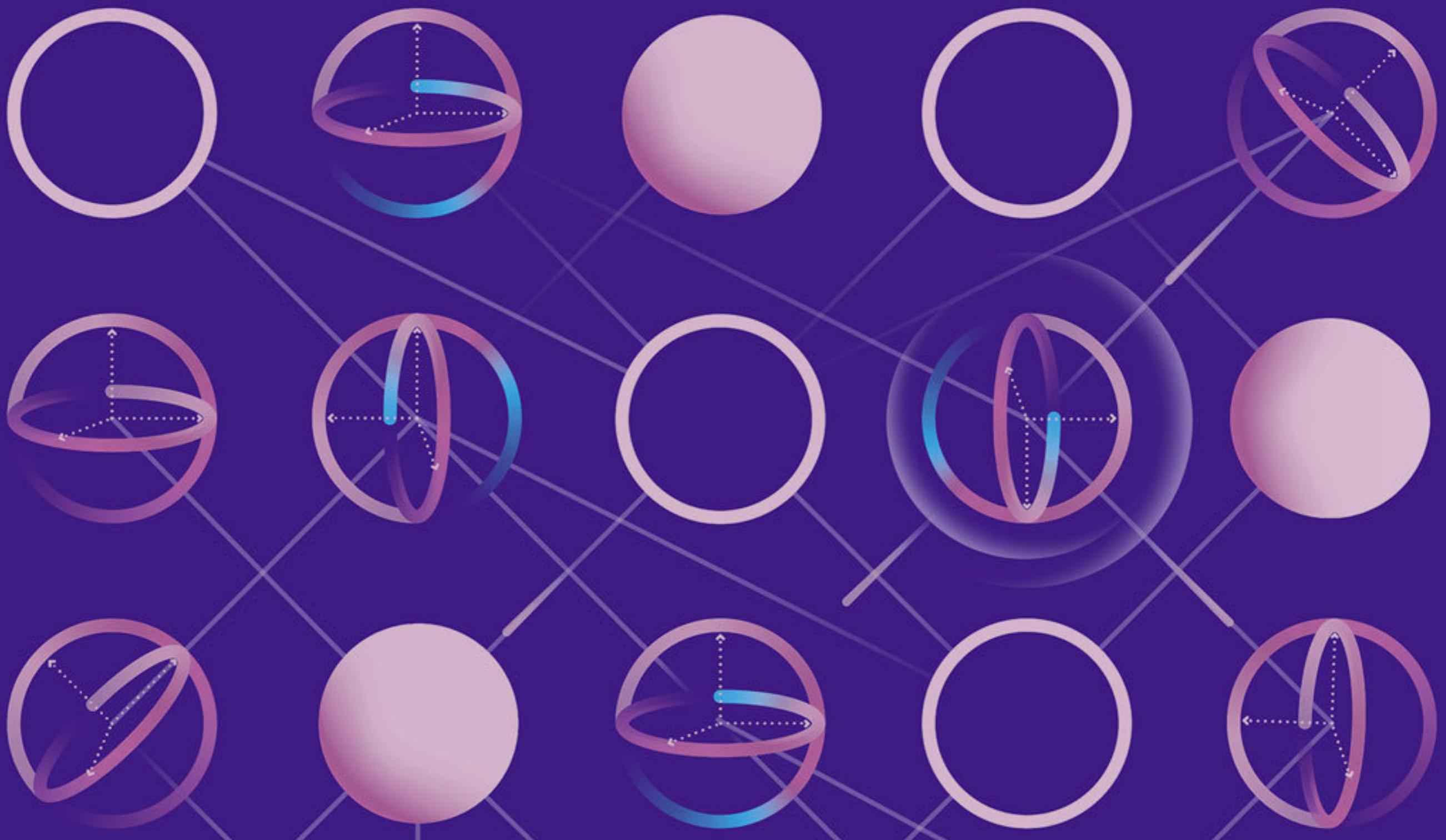




Software Engineering 2 - Research project

Academic Year: 2018 - 2019

Quantum MST

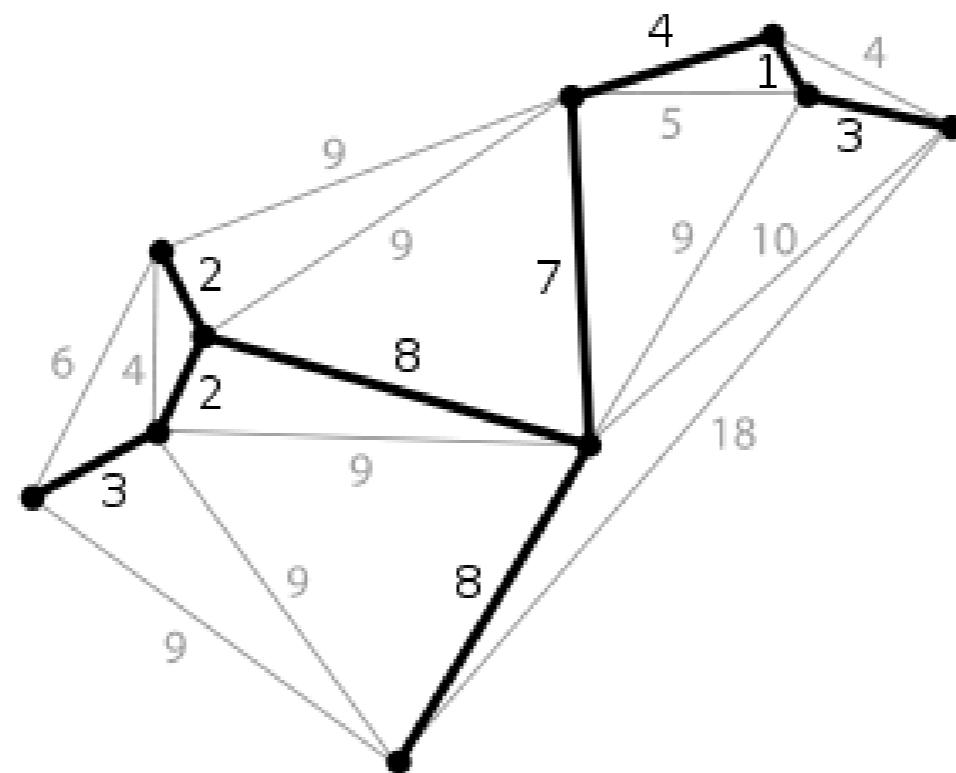


Valerio Colombo - Valentina Deda - Tommaso Fontana

1

MST - Definizione

Dato un grafo pesato non orientato, il Minimum Spanning Tree (**MST**) è un sottoinsieme dei suoi archi che **connette tutti i nodi senza cicli e con la somma dei pesi minima**.



La ricerca di un MST ha **applicazioni dirette in molti ambiti**, alcuni esempi possono essere:
path finding in reti, ottimizzazioni di reti di trasporto, reti elettriche.

Il MST può essere ricercato anche come **subroutine** di altri problemi, come per esempio il **traveling salesman problem**.

Gli **algoritmi più usati** per trovare il MST e le relative **complessità temporali** sono:

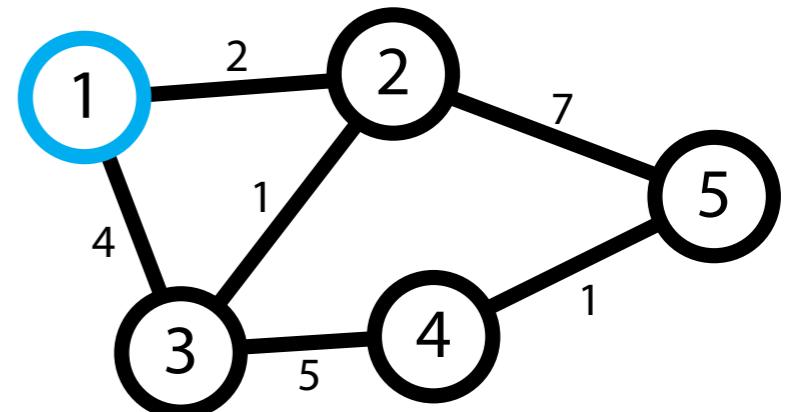
- **Prim** $O(|E| + |V| * \log |V|)$
- **Borůvka** $O(|E| * \log |V|)$
- **Kruskal** $O(|V| * \log |V|)$

Dove **E è il numero di archi** nel grafo e **V è il numero di nodi** nel grafo.

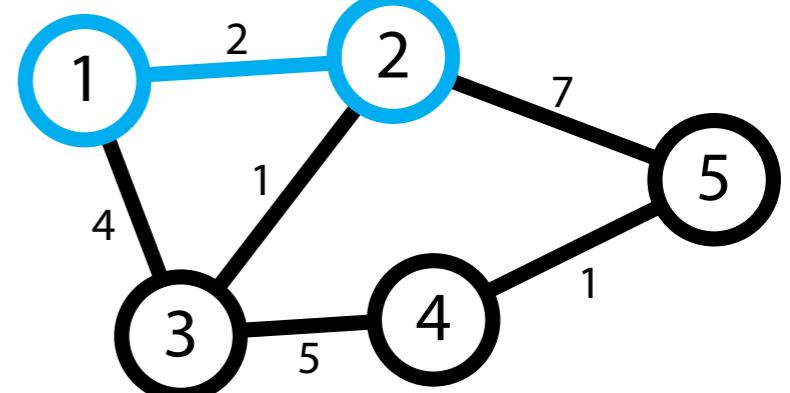
3

MST - Prim

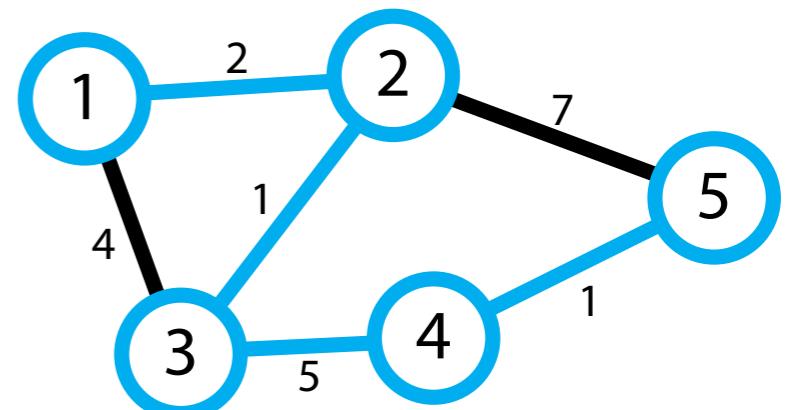
Selezioniamo un **vertice qualunque** del grafo e lo aggiungiamo al MST.



Aggiungiamo il vertice collegato al MST parziale con l'**arco di peso minore**. Questo nuovo vertice **non deve creare cicli**.



Iteriamo il secondo passaggio finché tutti i nodi non sono stati aggiunti al MST.



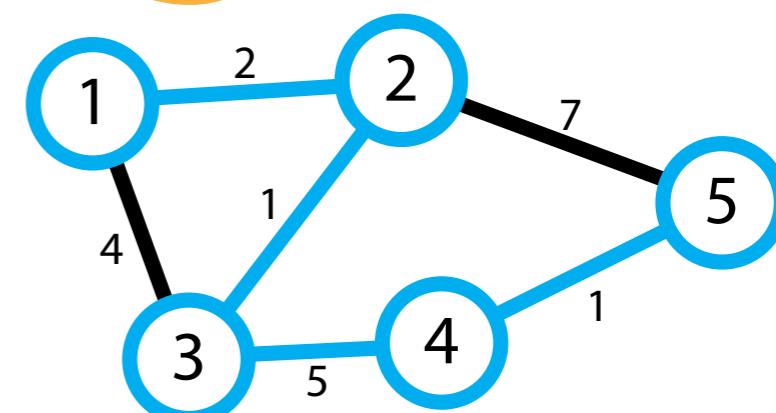
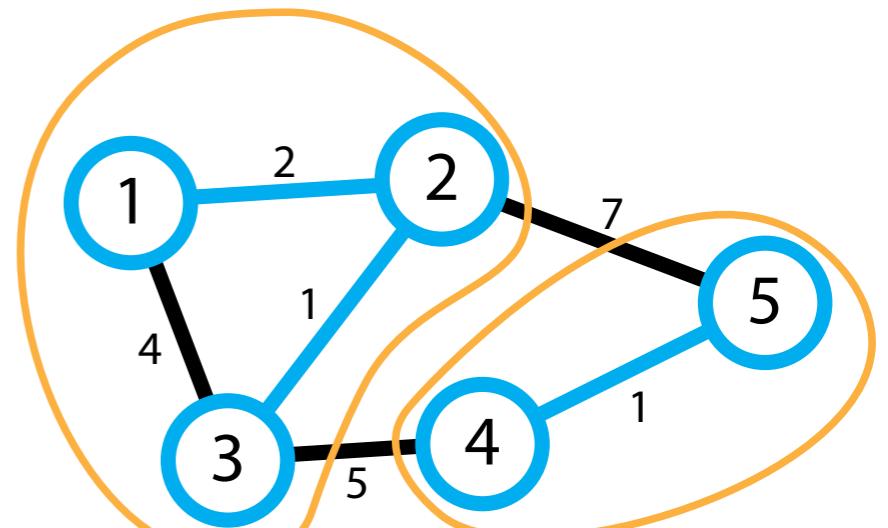
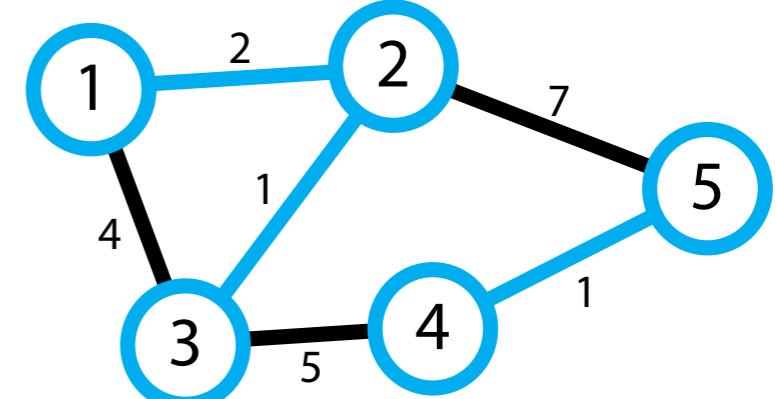
4

MST - Borůvska

Per ogni nodo del grafo troviamo l'**arco uscente di minor peso** e lo aggiungiamo al MST.

Tutti i vertici collegati da archi selezionati formeranno un **supernodo**.

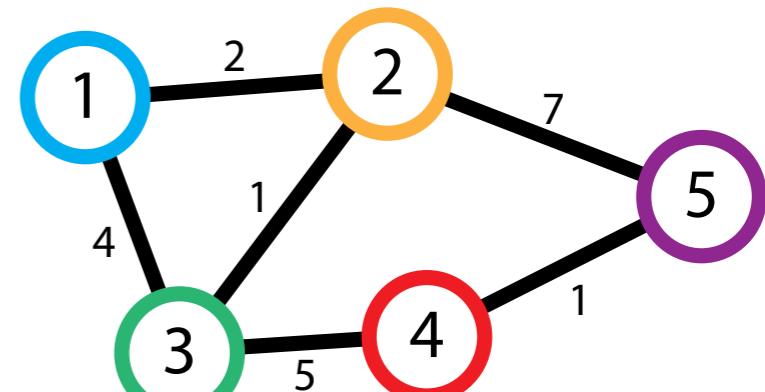
Iteriamo il primo passaggio sui supernodi finché l'algoritmo non converge



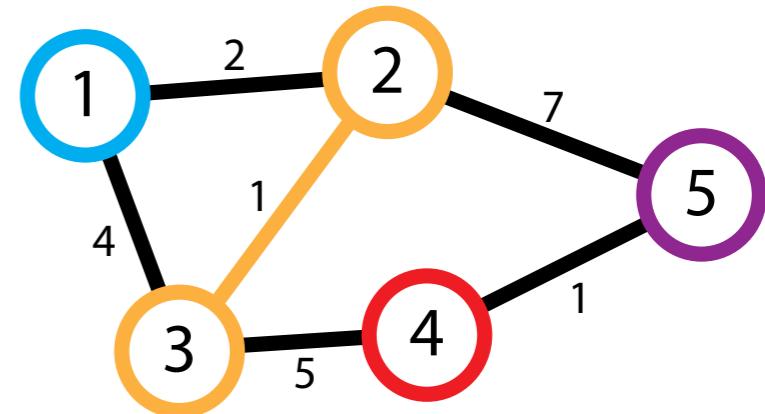
5

MST - Kruskal

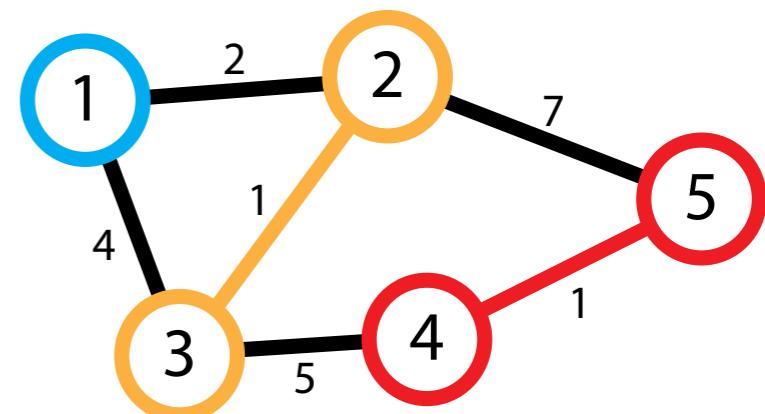
Consideriamo ogni **nodo come un albero**.



Selezioniamo dall'insieme degli **archi** quello con **peso minore**. Se questo unisce **due alberi distinti**, **allora viene aggiunto al MST**. Il nuovo arco unisce due alberi in uno unico.



Iteriamo il secondo passaggio finché tutti i nodi sono stati fusi in uno unico.



1

Qubit - Definizione

Un bit quantistico, o **qubit**, è l'equivalente nella computazione quantum di un bit classico. Come un bit è l'**unità minima di informazione** nella computazione classica, il qubit lo è nel mondo quantum.

Bit
(*Classical Computing*)

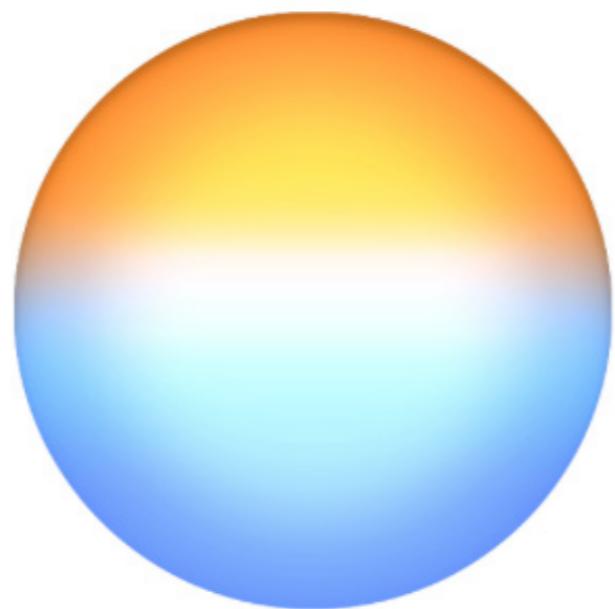
0



1

Qubit
(*Quantum Computing*)

0



1

In un sistema classico, un bit può essere in uno stato solo. Al contrario, la meccanica quantistica permette ai qubit di essere in uno stato di **superposizione**. Questa proprietà dà alla computazione quantum un nuovo strumento per sbloccare una **nuova classe di algoritmi più efficienti**.

