell’interazione con l’hardware a livello di impulsi per proporre un esperimento di implementazione di quello che potrebbe essere definito “*quantum classifier*”. Sostanzialmente, viene descritto come sia possibile costruire un programma che, attraverso tecniche di *machine learning*, è in grado classificare dei dati in input in una classe precedentemente dichiarata e rappresentata da uno “stato-bersaglio” sulla sfera di Bloch. Compito non banale, in quanto i risultati dei circuiti quantistici restituiscono solo le ampiezze di probabilità di misurare |0> oppure |1>. Di questo programma vengono illustrate due versioni: una basata su un simulatore *ideale* e una basata su un simulatore di backend *reali*. Di quest’ultimo si discuterà l’inefficienza di classificazione raggiunta. L’esperimento è stato proposto con l’intento di mostrare i possibili vantaggi che il quantum computing può dare anche solo con un qubit, sebbene diversi libri di testo e articoli divulgativi individuano nell’entanglement e nell’interferenza (fenomeni che richiedono un numero plurale di qubit) i principali vantaggi dell’informazione quantistica nei confronti di quella classica.

# Indice

### 1 Qubit e IBM Quantum Experience . . . . . . . 1

1.1 Qubit . . . . . . . . . 1

1.2 Operazioni su singolo qubit . . . . . . . 3

1.3 Realizzazione di un qubit . . . . . . . . 4

1.4. Qubit superconduttori . . . . . . . . 7

1.5 IBM Quantum Experience . . . . . . . 8

### 2 Caratterizzazione di un qubit . . . . . . . . 11

2.1 Frequenza di risonanza . . . . . . . . 11

2.2 Calibrazione di impulsi . . . . . . . . 12

2.3 Discriminatore di |0> e |1> . . . . . . . 13

2.4 Tempo di rilassamento (T1) . . . . . . . 14

2.5 Ramsey Experiment . . . . . . . . 15

2.6 Tempo di coerenza (T2) . . . . . . . . 16

### 3 Ottimizzazione dell’utilizzo di un qubit . . . . . . . 19

3.1 Riduzioni di errori dovuti ai gate . . . . . . . 19

3.2 Utilizzo di gate appena calibrati . . . . . . . 21

3.3 As Late As Possible (ALAP) . . . . . . . 23

3.4 Riduzione della durata di singolo gate . . . . . . 24

### 4 Quantum Classifier . . . . . . . . . 27

4.1 Introduzione al problema generale . . . . . . 27

4.2 Problema affrontato . . . . . . . . 28

4.3 Modellizzazione del problema . . . . . . . 28

4.4 Quantum classifier di Qibo . . . . . . . 29

4.5 Quantum classifier in Qiskit . . . . . . . 30

### 5 Conclusioni . . . . . . . . . . 33

### 6 Appendice . . . . . . . . . . 35

### 7 Bibliografia . . . . . . . . . . 50