

## Realizzazione di circuiti quantistici su un processore quantistico reale

**Candidato:** Giulio Biagioni (giulio.biagioni@stud.unifi.it)

**Relatore:** Prof. Alessandro Cuccoli (cuccoli@fi.infn.it)

### Riassunto

Un evento significativo nell'ambito della computazione quantistica è stato il lancio, nel 2016, del progetto IBM Quantum Experience (<https://www.research.ibm.com/ibm-q/>), che permette a chiunque di connettersi via cloud con il processore quantistico della IBM, composto da cinque qubit ("quantum bit", l'unità fondamentale dell'informazione quantistica) superconduttori, appartenenti alla famiglia dei transmon, e di costruire ed implementare circuiti quantistici. L'obiettivo di questa tesi è l'effettuazione di alcuni test di funzionamento della piattaforma IBM, al fine di verificarne la praticità d'uso, l'affidabilità e l'effettiva possibilità di utilizzarla per l'implementazione di algoritmi quantistici.

La prima parte del lavoro (capitoli 1 e 2) è dedicata alla presentazione dei fondamenti della computazione quantistica. Nel primo capitolo viene introdotto il qubit e ne vengono descritte le proprietà in relazione ai postulati della meccanica quantistica, dei quali viene presentata anche la formulazione in termini dell'operatore densità, che permette di trattare in modo naturale anche sistemi quantistici non isolati. Il secondo capitolo è dedicato all'introduzione e descrizione degli elementi di base per la realizzazione di un circuito quantistico: dalle porte logiche a singolo qubit alle porte a più qubit e controllate, fino al processo di misura finale. Sempre nel secondo capitolo vengono descritti più nel dettaglio due circuiti quantistici di base. Il primo, la trasformata di Fourier quantistica, è un elemento fondamentale dell'algoritmo di Shor, un algoritmo quantistico che permette di fattorizzare in numeri primi un numero intero in modo molto più efficiente di quanto non sia in grado di fare un computer classico: l'applicazione su larga scala di tale algoritmo potrà aprire una nuova era per la crittografia e la sicurezza del web, e si capisce quindi come esso rappresenti uno dei risultati nel campo della computazione quantistica che attira maggiore interesse. Il secondo esempio di circuito è la realizzazione dell'algoritmo di Grover, che permette di trovare un particolare elemento in un insieme che ne contiene  $N$  con un numero di operazioni dell'ordine di  $\sqrt{N}$ , contro le  $N$  richieste da un algoritmo classico.

Nella seconda parte della tesi (capitolo 3) vengono presentati alcuni esempi di utilizzazione della piattaforma IBM quantum experience. Dopo aver descritto in breve le proprietà fisiche dei qubit superconduttori di cui è costituito il processore, rilevanti ai fini di una sua corretta utilizzazione, e gli strumenti messi a disposizione per l'accesso al sistema, la programmazione vera e propria del processore quantistico e le modalità di lettura e di interpretazione dello stato di uscita, vengono infine presentati i risultati della realizzazione sul processore dei circuiti introdotti nel secondo capitolo.

Per quanto riguarda l'algoritmo di Grover, come primo passo è stato implementato il circuito a due qubit suggerito nella guida sulla piattaforma IBM Quantum Experience, per passare poi alla progettazione e attuazione di un circuito per l'algoritmo di Grover a tre qubit; sono stati infine realizzati anche due circuiti per la trasformata di Fourier quantistica, uno a tre e uno a quattro qubit. Ogni circuito è stato ottimizzato riducendo il numero di porte impiegate, per due motivi: i fenomeni di decoerenza e rilassamento hanno un effetto deleterio sul sistema quantistico che aumenta al passare del tempo, e quindi al crescere del numero di porte impiegate; inoltre l'applicazione di ogni porta logica è accompagnata da un ineliminabile errore sperimentale, dipendente dalla fisica del dispositivo. D'altra parte, il numero di tipi di porte disponibili per una implementazione diretta è limitato e l'assenza di alcune porte fondamentali costringe a realizzarle con una successione di porte più elementari, facendo così salire il numero di porte e, di conseguenza, il tempo di esecuzione, che non risulta più compatibile con i limiti imposti dalla decoerenza. È per questo che in alcuni casi (algoritmo di Grover a tre qubit e trasformata di Fourier quantistica a quattro qubit) si è dovuto utilizzare il simulatore anziché il processore reale. Tali esempi mostrano perché le caratteristiche del sistema non permettano ancora di implementare algoritmi più complessi, come il già citato algoritmo di Shor, per quanto siano promettenti e già sufficienti alla realizzazione di esperimenti significativi sui fondamenti della meccanica quantistica, apparsi recentemente nella letteratura scientifica.