Qubit - Rappresentazione

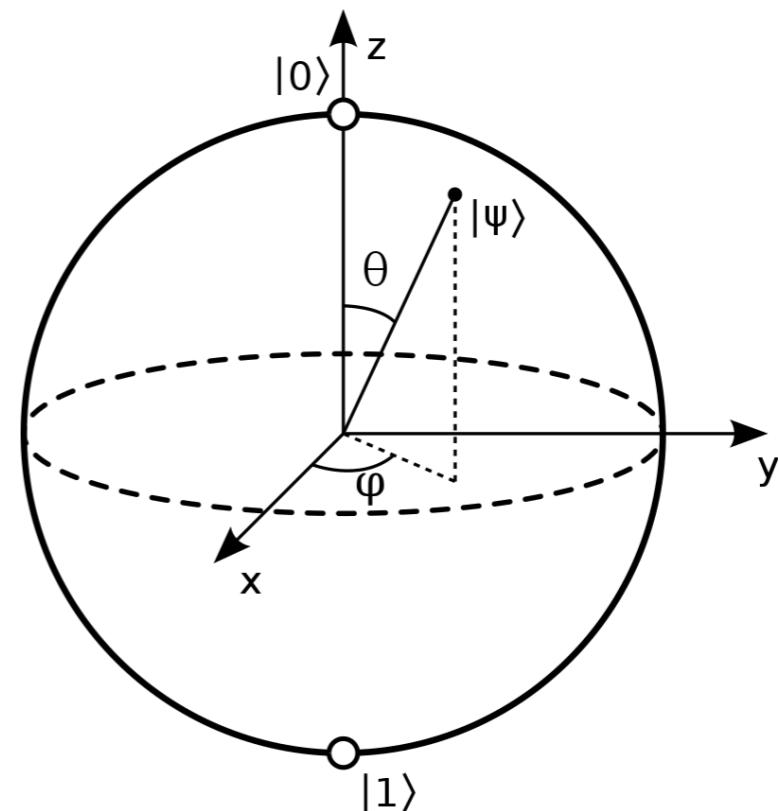
Braket notation

Un qubit può essere interpretato come un **vettore** le cui componenti sono una **sovraposizione della sua base ortonormale**. La base, nel nostro caso, è composta dai **possibili valori del qubit** dopo la misurazione, 0 o 1.

$$|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle \quad \alpha, \beta \in \mathbb{C}$$

Bloch sphere

Un qubit può essere interpretato come un **vettore unitario** in uno spazio 3D. Gli stati della base sono antipodali. Tutti gli **stati intermedi** sulla sfera unitaria sono una **superposizione degli stati della base**, 0 e 1.



3

Quantum gate - Definizione

I quantum gate possono essere considerati come un **equivalente quantum delle porte logiche classiche**. Questi gate cambiando lo **stato del sistema** manipolando la sua **distribuzione di probabilità** piuttosto che applicare una **funzione logica**.

Questi gate devono essere **reversibili** in modo tale da preservare le proprietà della computazione quantistica. Quindi i gate saranno rappresentati da **matrici unitarie**.

$$U |a\rangle = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & u_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

Queste matrici unitarie possono agire su **uno o più qubit** alla volta. Se agiscono su **n qubit** avranno una dimensione di **$2^n \times 2^n$** .

4

Quantum gate - Singolo qubit

Hadamart gate

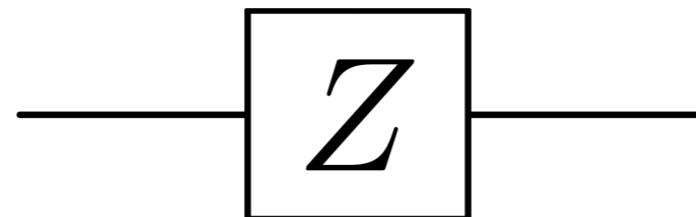
Pone il qubit in ingresso in uno stato di superposizione



$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Pauli-z

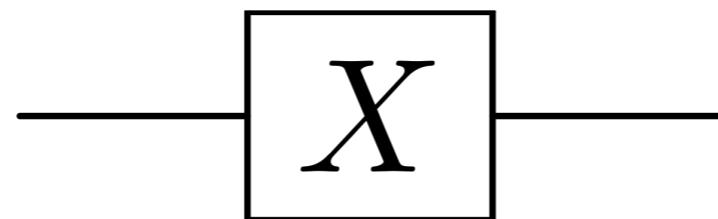
Ruota la fase del qubit in ingresso di 180°



$$Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Pauli-x

Inverte lo stato del qubit in ingresso



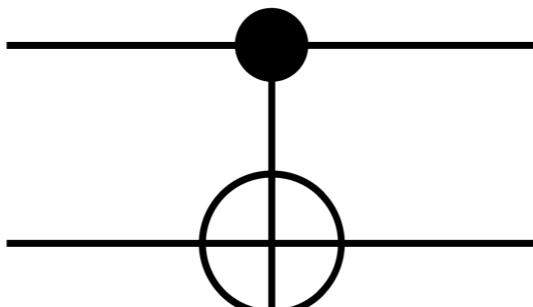
$$X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

5

Quantum gate - Controllati

CNOT

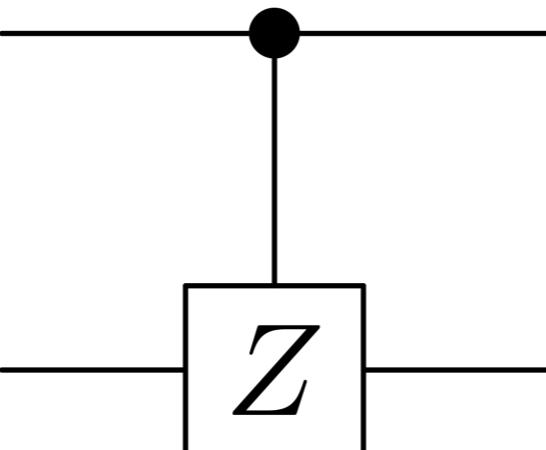
Inverte il qubit in ingresso se il qubit di controllo è posto a 1



$$CNOT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Controlled Z

Ruota la fase del qubit in ingresso di 180° se il qubit di controllo è posto a 1



$$CZ = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

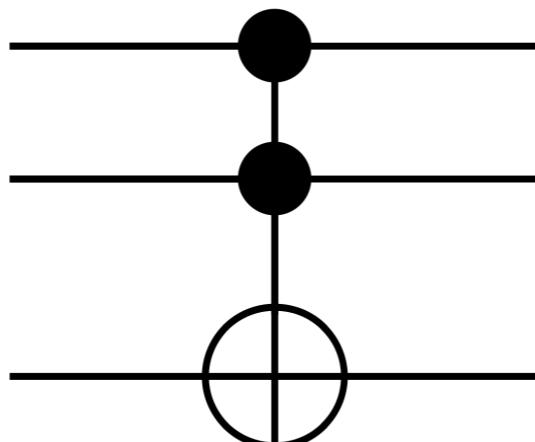
6

Quantum gate - Controllati a più qubit

I gate controllati possono essere **estesi ad un numero arbitrario di qubit** di controllo.

CCNOT/ Toffoli gate

Inverte il qubit in ingresso se i qubit di controllo sono posti a 1.



$$CCNOT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Se pur di estrema utilità i gate controllati a più bit sono di **difficile realizzazione pratica** in quanto richiedono un **numero esponenziale di gate** per la loro realizzazione.

Da notare che il **CCNOT è un gate universale** per la computazione classica, il che vuol dire che ogni **gate classico** come AND, OR, XOR, ecc... può essere **ricostruito dal CCNOT**.

Questo prova che i computer quantistici sono almeno **Turing completi**.

7

Quantum speed up - Parallelismo

Il vantaggio dei computer quantistici è la loro abilità di **parallelizzare la computazione**. Consideriamo una funzione computabile con k gate classici.

$$f : \{0, 1\}^n \rightarrow \{0, 1\}^n$$

Questo circuito può essere implementato da **n CCNOT gate**. Chiameremo questo circuito U . Se **applichiamo l'operazione U** ad un ipotetico **registro posto in superposizione** avremo

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^n}}(|0\rangle + |1\rangle + |2\rangle + \dots + |2^n - 1\rangle)$$

$\downarrow U$

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^n}}(|f(0)\rangle + |f(1)\rangle + |f(2)\rangle + \dots + |f(2^n - 1)\rangle)$$

Quindi la computazione della funzione viene eseguita un **numero di volte esponenziale** (possibili combinazioni dei qubit) facendo lo stesso numero di operazioni per **elaborare un singolo valore**.

1

Grover - Definizione

L'algoritmo di Grover è un **algoritmo quantistico** che trova con alta **probabilità** l'input ad una **black box** che produce un particolare output.

$$f : \{0, 1, \dots, N - 1\} \rightarrow \{0, 1\}, \quad \text{where} \quad N = 2^n, n \in \mathbb{N}$$

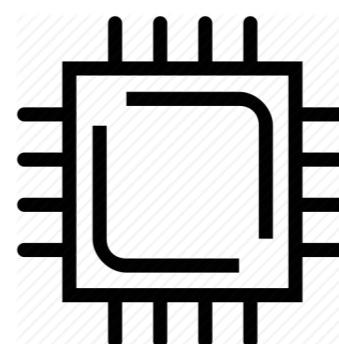
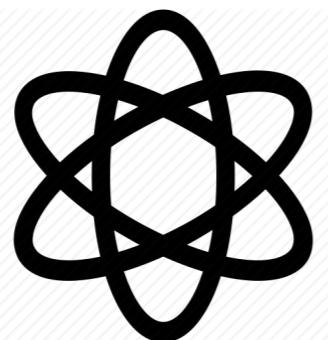
$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x \neq w \\ 1 & \text{if } x = w \end{cases}$$

Per esempio si ipotizzi una funzione che mappa un insieme di interi all'insieme $\{0, 1\}$. La funzione sarà associata alla blackbox e Grover troverà quei input che avranno come risultato 1.

2

Grover - Vantaggi (complessità)

Il più grande vantaggio nell'utilizzo di Grover è la sua **complessità** rispetto ad un algoritmo classico.



$$O(\sqrt{N}) * k$$

$$O(N)$$

Da notare che la **complessità** degli **algoritmi quantistici** viene misurata in **chiamate all'oracolo e non temporalmente**. Inoltre bisogna considerare anche la complessità della **creazione dell'oracolo**, la quale dipende dal problema che si sta affrontando.

3

Grover - Fasi dell'algoritmo

Super position setup

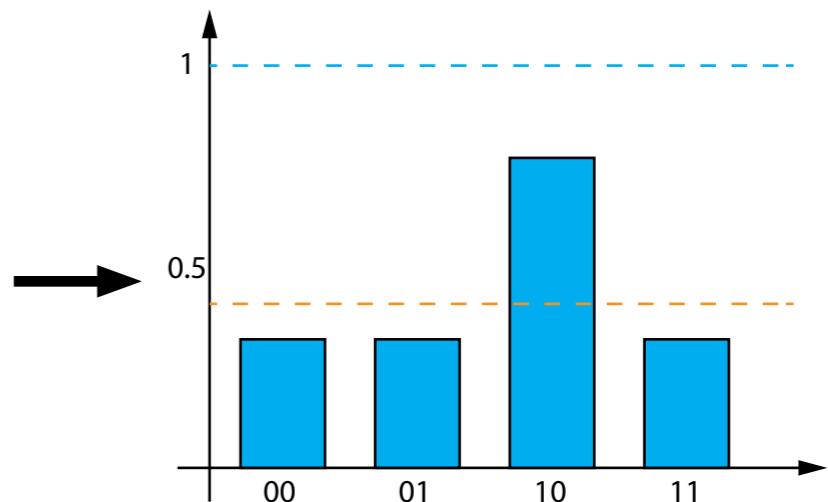
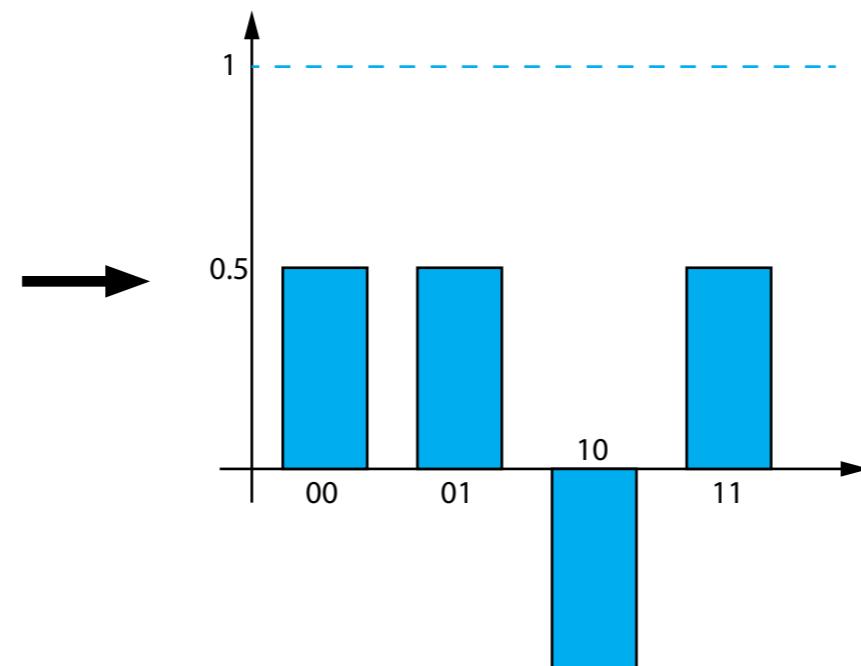
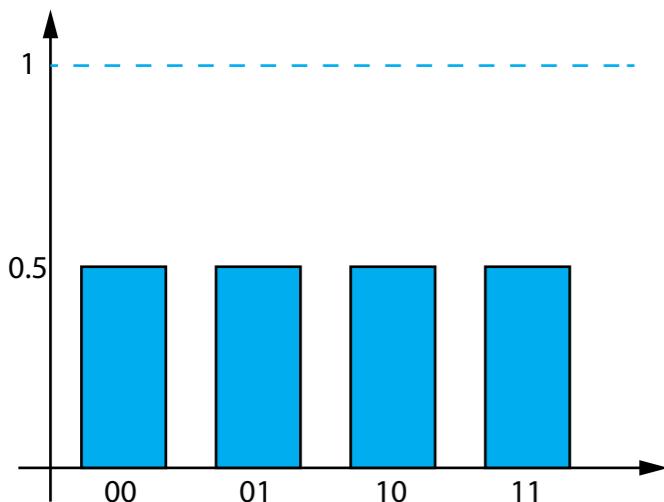
Il registro di input viene posto in **superposizione** attraverso i gate H. quindi ogni stato del registro sarà equiprobabile.

Phase inversion

Il registro di input viene elaborato dalla blackbox, detta anche **oracolo**, **invertendo la fase** dello stato ricercato dalla funzione codificata nell'oracolo.

Inversion about the mean

Tutti i possibili stati vengono **invertiti** rispetto all'**amplitudine media** degli stati. Così facendo si **aumenta la probabilità** che il registro si trovi nello stato ricercato



4

Grover - Iterazioni

Per ottenere un risultato migliore le ultime due fasi dell'algoritmo devono essere **iterate un numero preciso di volte**.

Numero iterazioni ottime singolo match

$$\frac{\pi}{4} \sqrt{N}$$

Numero iterazioni ottime m match

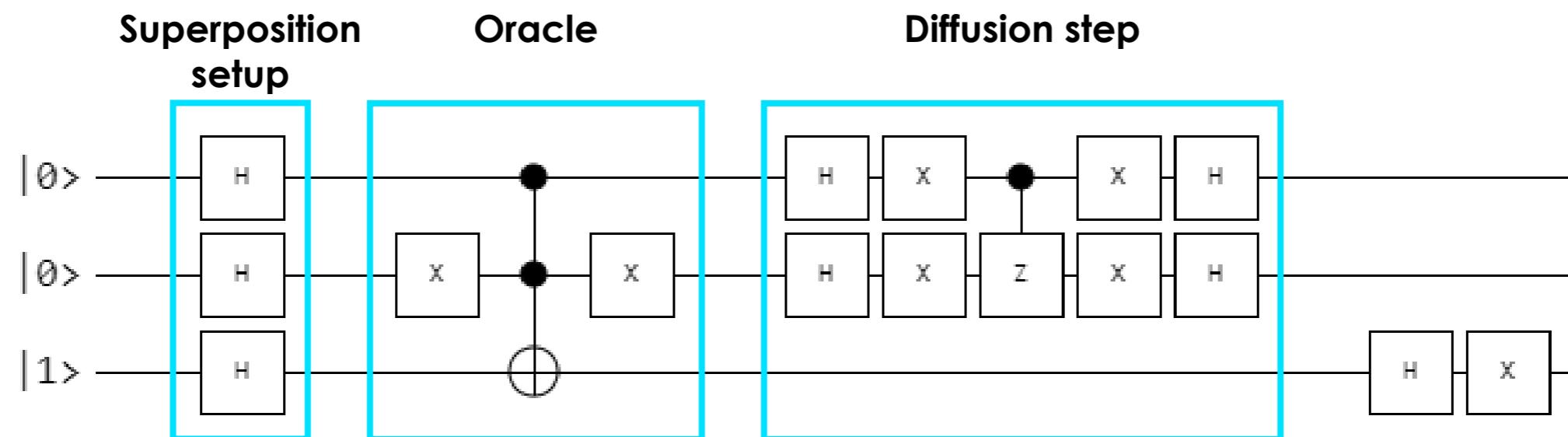
$$\frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{N}{M}}$$

Il numero di iterazioni dipende da due fattori la **cardinalità** dei possibili stati del registro di input e il **numero di match**/stati ricercati. Spesso il numero di iterazioni ottime **non è un numero intero**. Questo porta ad una **minore probabilità di successo**.

5

Grover - Implementazione

Prendendo in considerazione l'oracolo dell'esempio precedente, di seguito troviamo una possibile implementazione di Grover.

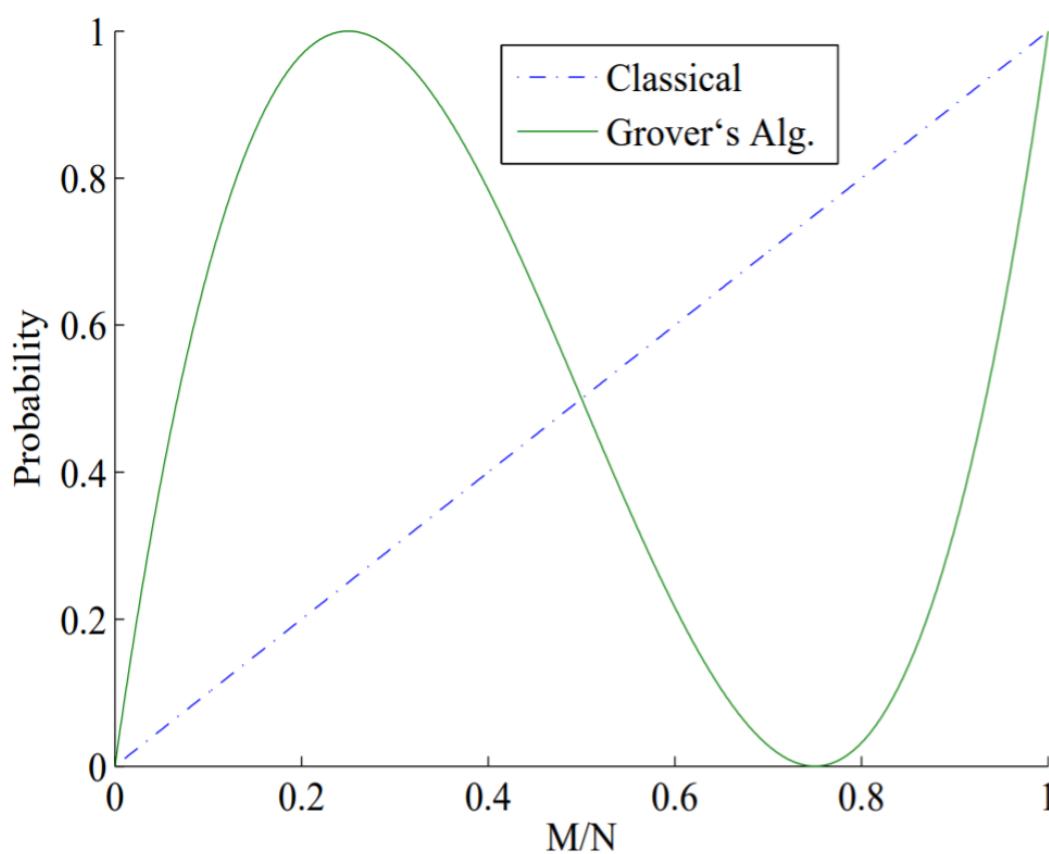


L'oracolo in questo caso codifica la funzione che ha come risultato 1 se l'input è 10. Quindi il compito dell'**oracolo** è quello di **evidenziare gli stati ricercati** e il **diffusion step aumenta la probabilità** che il registro sia nello stato ricercato.

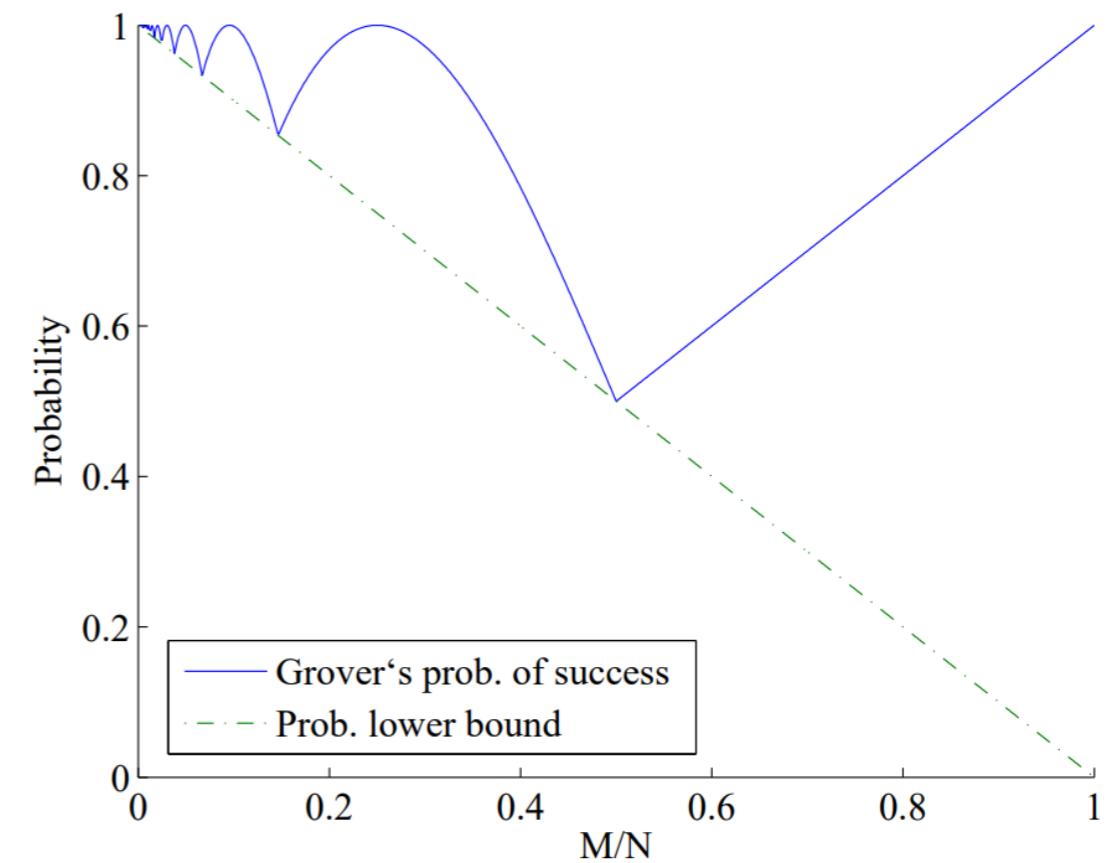
6

Grover - Problematiche

Essendo un **algoritmo probabilistico** è bene aumentare il più possibile le possibilità di successo, ma non è sempre possibile. Infatti nel caso in cui **non si conoscono i numero di match**, l'algoritmo potrebbe essere iterato un numero errato di volte, portando ad un **risultato non attendibile** sistematicamente. Come si può vedere dai grafici sottostanti **all'aumentare dei match** Grover ha la **stessa probabilità di successo di un random guesser classico**.



Probabilità di successo di una singola iterazione
vs.
Random guesser classico



Probabilità di successo con iterazione ottima

7

Grover - Problema del phase shift

Classicamente Grover applica uno phase shift, però è **difficilmente implementabile in modo diretto**. Per ovviare a questo problema è utile **trasporre il problema** da un phase shift all'implementazione di una **funzione booleana** nel seguente modo.

Phase shift diretto

$$|x\rangle \rightarrow (-1)^{f(x)} |x\rangle$$

Phase shift attraverso funzione booleana

$$|x\rangle |0\rangle \rightarrow |x\rangle |f(x)\rangle \xrightarrow{Z} (-1)^{f(x)} |x\rangle |f(x)\rangle$$

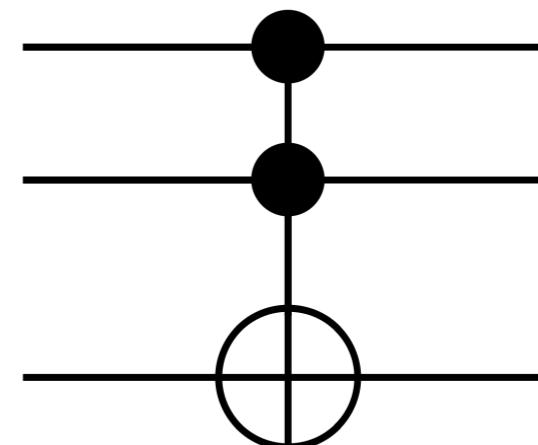
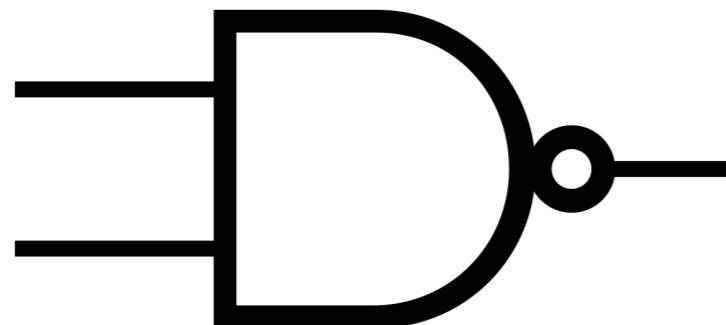
La funzione viene applicata direttamente per poi invertirla attraverso un gate Z

1

Funzioni bool - Costruzione

Per poter implementare la ricerca in Kruskal avremo bisogno di poter rappresentare **funzioni booleane attraverso quantum gate**. Sapendo che nel mondo classico il **CCNOT è un gate universale**, possiamo costruire funzioni booleane arbitrarie.

Gate universali (computazione classica)

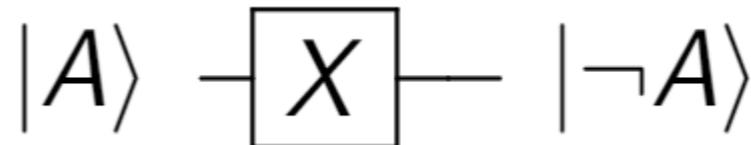
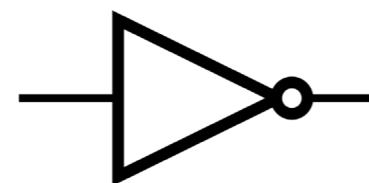


Come per il NAND gate, una combinazione di CCNOT gate può descrivere una **qualsiasi funzione booleana**.

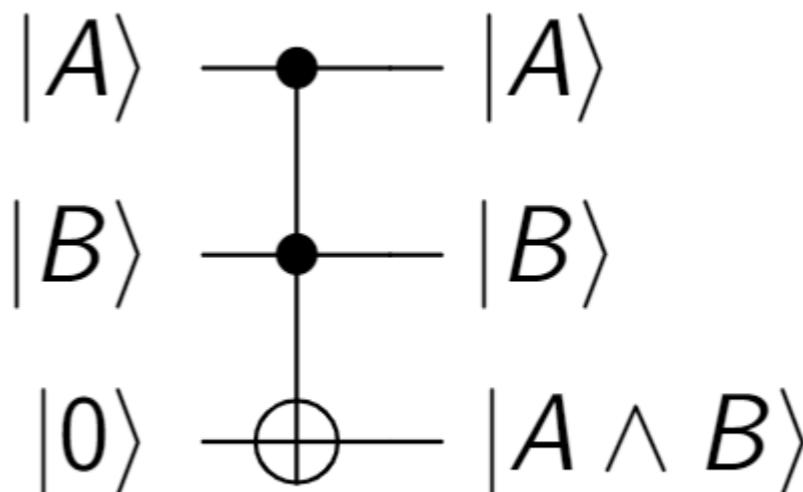
2

Funzioni bool - Porte logiche classiche

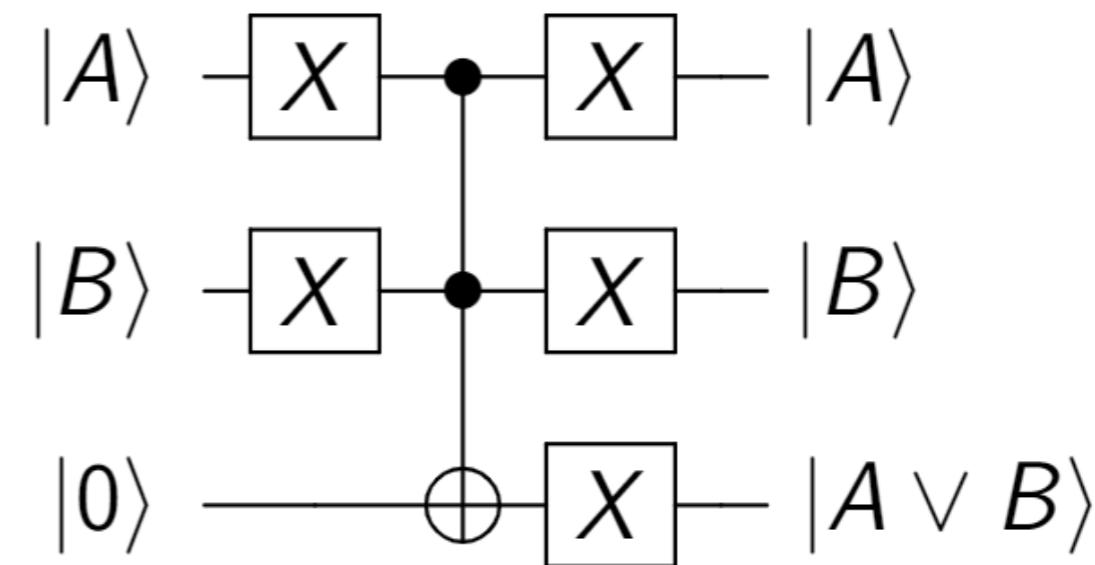
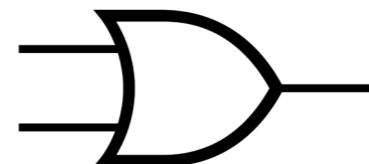
NOT gate



AND gate



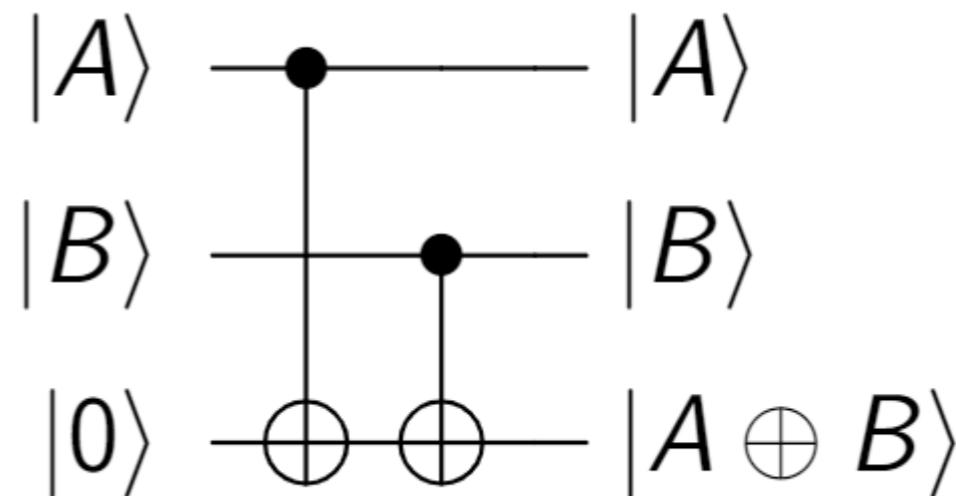
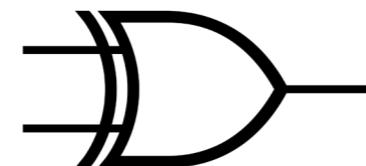
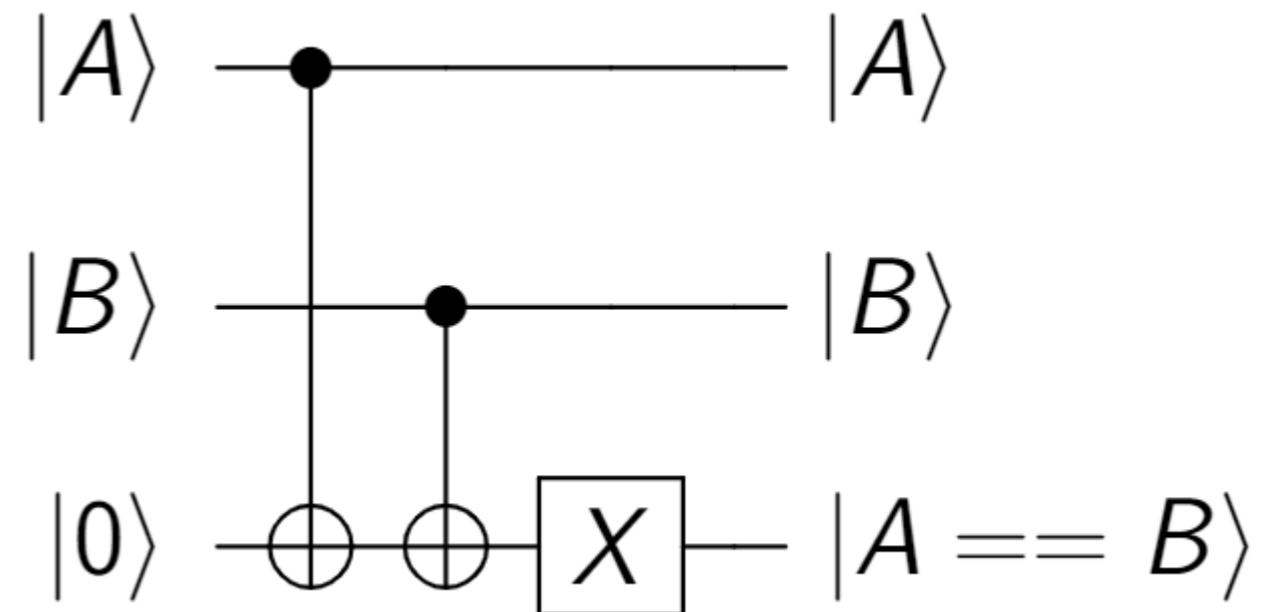
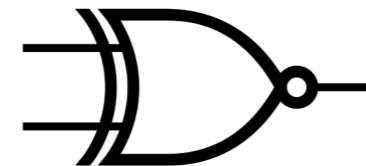
OR gate



3

Funzioni bool - Porte logiche classiche

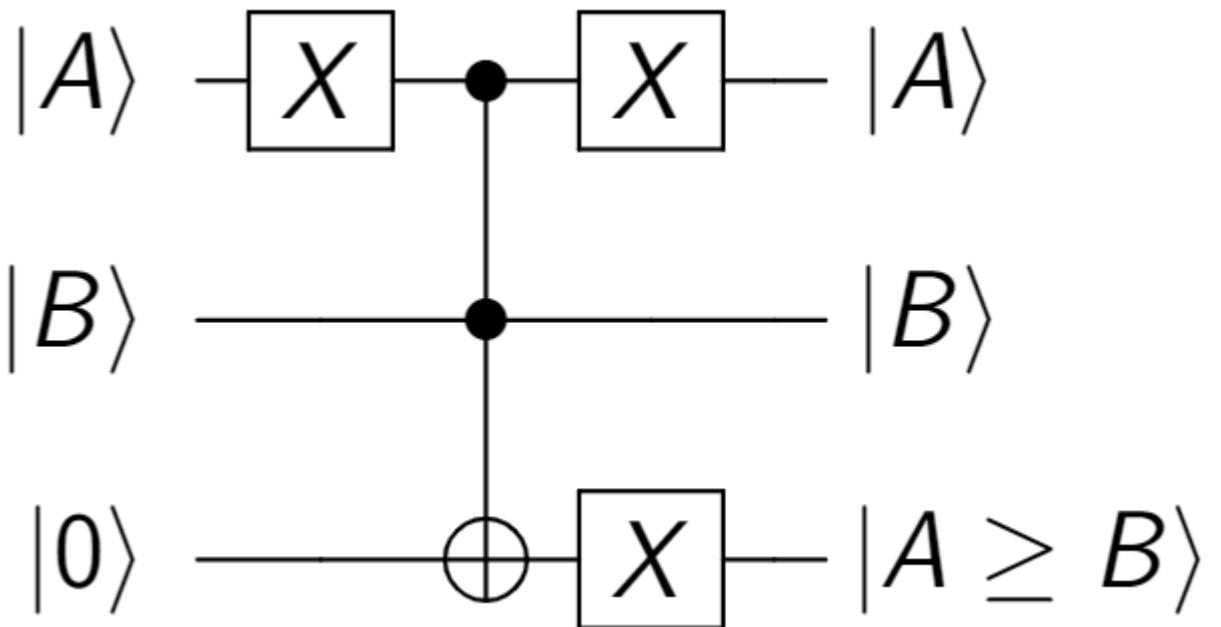
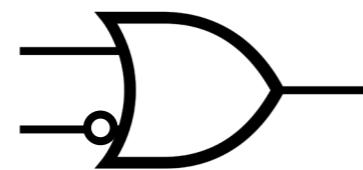
XOR gate

XNOR gate
Uguaglianza

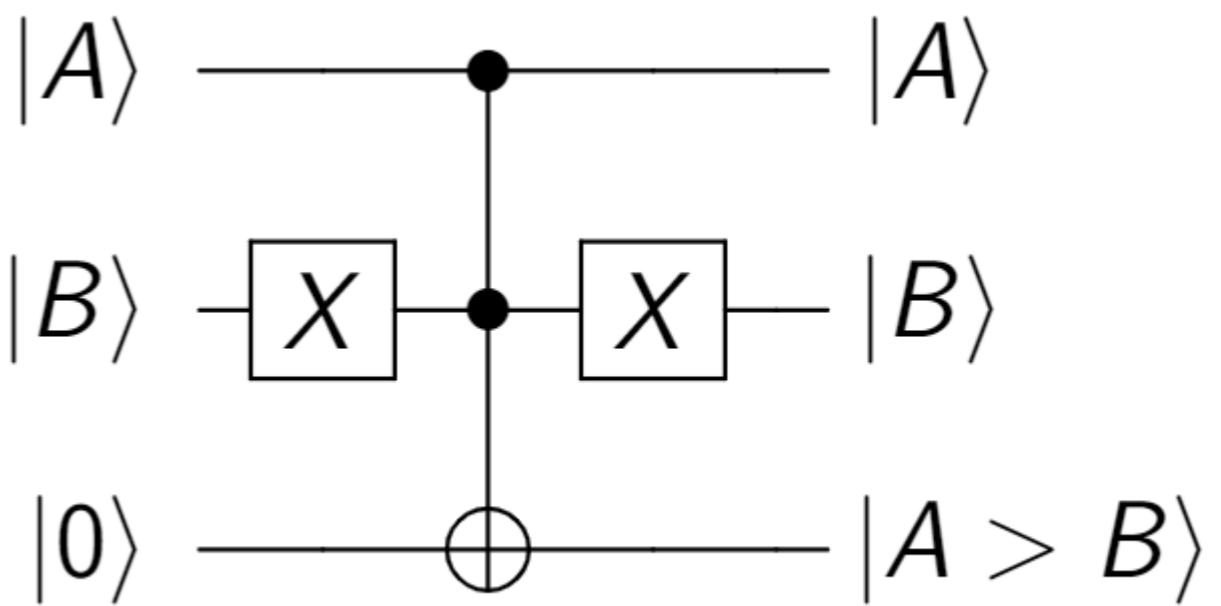
4

Funzioni bool - Porte logiche classiche

A OR NOT(B)
Maggiore uguale



A AND NOT(B)
Maggiore

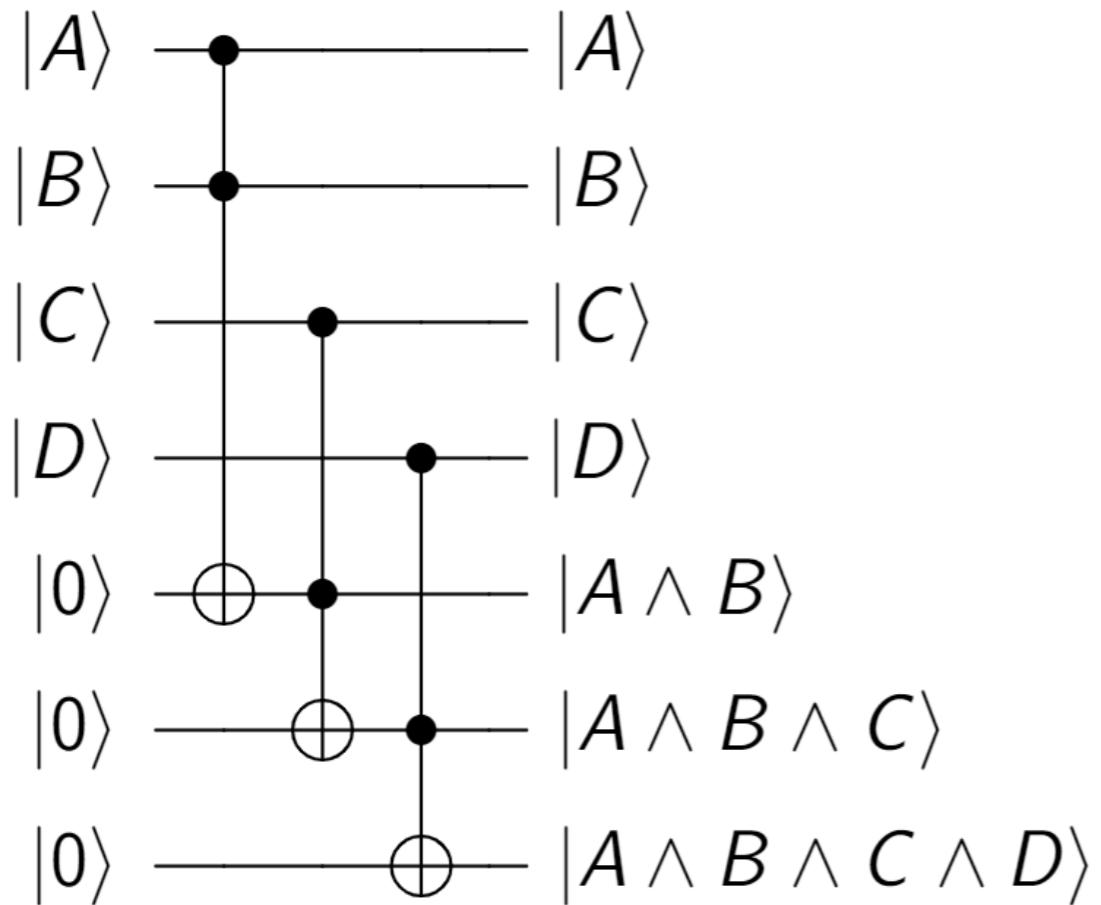


5

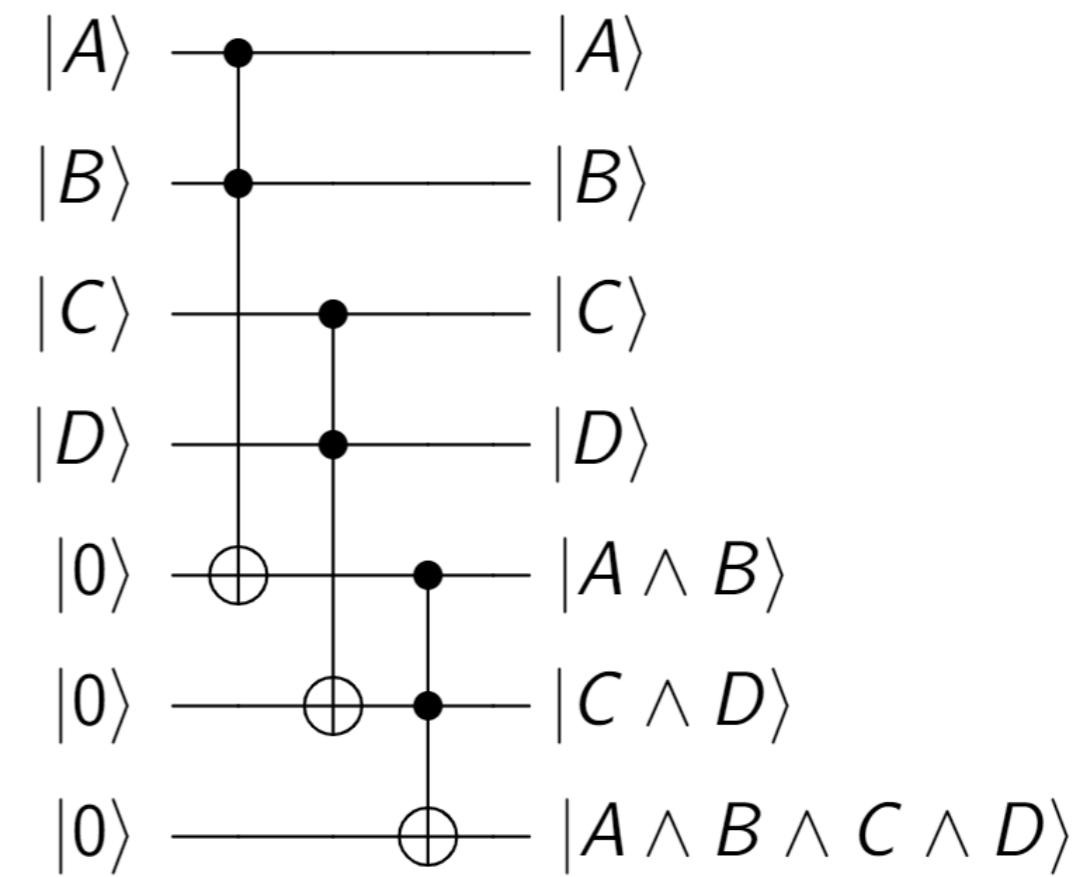
Funzioni bool - Porte logiche classiche

Nella nostra computazione avremo bisogno di **gate a N qubit**, ma attualmente **non ne esistono implementazioni fisiche**. Nonostante ciò, queste possono essere composte da gate più semplici. Alcune librerie **simulano queste porte** nei seguenti modi.

Ladder

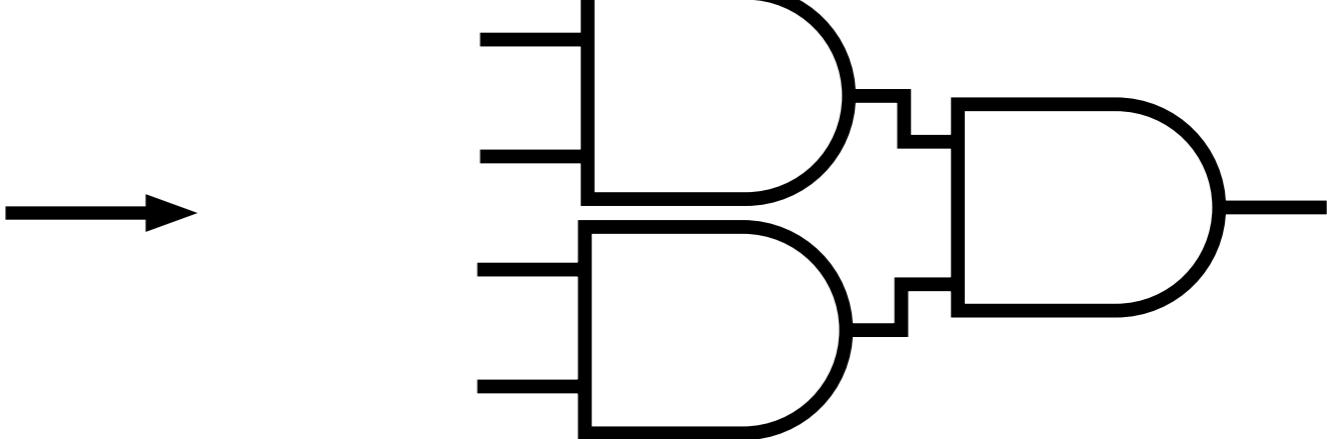
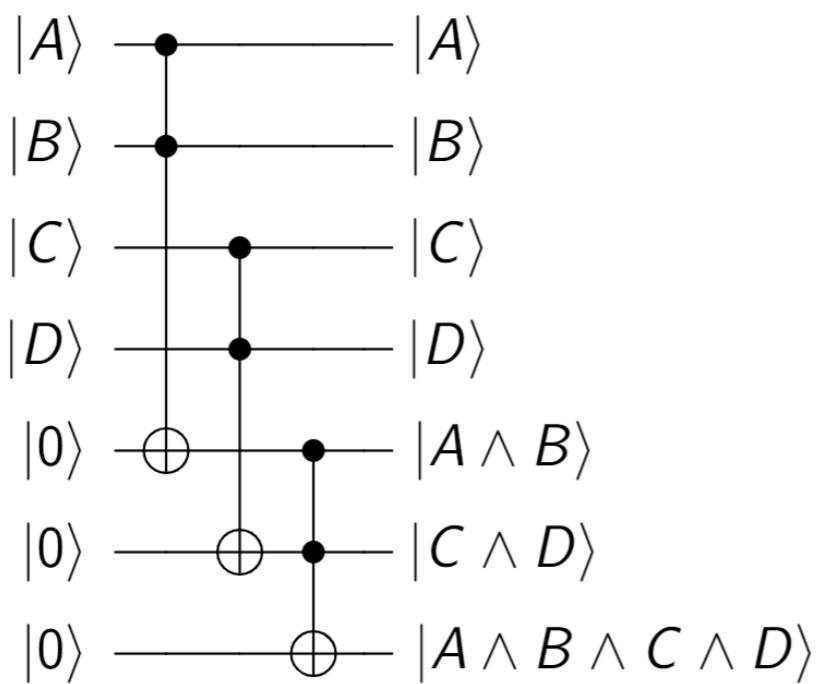
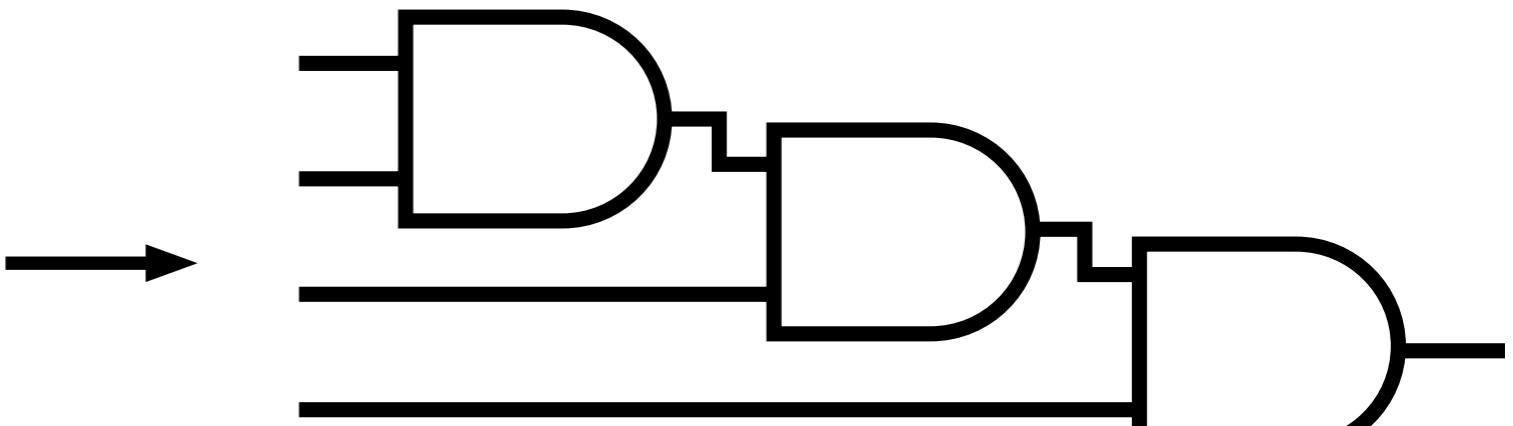
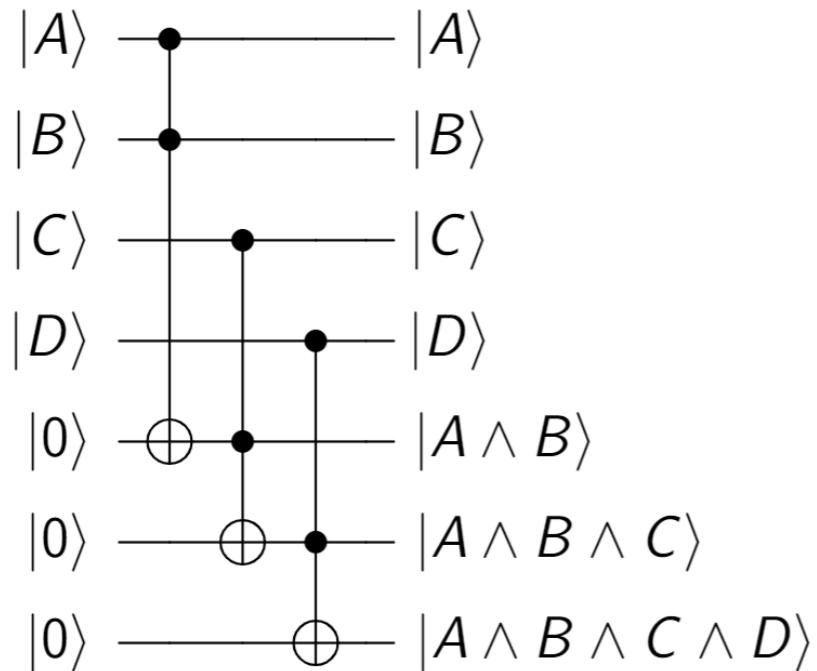


Tree



6

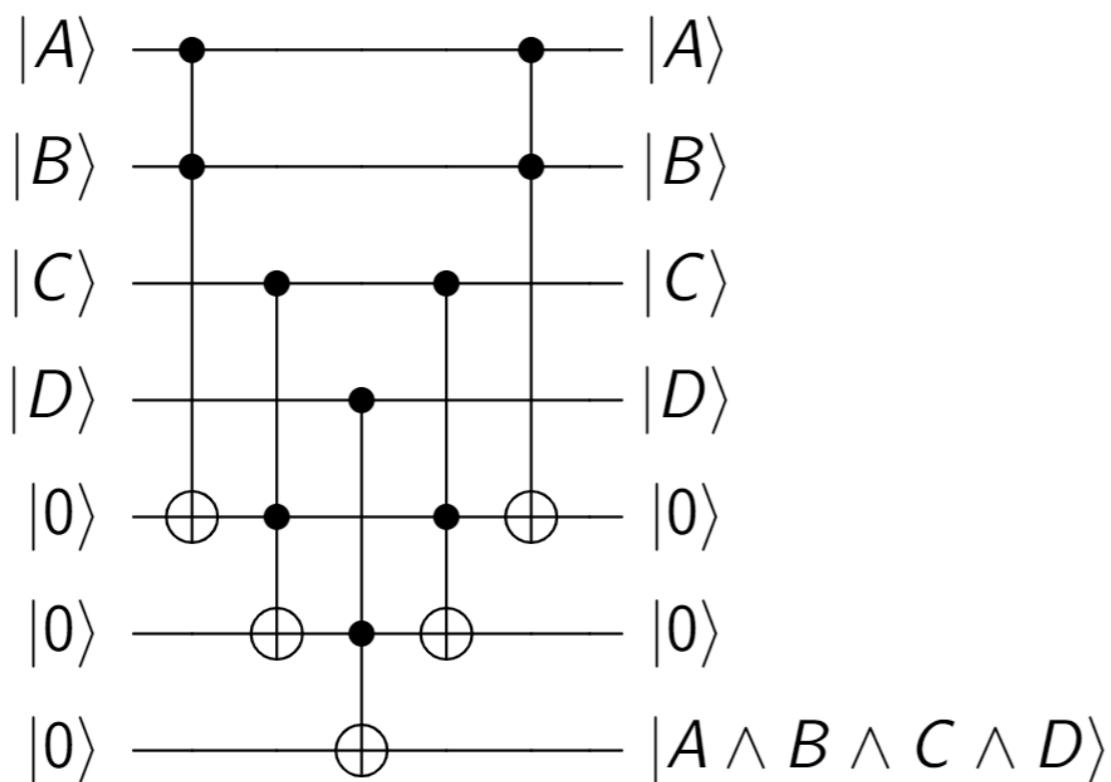
Funzioni bool - Porte logiche classiche



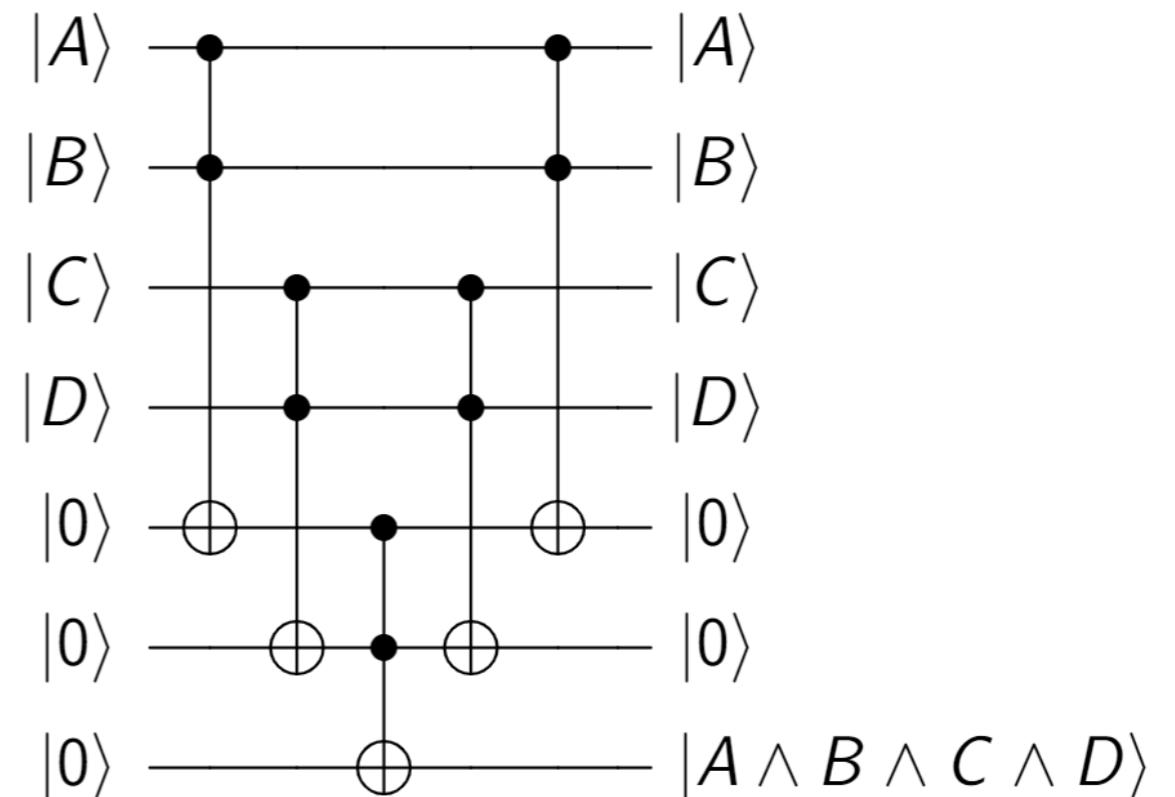
Funzioni bool - Porte logiche classiche

Solitamente è buona norma **porre il risultato soltanto nell'ultimo qubit**, lasciando gli **altri qubit invariati alla fine della computazione**.

Ladder clean



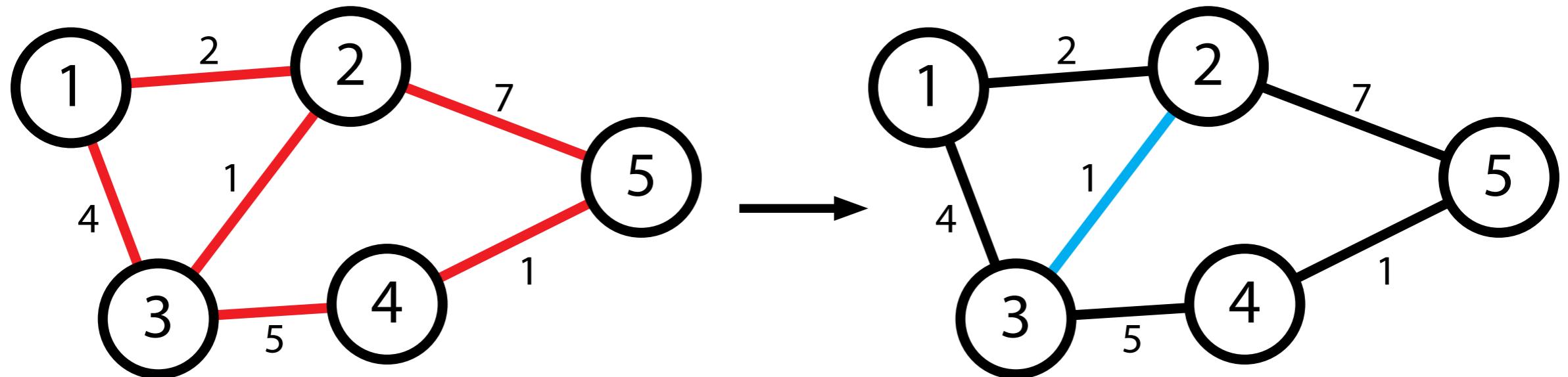
Tree clean



1

MST quantum - Kruskal quantum

Creiamo due insiemi: l'insieme degli **archi appartenenti al MST** e l'**insieme di nodi visitati**.



Per $|V| - 1$ volte selezioniamo l'**arco di minor peso incidente** su un nodo che non appartiene al set di nodi già visitati. Ogni volta che si seleziona un **arco** questo viene aggiunto all'**insieme degli archi del MST** e il **nodo** appena visitato all'insieme de i **nodi visitati**.

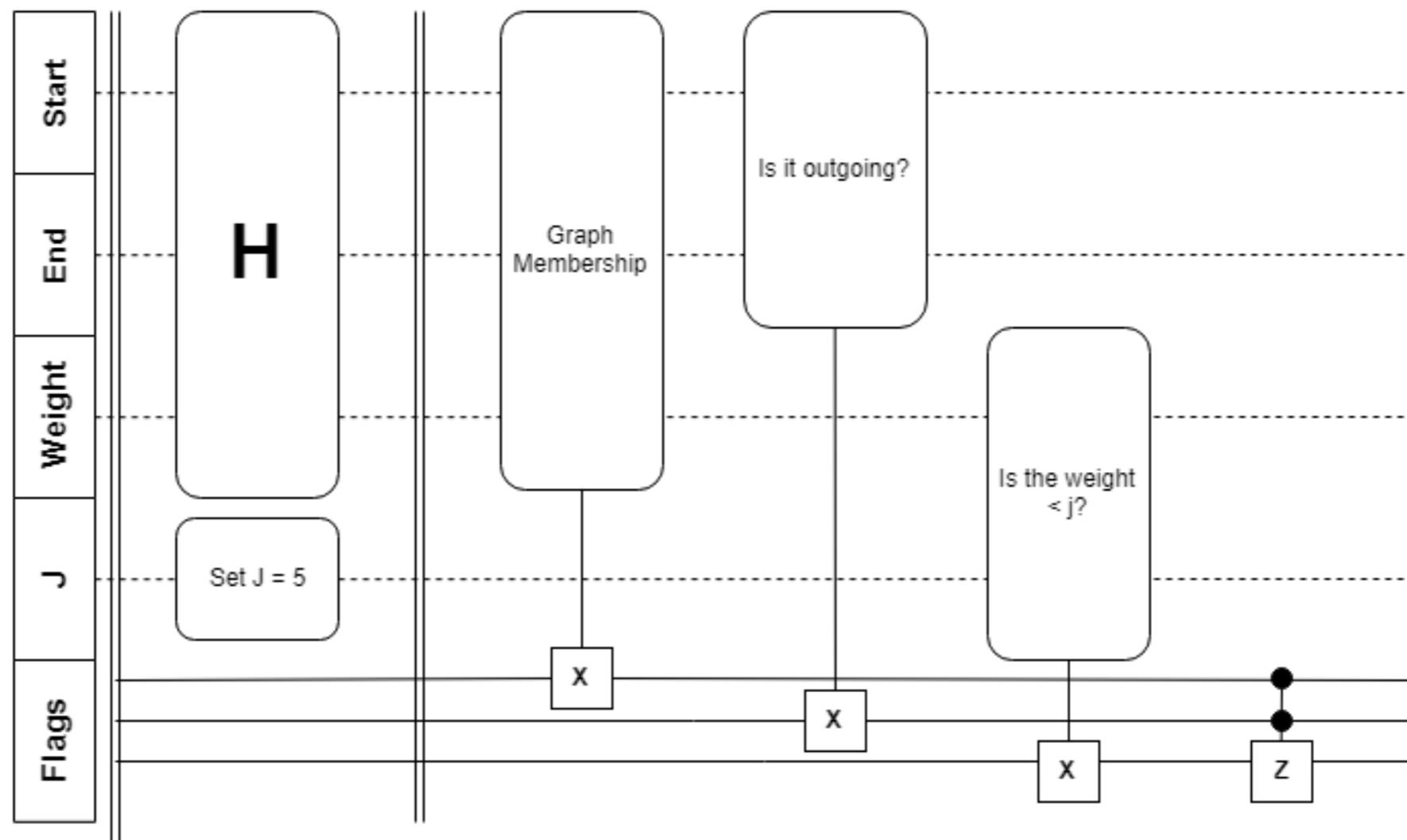
Il mondo quantum può fornirci un **vantaggio nella fase di ricerca di un arco incidente**. Un possibile algoritmo di ricerca quantum è **Grover**.

2

MST quantum - Circuito MST

Grover può essere utilizzato nel calcolo di un MST per la **ricerca di archi** e la **valutazione dei loro pesi**. L'oracolo sarà una funzione che avrà come parametri l'**appartenenza** di un arco al grafo, la sua **direzione** e il suo **peso**

Registers Setup



Oracle

3

MST quantum - Creazione oracolo

L'oracolo può essere descritto come una **combinazione di funzioni booleane**, in particolare

$$f(x) = \text{Appartenenza al grafo} \And \text{Arco uscente} \And \text{Peso minimo}$$

Per la **valutazione dei pesi** sorge un problema nella trasposizione a funzione logica del minimo poiché **non è implementabile attraverso una funzione booleana**.

Nei computer classici, dove si hanno a disposizione tanti registri per salvare dati, la ricerca del minimo è un compito facile. Al contrario negli attuali computer quantistici ciò non è possibile, soprattutto considerando che spesso i **valori sono salvati attraverso superposizioni e non direttamente in registri**.

4

MST quantum - Ricerca minimo

Per fare ciò si fissa un **valore j e si trovano tutti i valori inferiori**. Se se ne trova qualcuno si **itera** di nuovo la comparazione **finché il sistema non converge**. Si può dimostrare che la ricerca del minimo convergerà in \sqrt{N} passaggi.

Pseudocodice

- 1) Scegliamo un valore intero casuale j
- 2) Iteriamo fino a convergenza
 - a) Se esiste un $i < j$
 - b) Poniamo $j = i$

Numero iterazioni

$$O(\sqrt{N})$$

5

MST quantum - Setup registri

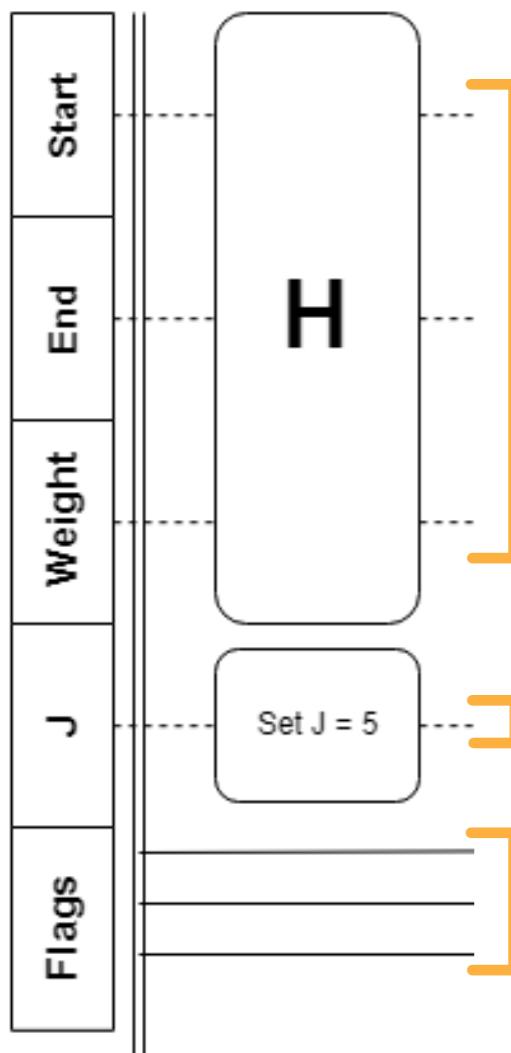
Start e **end** sono registri che descrivono rispettivamente il nodo di partenza e di arrivo di un arco.

Weight serve per la gestione dei pesi degli archi.

J serve come registro di comparazione per la ricerca del minimo.

Flag sono qubits che memorizzeranno i risultati delle sottofunzioni dell'oracolo.

Registers Setup



Applichiamo H a tutti i qubit dei registri di start, end e pesi

Applichiamo H per descrivere ogni possibile combinazione di nodi e pesi. **Un arco è descritto dalla tupla(start, end, peso)**

Poniamo a un valore intero il registro J

A un valore a cui verranno confrontati gli altri pesi

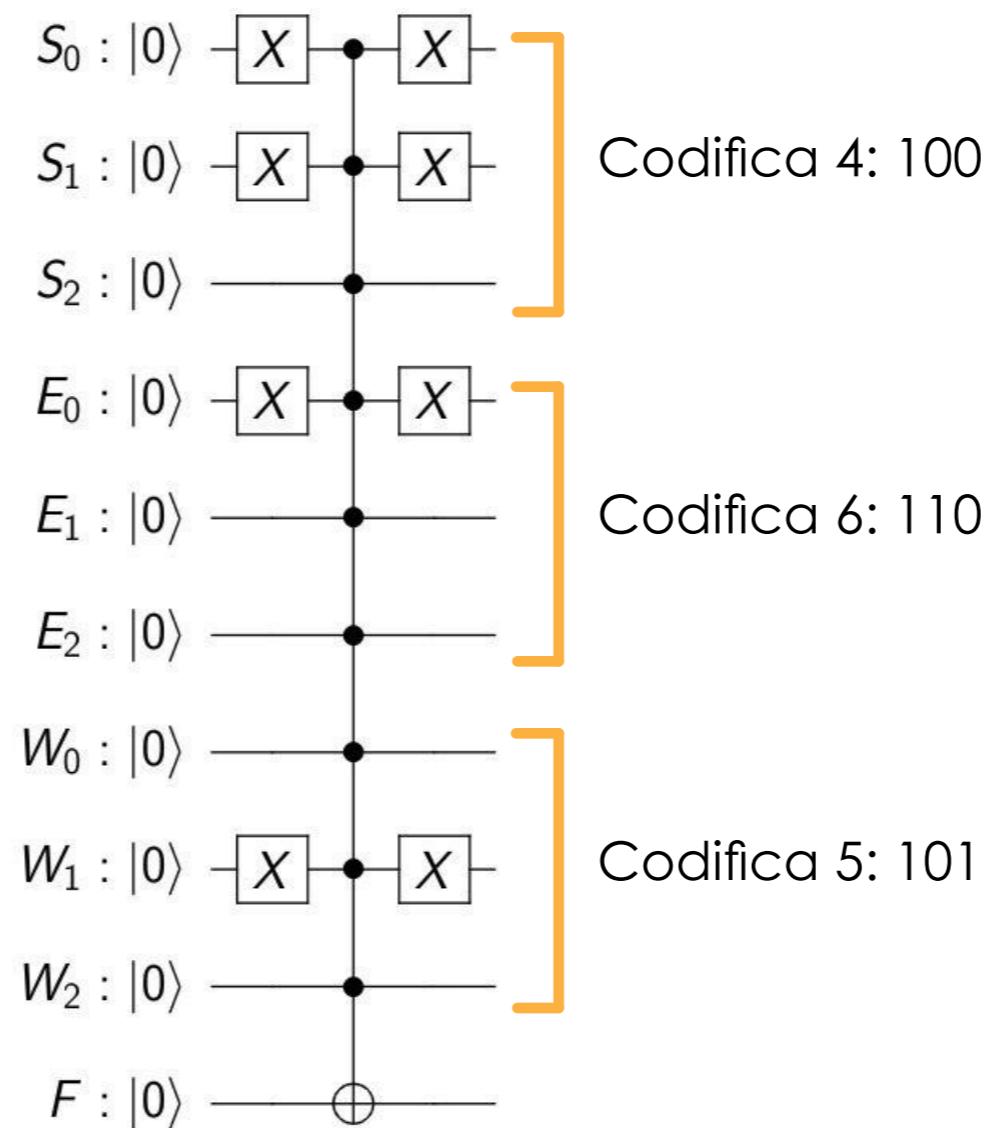
Poniamo a 0 i qubit di flag

A 0 poiché dovranno memorizzare in modo deterministico il risultato delle varie sub-routine

6

MST quantum - Appartenenza al grafo

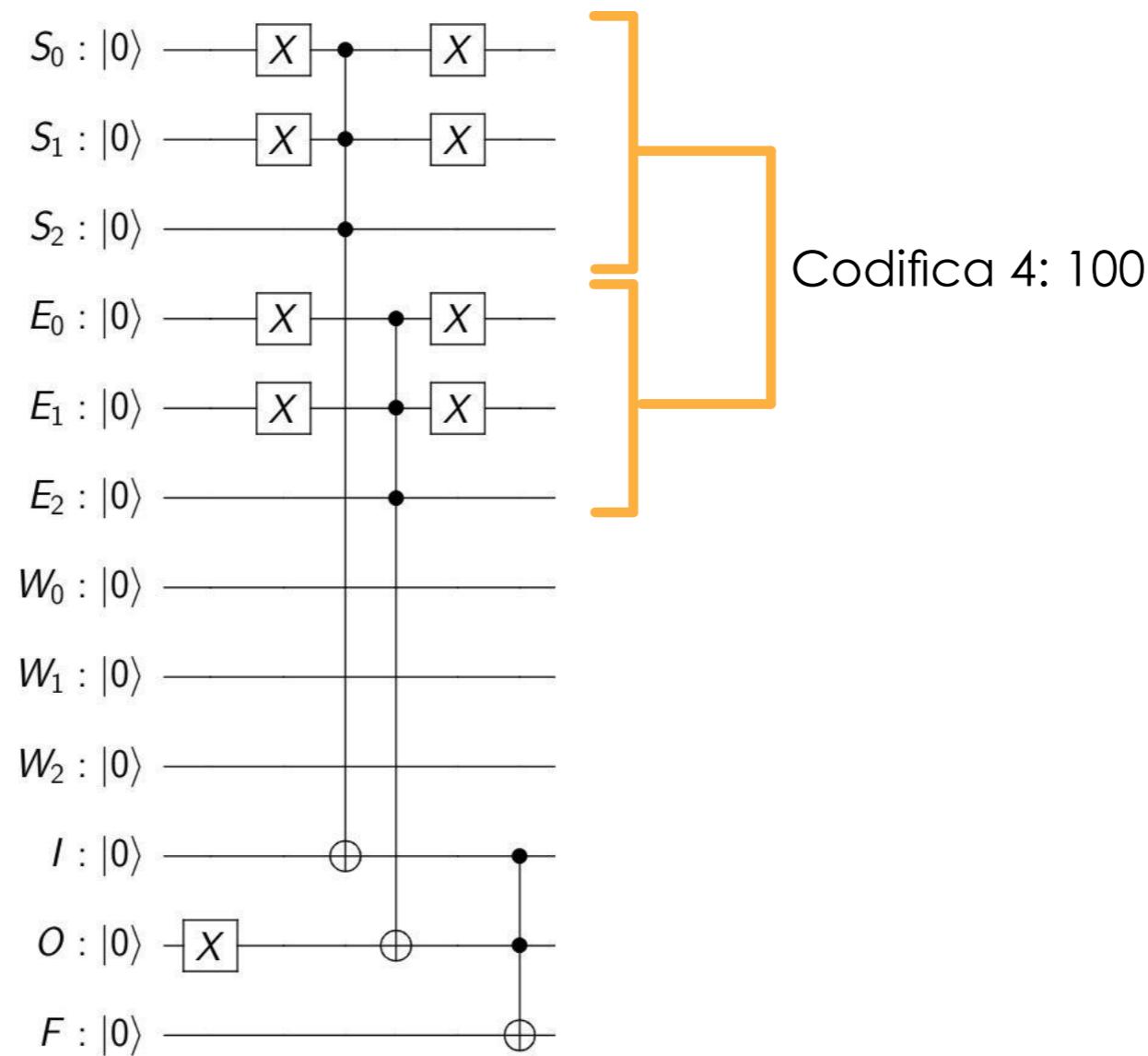
Codifichiamo gli archi del grafo attraverso il nodo di partenza, di arrivo e il peso dell'arco associato. I nodi vengono codificati attraverso i **gate X**, per porre il registro al valore del **nodo (id)**, e il multi-qubit X ha come controllo i qubit dei registri dei nodi e dei pesi e pongono **a 1 un flag se esiste un arco tra i nodi considerati**. Per resettare i registri **si pone un gate X dove era stato precedentemente applicato**.



7

MST quantum - Arco uscente

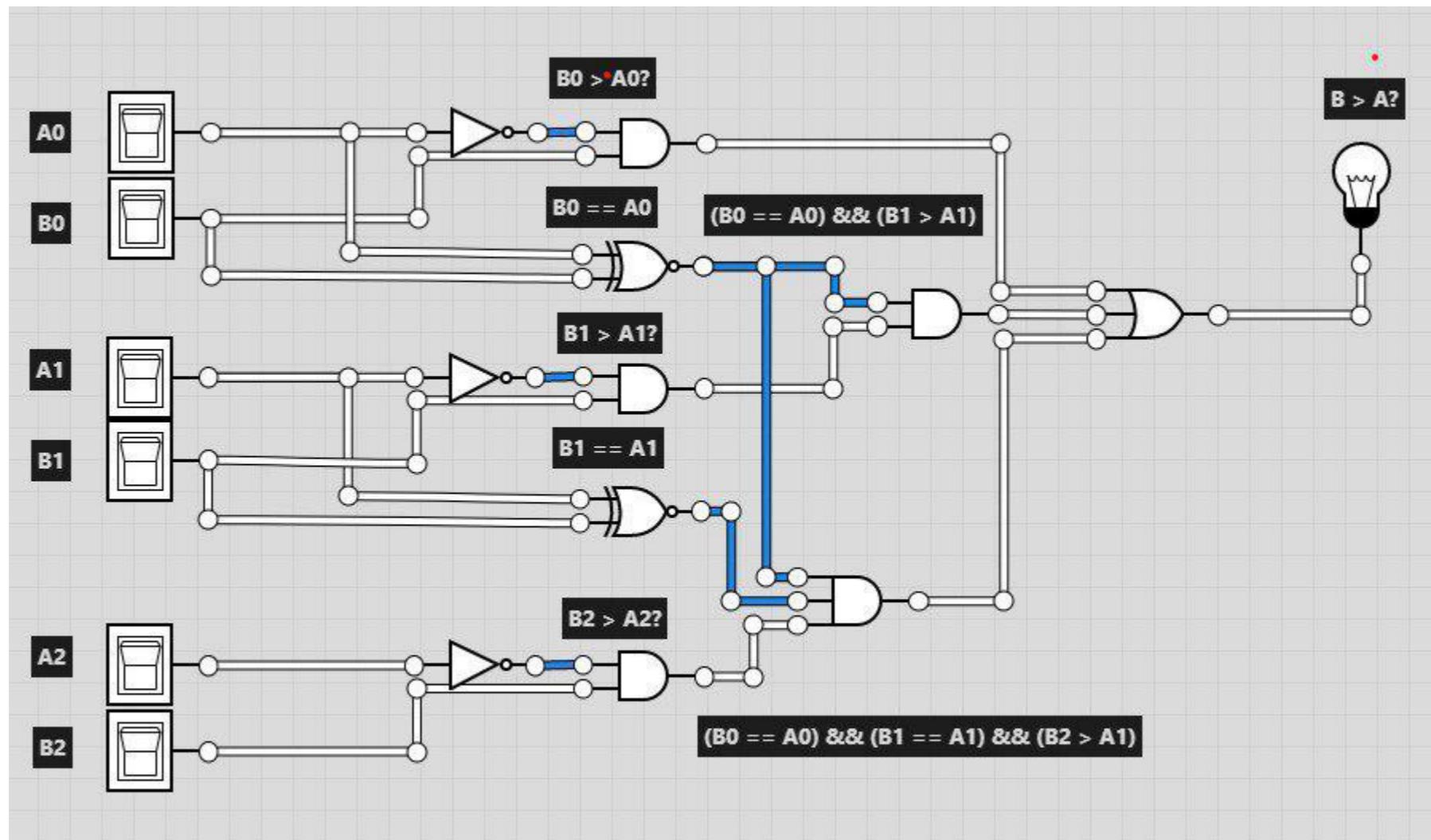
Controlliamo se un determinato **nodo è già stato visitato**. Con il registro start controlliamo che il nodo sia stato visitato e con il registro end controlliamo che il nodo non sia stato visitato. I due risultati **vengono comparati e il risultato messo in output sul qubit di flag**.



8

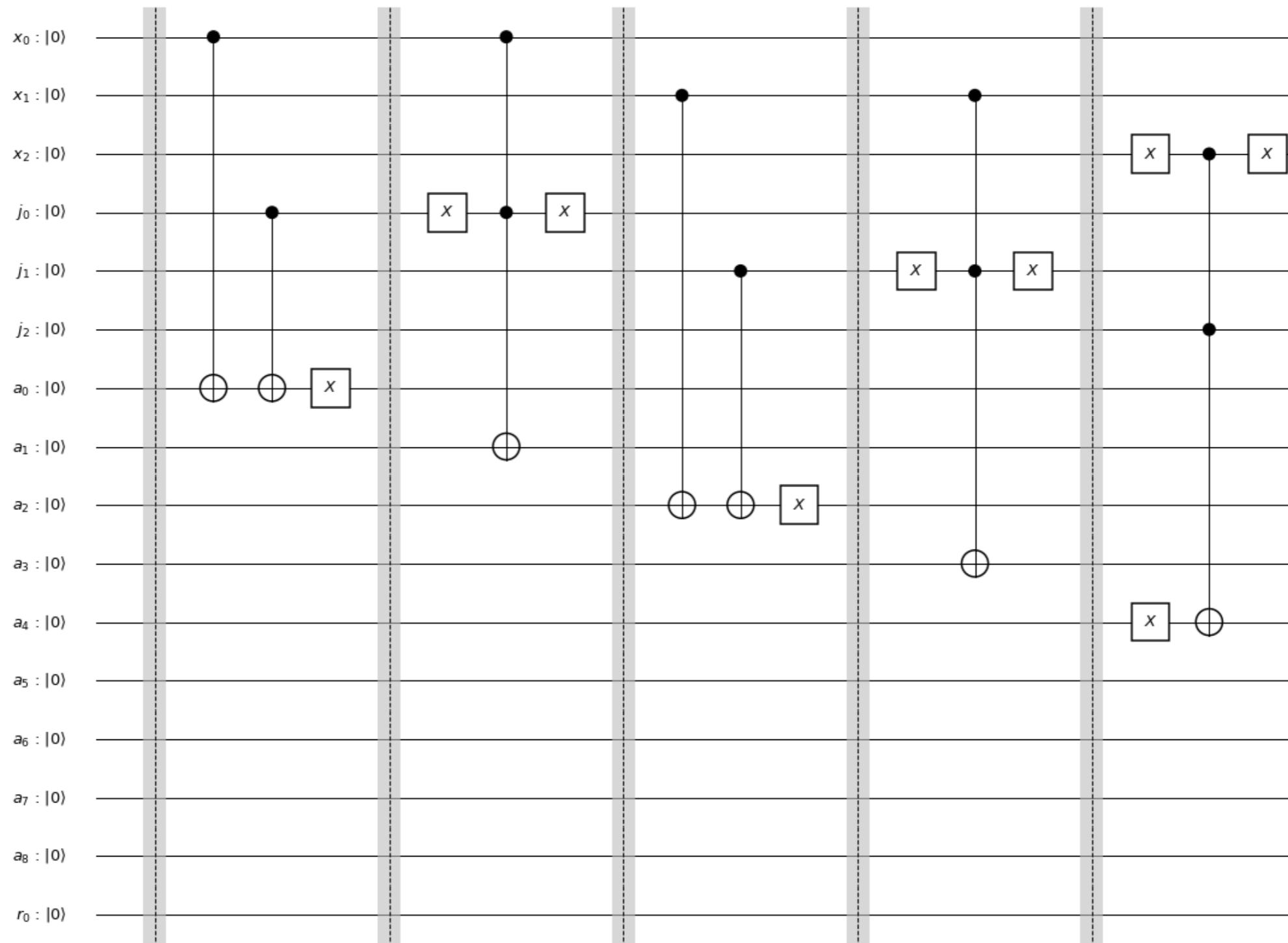
MST quantum - Ricerca minimo

Come già detto in precedenza codifichiamo la ricerca del minimo come una **iterazioni di comparazioni**. La **comparazione di due numeri a N bit** può essere descritta come funzione logica nel seguente modo.



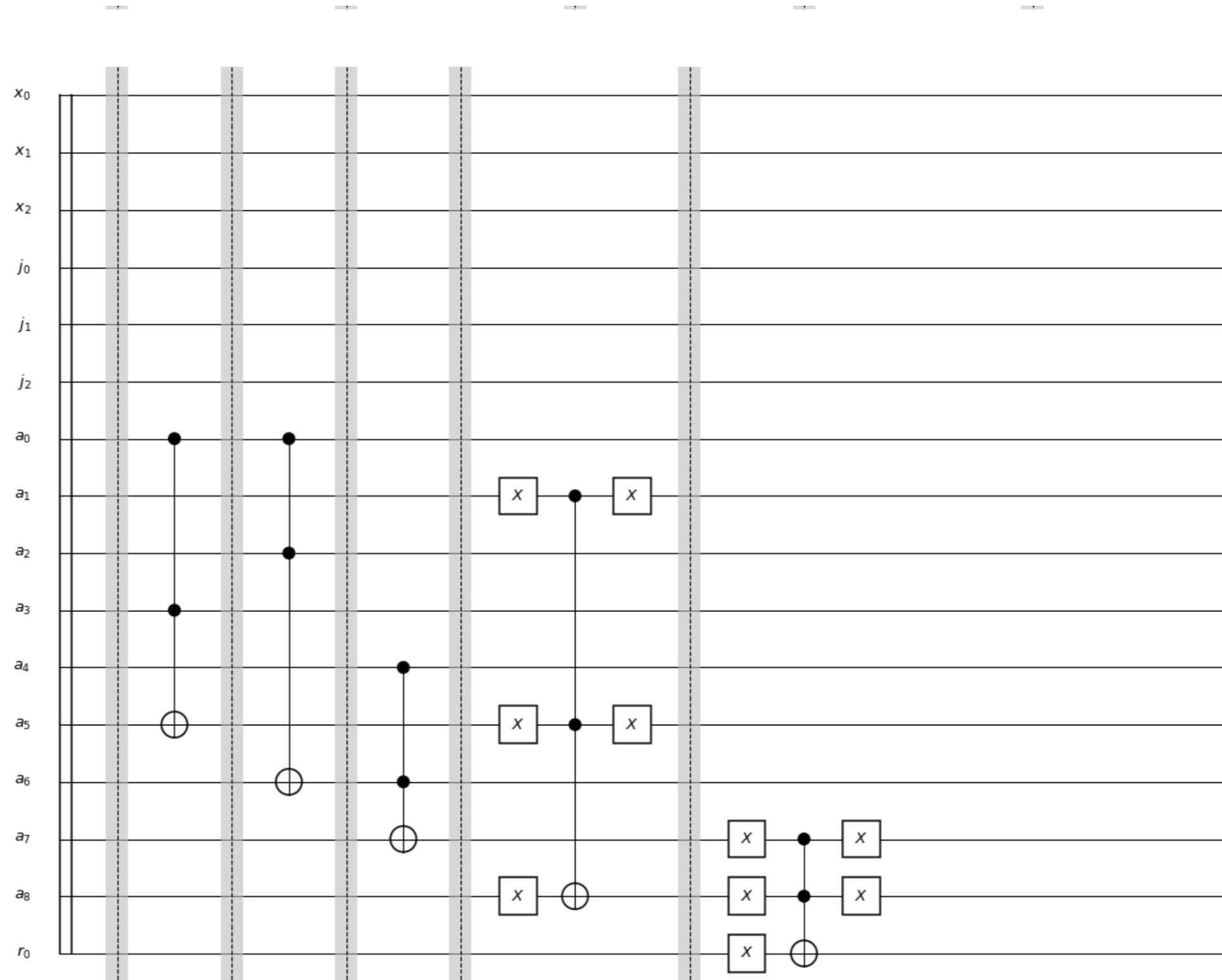
9

MST quantum - comparazione

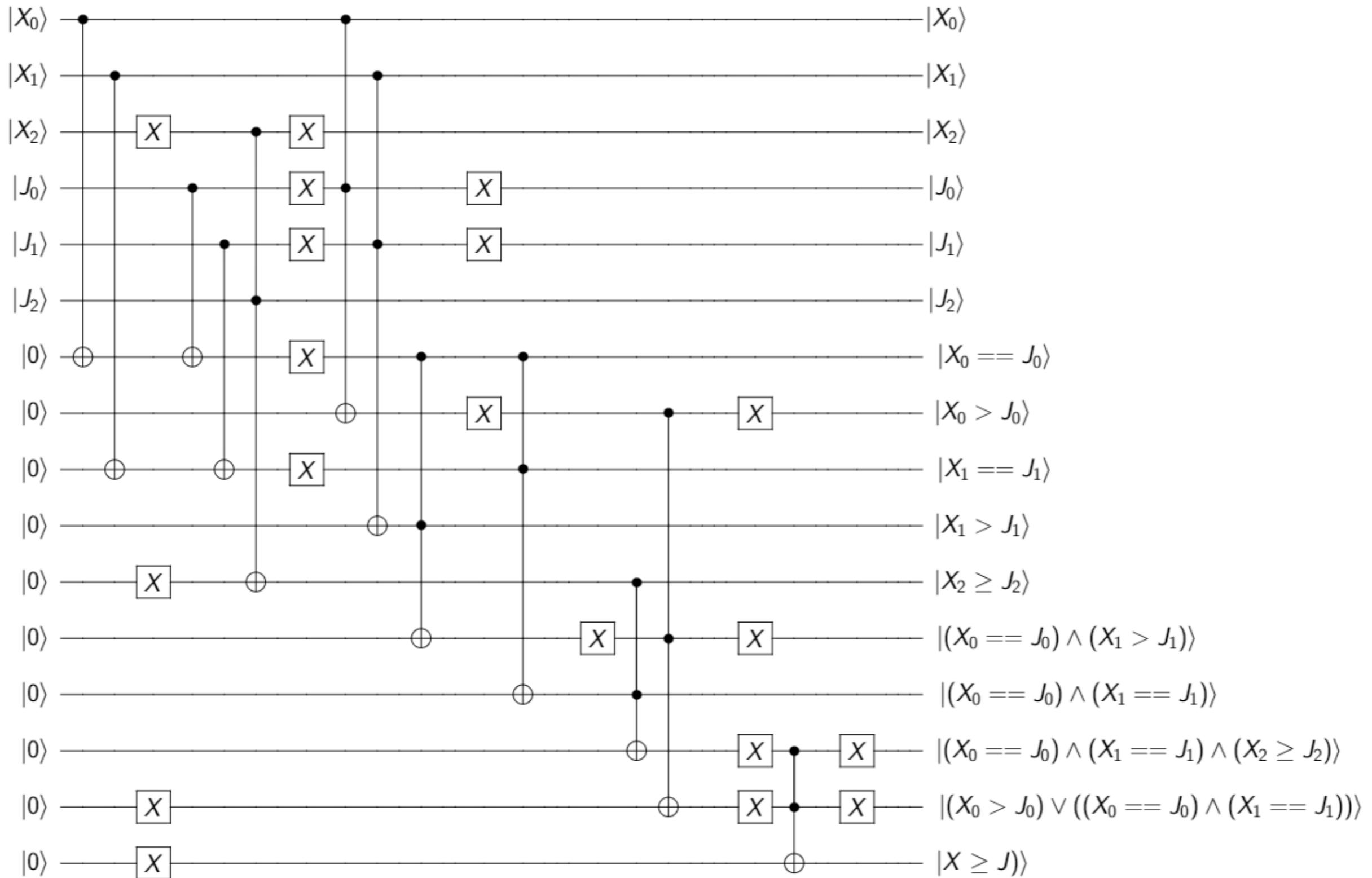


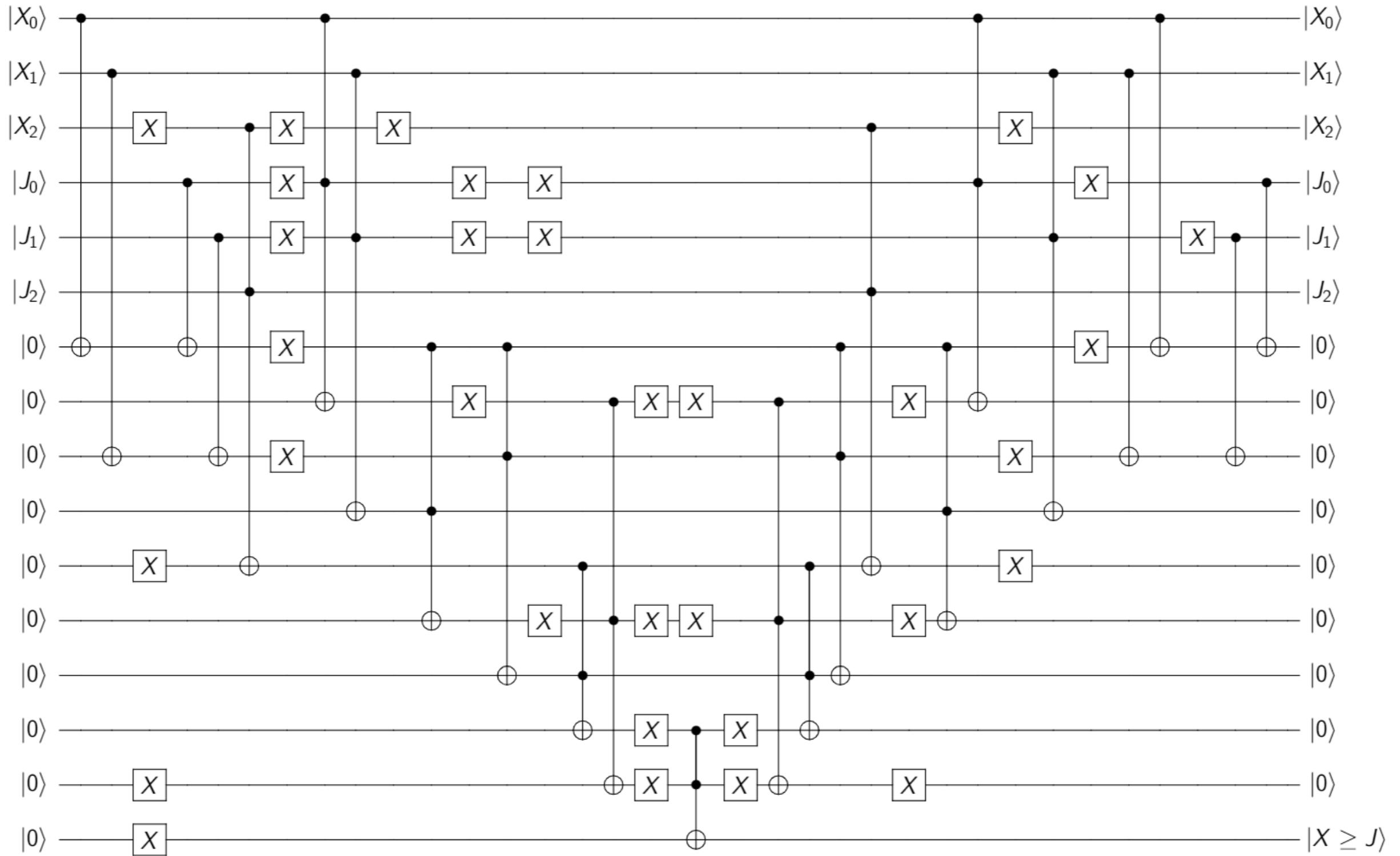
10

MST quantum - comparazione



MST quantum - Comparazione

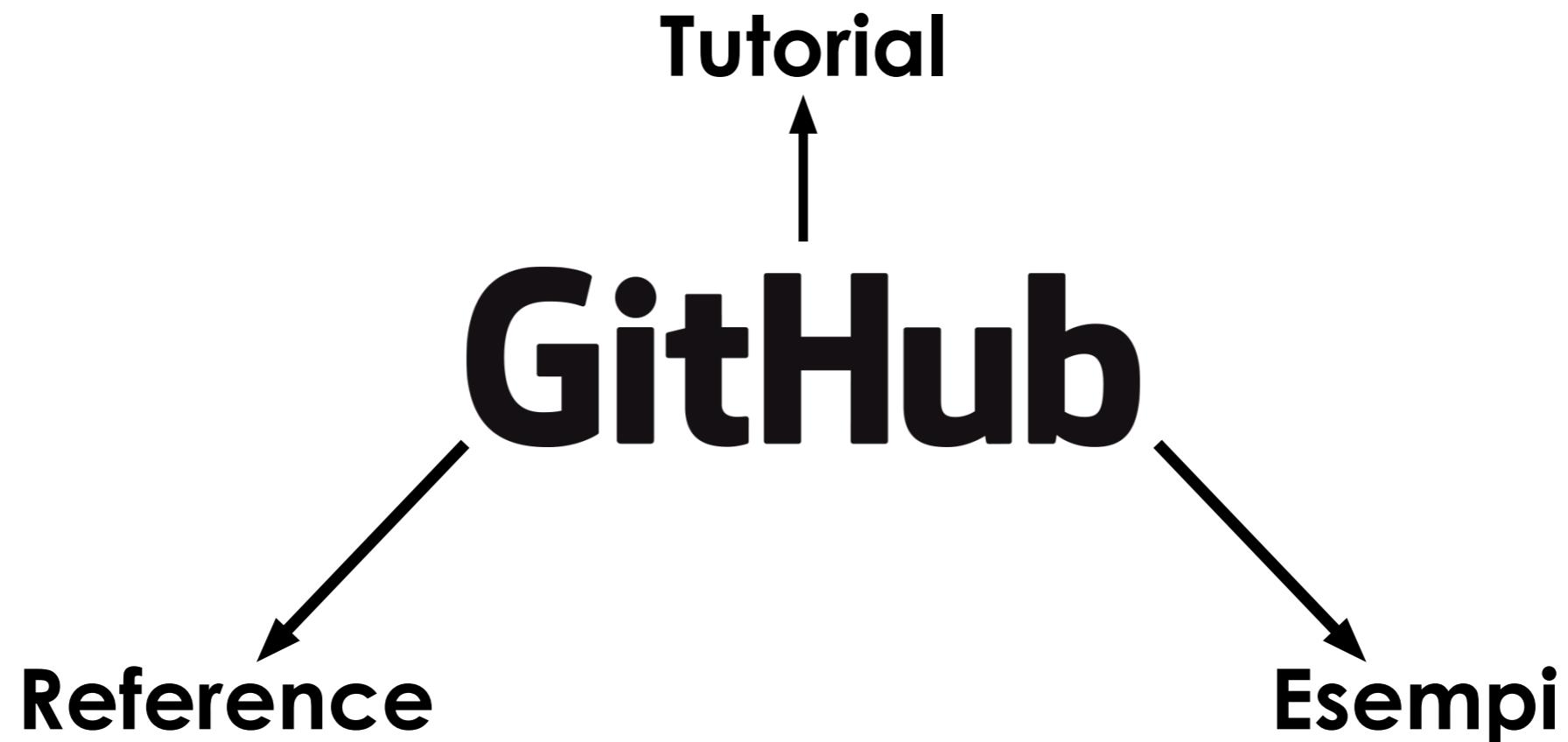




1

Qiskit - Documentazione

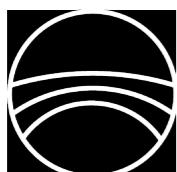
La maggior parte della documentazione di questa piattaforma si può trovare su Github. Qui si possono trovare **reference**, **tutorial** ed **esempi**. Gli esempi sono di grande importanza poiché la **documentazione è molto complicata** e mirata ad una **utenza più esperta del settore**, come scienziati e ricercatori.



Qiskit - Caratteristiche

Qiskit è una piattaforma opensource sviluppata da **IBM basata su C++ e Python**

Qiskit è diviso in **4 macro sezioni**



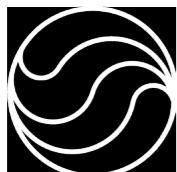
Terra

Contiene tutti gli strumenti di base per lo sviluppo di applicazioni quantum.



Aer

Simulatore di macchine quantum ad “alte prestazioni”.



Aqua

Libreria di algoritmi quantum, utile per implementazioni rapide di algoritmi attualmente ben conosciuti.



Ignis

Racchiude un insieme di strumenti per la simulazione del rumore e l’analisi della computazione.

3

Qiskit - Terra

All'interno di Terra troviamo un'insieme di strumenti per la creazione di applicazioni quantum **a livello di circuiti e segnali**.

Essendo strettamente legata all'hardware sviluppato da IBM, il **set di istruzioni è limitato** rispetto ad altre piattaforme. Per esempio è **impossibile definire direttamente gate controllati a multi qubit** come per esempio i C^NNOT.

Questo suo stretto legame con hardware fisico però ha come vantaggio di poter disporre di una **piattaforma reale con cui testare il codice**.

Qiskit terra  **IBM Q Experience**

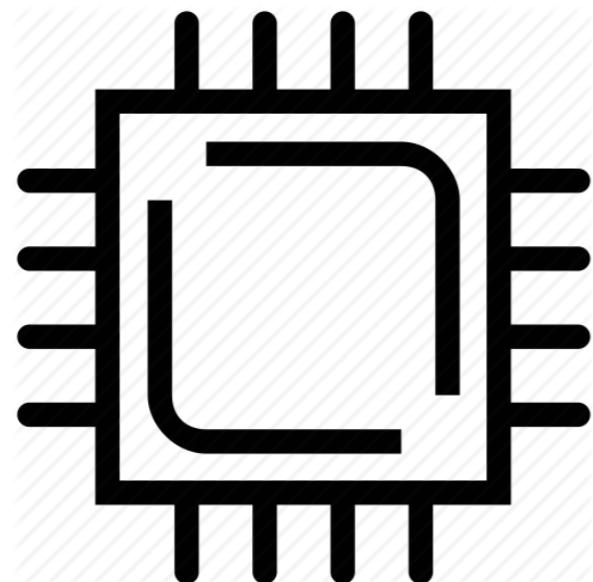
4

Qiskit - Aer

Simulatore di macchine quantum ad “alte prestazioni”. Tra le sue funzionalità troviamo anche la **simulazione del rumore**.

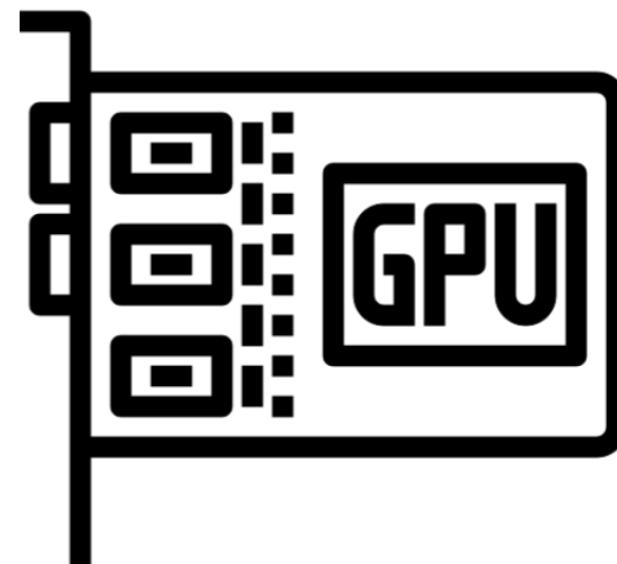
Attualmente **manca il supporto** per eseguire il simulatore su più **processi paralleli**. Questo ovviamente **rallenta notevolmente la simulazione** dei circuiti.

Multi core CPU



Supporto futuro

Schede grafiche



Da poco si è cominciato a sviluppare una **nuova versione per processori multi-core e schede grafiche**.

5

Qiskit - Aqua

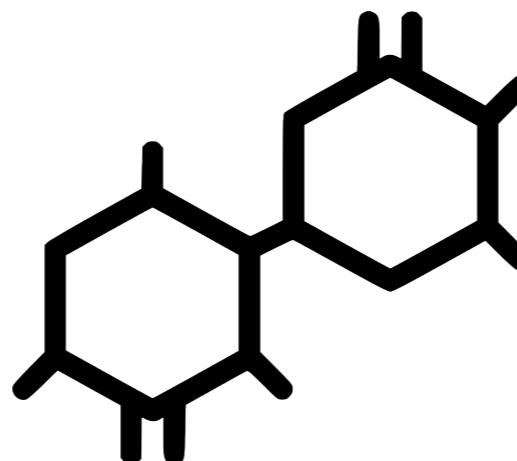
Qiskit Aqua contiene una **libreria di algoritmi quantistici** su più domini, sulla quale si possono **costruire applicazioni per computer quantistici verosimilmente disponibili a breve termine.**

Possibili domini di applicazione possono essere

AI



Chimica



Finanza



Con Qiskit Aqua abbiamo anche la possibilità di fare **override di alcune operazioni di Qiskit Terra**. In questo modo possiamo **implementare gate multi qubit** come il C^NNOT.

6

Qiskit - Ignis

Qiskit Ignis è un framework per **comprendere e mitigare il rumore nei circuiti e dispositivi quantum**. Questo framework contiene **esperimenti per generare circuiti di benchmark**, che posso essere seguiti su macchine quantum reali. Ignis ha anche strumenti per l'**analisi dei risultati**.



Caratterizzazione

Gli esperimenti di caratterizzazione servono a testare la **vita utile dei qubit e il fenomeno del dephasing**. Test mirati all'analisi del **rumore del sistema**.

Verifica

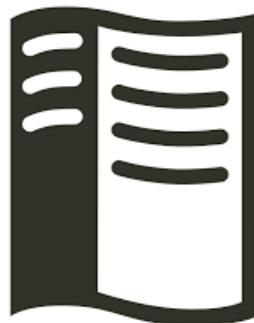
Gli esperimenti di verifica servono a **testare piccoli circuiti attraverso piccoli benchmark**.

Mitigazione

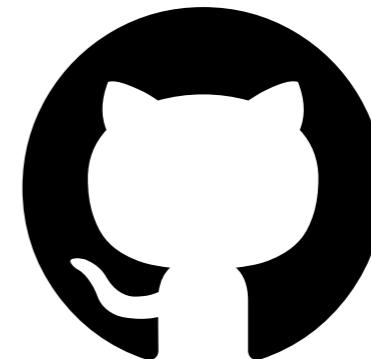
Gli esperimenti di mitigazione servono a **calibrare i sistemi**, creando **routine** che possono essere applicate alla macchina.

1

Cirq - Documentazione



La **documentazione ufficiale** è reperibile sulla piattaforma **Read the Docs**



Alcuni esempi di implementazione su **Github**

Documentazione estremamente **tecnica e specifica**. **Esempi** disponibili **poco numerosi e poco significativi**: sono presenti infatti solo esempi estremamente banali, quali l'aggiunta di gate al circuito, ed esempi estremamente complessi, quali l'implementazione di algoritmi avanzati.

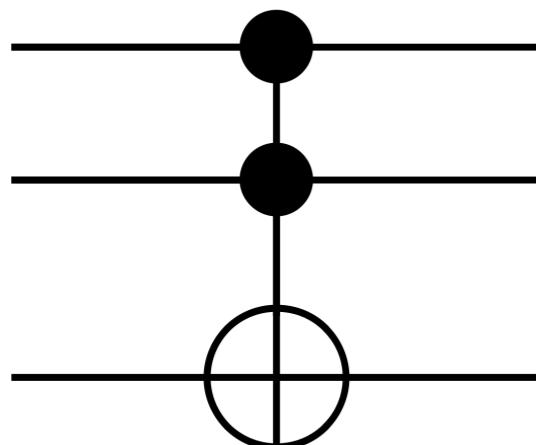
2

Cirq - Caratteristiche

Cirq è un Framework opensource sviluppato da **Google**

È disponibile come libreria **Python**.

Si tratta di una **liberia relativamente giovane**, essendo disponibile in **versione Alpha** da meno di un anno.

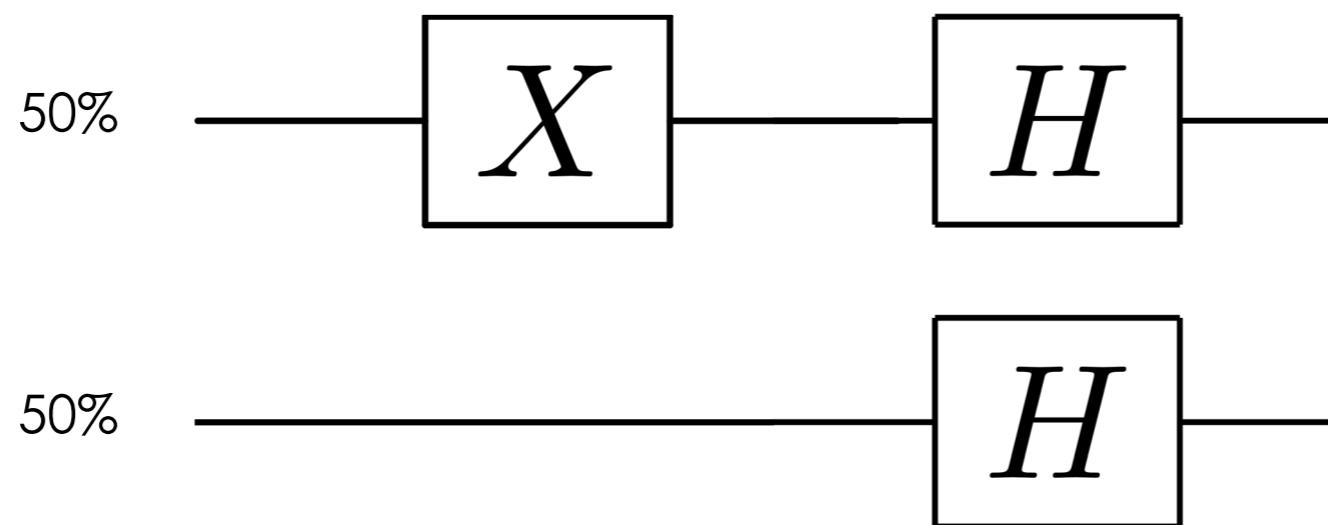


Questo framework offre la possibilità di **creare Gate controllati, scegliendo** arbitrariamente i **bit controllati e i bit controllori**. Questo offre un grande vantaggio rispetto ai framework che non permettono di generare automaticamente Gate controllati, poiché permette di **creare tali Gate senza bisogno di implementarli ex-novo** come combinazione di altri Gate.

3

Cirq - Simulatore

Cirq permette di simulare l'esecuzione di un computer quantistico.



Questo framework offre la possibilità di **aggiungere rumore al circuito**. Uno dei metodi possibili che vengono utilizzati da Cirq consiste nell'**aggiungere casualmente** al circuito possibili **evoluzioni con probabilità diverse**. Un esempio di possibile evoluzione consiste nell'**aggiungere un Gate X che verrà applicato con una certa probabilità**.

4

Cirq - Simulatore

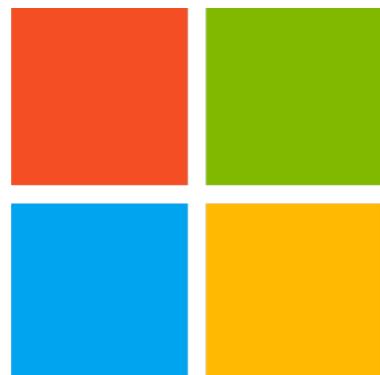
Cirq offre la possibilità di monitorare la **simulazione del circuito passo passo**, mostrando dunque i **risultati intermedi della computazione**.



Attraverso un **iteratore**, è possibile percorrere ogni passo dell'esecuzione a uno a uno. L'iteratore **restituisce lo stato del circuito alla fine del passo** a cui è riferito, **insieme ad eventuali misurazioni** avvenute durante tale passo.

1

QDK - Documentazione



QDK download

Tutorial per la configurazione
del QDK

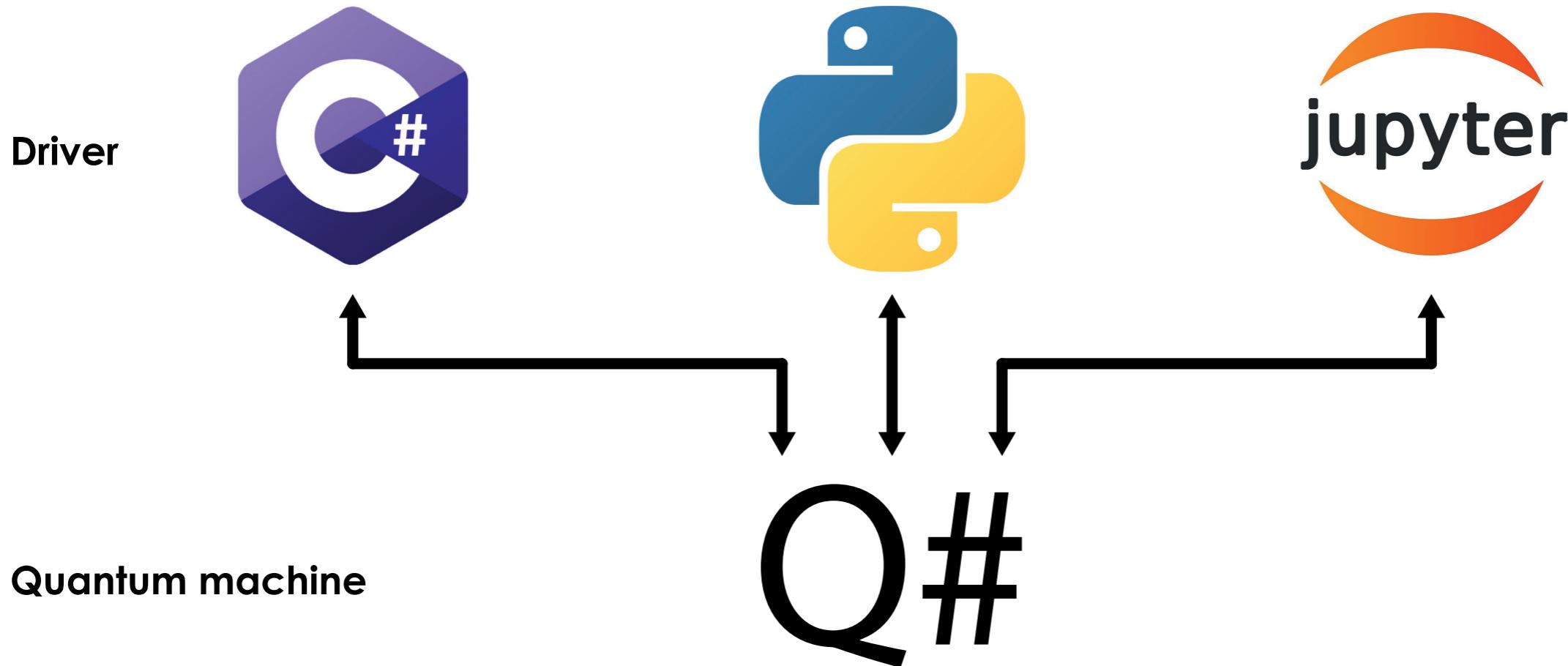
Reference su Q# e algoritmi
quantum

GitHub

Ricca libreria di esempi con
algoritmi già implementati e
esempi di utilizzo di alcune
librerie

Tutorial di configurazione più
approfonditi

La presenza di esempi su **GitHub** viene sfruttata al meglio nel momento in cui si utilizza Visual Studio, il quale permette di **importare repository direttamente dal IDE** così permettendo di avere un **accesso rapidissimo a una grande varietà di esempi**.



Q# è un linguaggio di programmazione ideato appositamente **per sviluppare applicazioni quantum**. L'idea di base dietro la QDK è di avere un processo classico, chiamato **driver**, che **chiama le operazioni scritte in Q#**, le quali **restituiranno il risultato** dell'esecuzione.

3

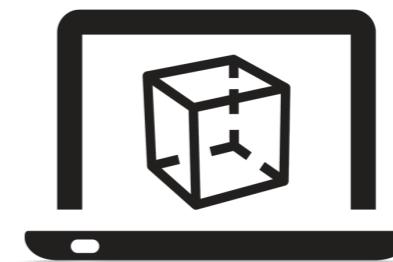
QDK - Caratteristiche (librerie)

QDK mette a disposizione una grande **varietà di librerie** che implementano la maggior parte dei **gate classici e gli algoritmi quantum più conosciuti**. Questa lista è in continua crescita e permette agli sviluppatori di **accelerare lo sviluppo del software**.



`Microsoft.Quantum.diagnostics`

Questa libreria permette di creare **test** per controllare lo stato della macchina, **quando possibile**. La sua struttura si basa sul concetto di **Assert**.



`Microsoft.Quantum.Simulation.Simulator`

Da accesso a una grande **varietà di simulatori con differenti proprietà**. Questo permette agli sviluppatori di utilizzare **simulatori specializzati** per alcune applicazioni.

4

QDK - Simulatori

Full state vector simulator

Questo è il simulatore più utilizzato e simula una **quantum machine completa**. Ha la possibilità di **simulare il rumore** e la capacità di sfruttare il **parallelismo per la simulazione**.

MAX qubit: 30 locale, 40 cloud

Toffoli simulator

Questo simulatore è una **versione semplificata** del full state vector simulator in cui si dispone solamente di **tre gate: X, CNOT e multi-qubit X**. Per la sua semplicità può **simulare molti più qubit**.

MAX qubit: milioni

Resources estimator

Stima le risorse necessarie per eseguire l'algoritmo selezionato. Per far ciò **non esegue effettivamente la simulazione**, così facendo può **simulare** algoritmi che **superano il limite massimo di qubit**.

MAX qubit: non allocati, indefinito

Trace-based resources estimator

Simile allo stimatore semplice ma utilizza anche **assert probabilistici** per dare informazioni più specifiche sulle risorse necessarie

MAX qubit: non allocati, indefinito

5

QDK - Hardware

Al contrario di Rigetti e IBM che hanno costruito **quantum computer basati sulla tecnologia dei superconducting qubits**, Microsoft sta scommettendo su un nuovo tipo di qubits chiamati **topological qubits**, basati su fermioni di Majorana. Questi nuovi qubits dovrebbero garantire tempi di decoerenza migliori.

Superconducting qubits

vs

Topological qubits

PRO

Più facili da produrre

Dovrebbero garantire una de-coherence migliore

CONTRO

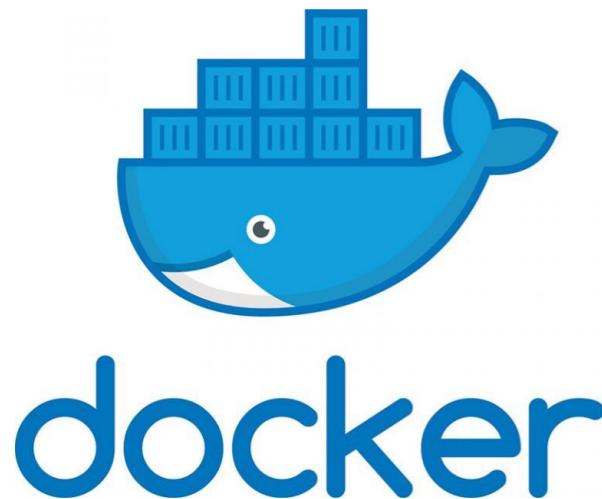
Dechoerence più difficile da gestire

Non esistono ancora qubit di questo tipo

Da poco è possibile utilizzare QuantumExperience di IBM per eseguire codice scritto in Q#.

1

Comparazioni - Test

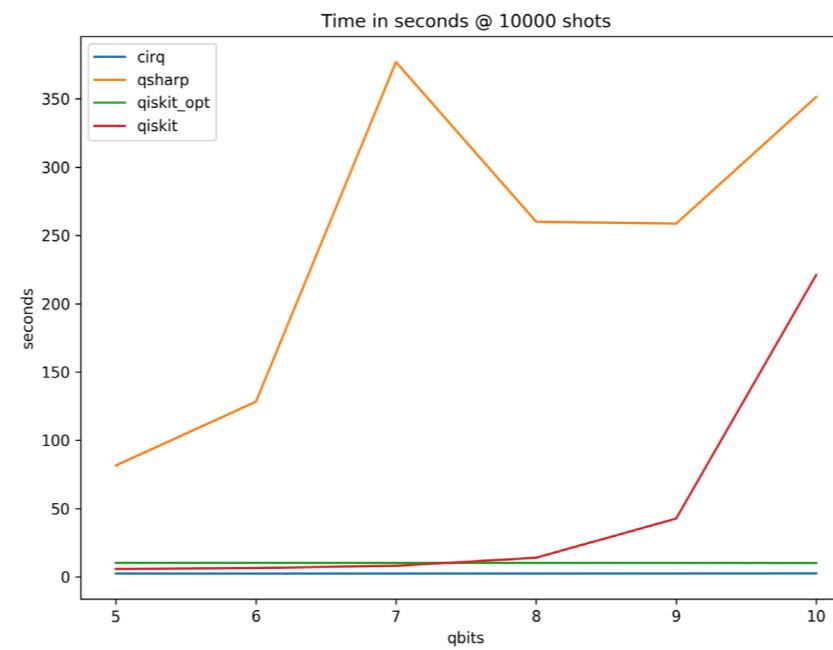
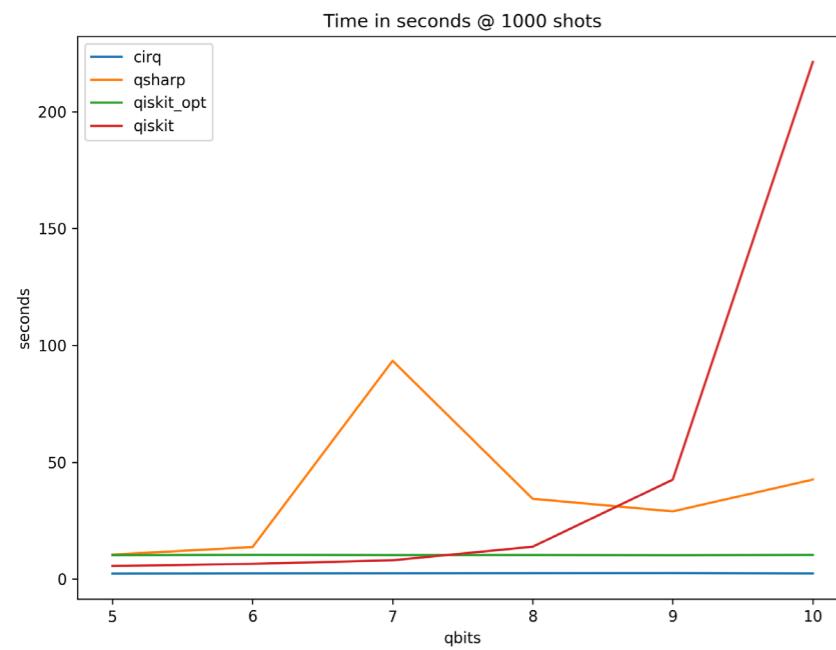
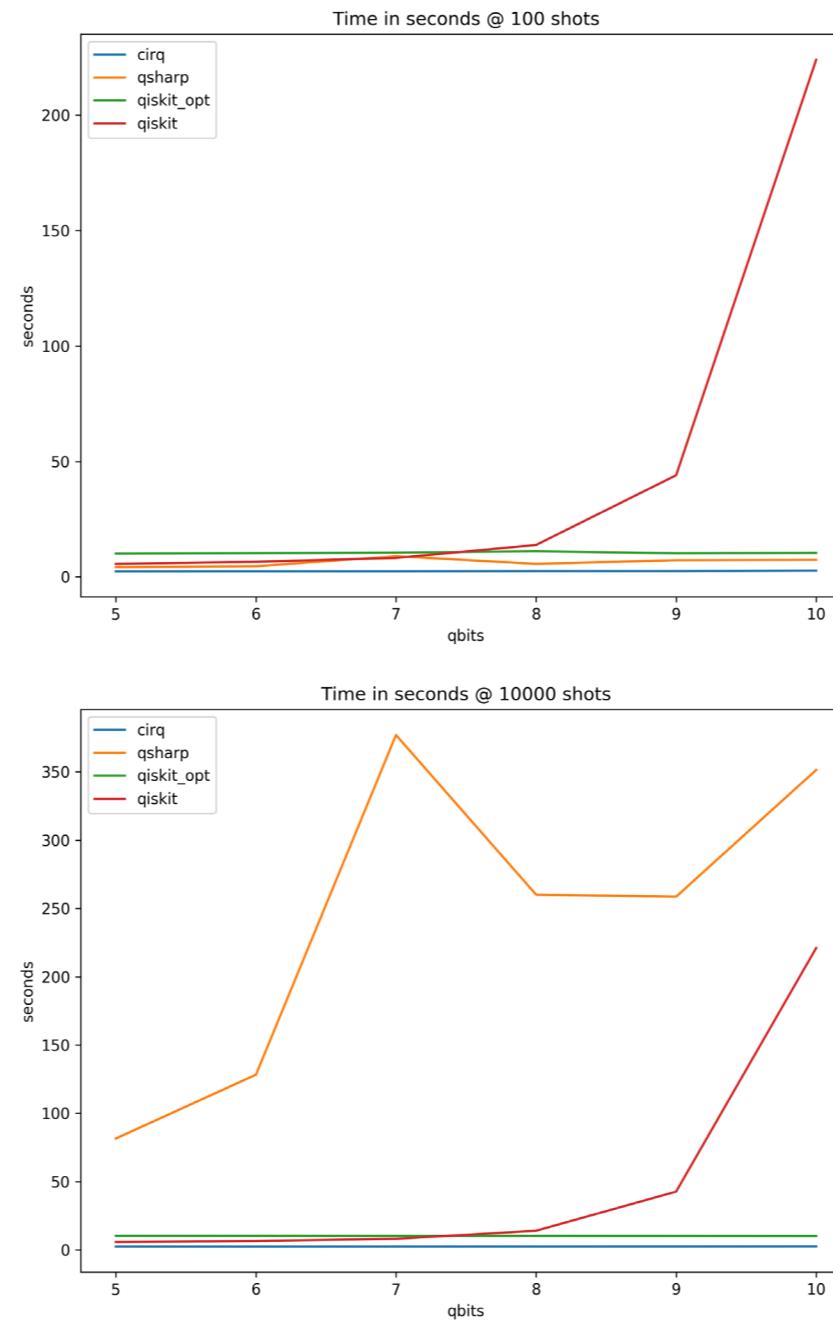
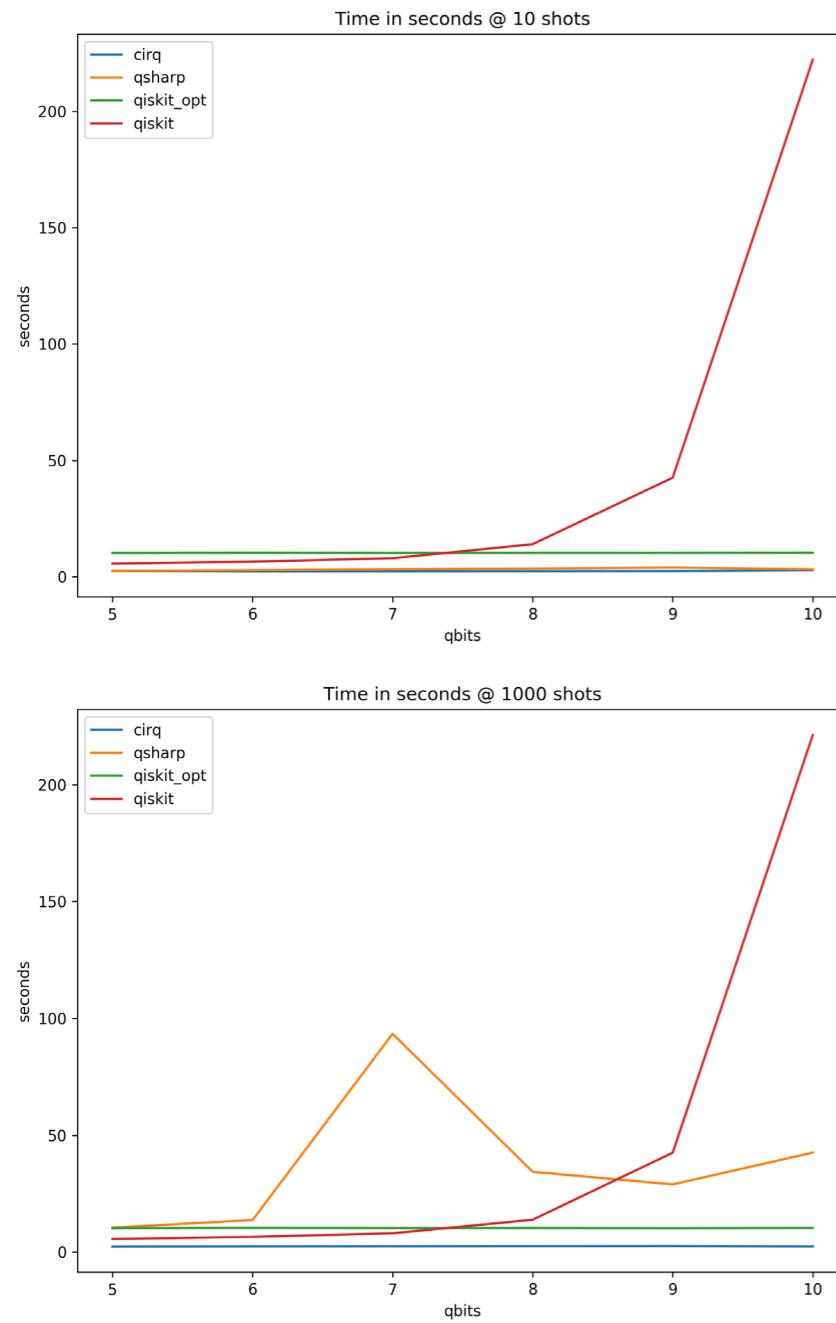


Abbiamo creato un'**immagine Docker** con installati tutti framework analizzati. Per il test abbiamo **implementato, per tutti i framework, l'algoritmo di Grover**. L'esecuzione è stata testata analizzando la **memoria utilizzata e il tempo impiegato** al variare del **numero di qubit e delle ripetizioni**.

Per supportare i test è stato fatto uno **script che genera tutte le possibili combinazioni di numero di qubits e ripetizioni**. Tutti i **dati sono stati raccolti sulla repo e condensati in grafici** che verranno analizzati nelle prossime slide

2

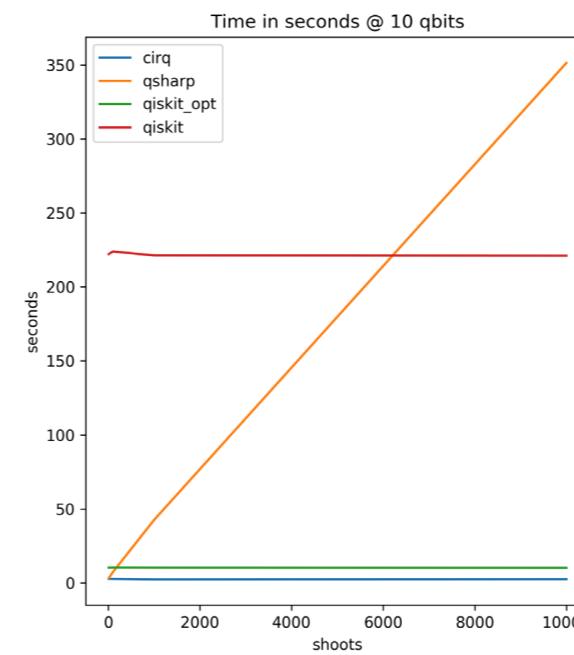
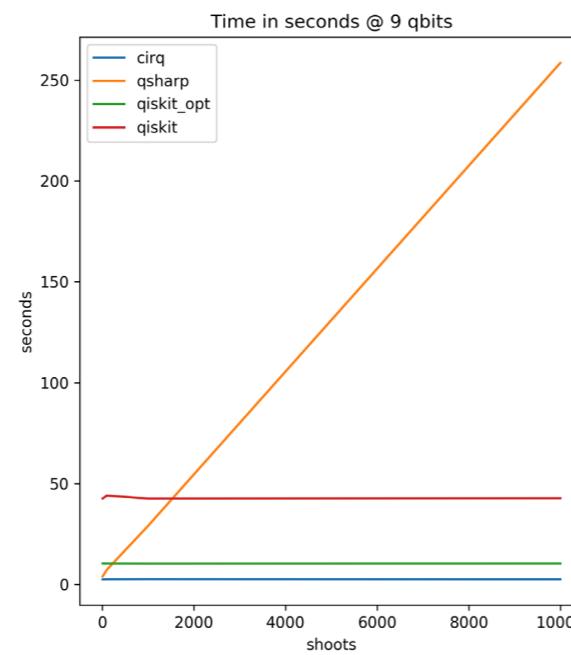
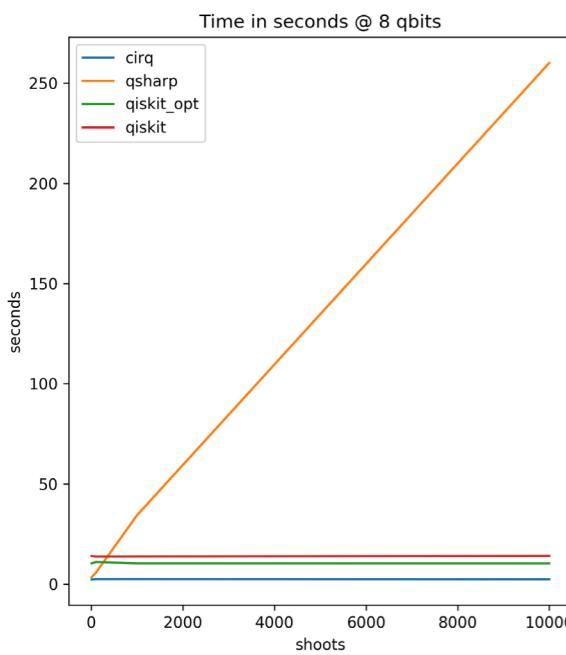
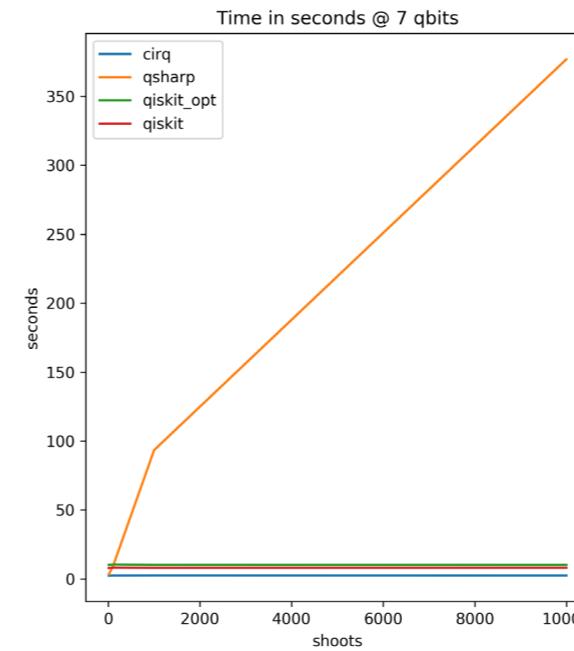
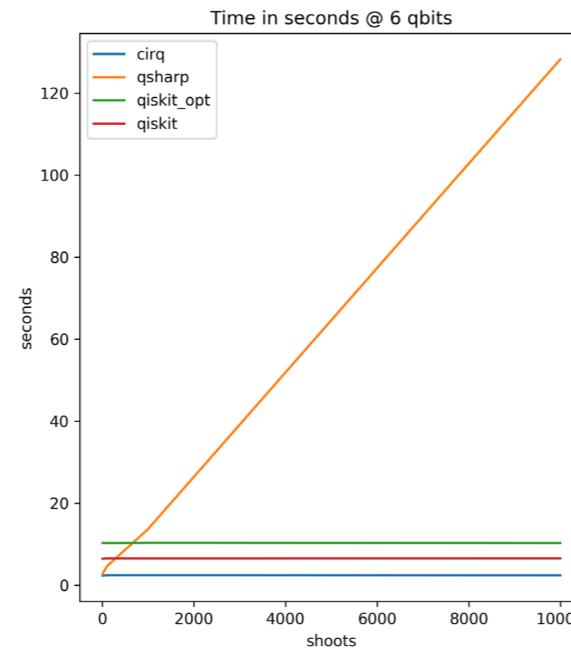
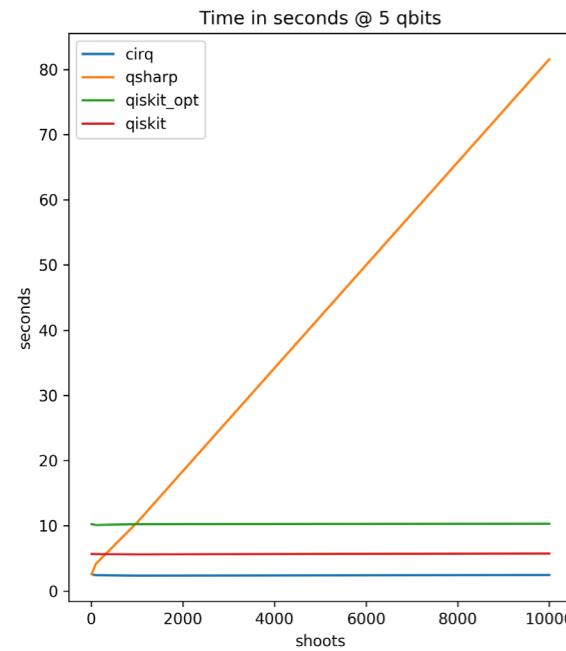
Comparazioni - Tempo



Da come si può notare **Qiskit ottimizzato e Cirq non sono soggetti ad alcuna penalità di tempo** all'aumentare dei qubit. Al contrario **Qiskit ha una penalità esponenziale** all'aumentare dei qubit. Questo ci fa capire che la simulazione della computazione **non presenta ottimizzazioni dal punto di vista del calcoli dei possibili stati della macchina simulata.** Q# invece presenta un andamento altalenante forse dovuto ad ottimizzazioni non applicabili alla totalità dei casi.

3

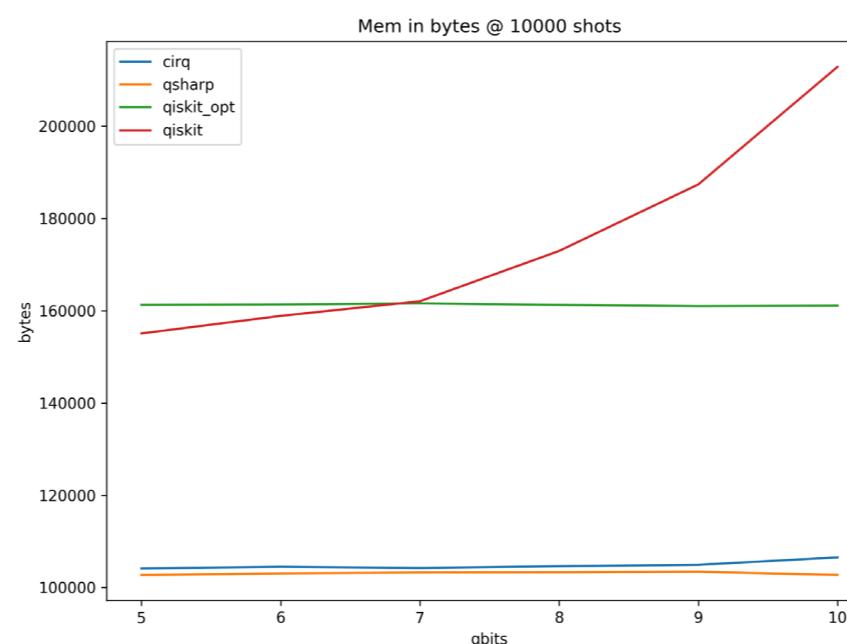
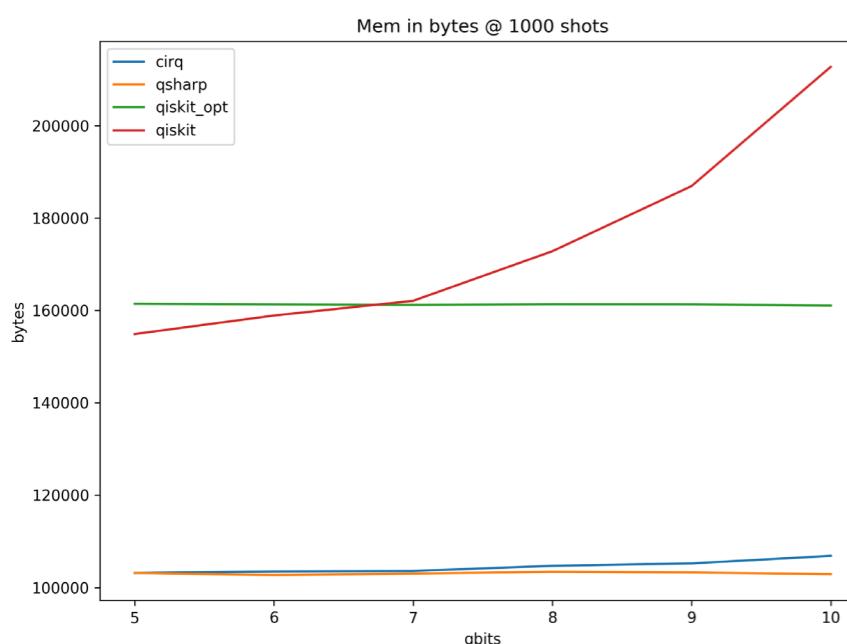
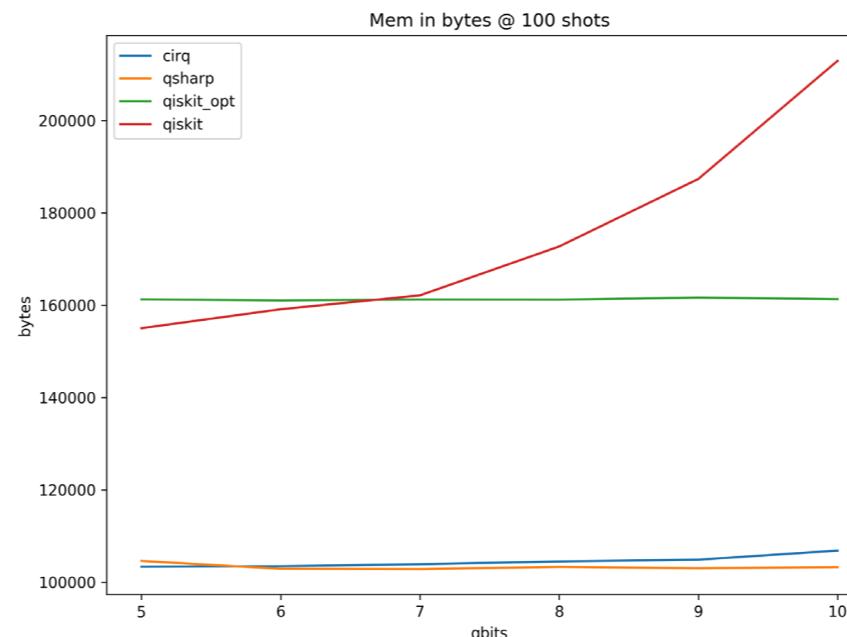
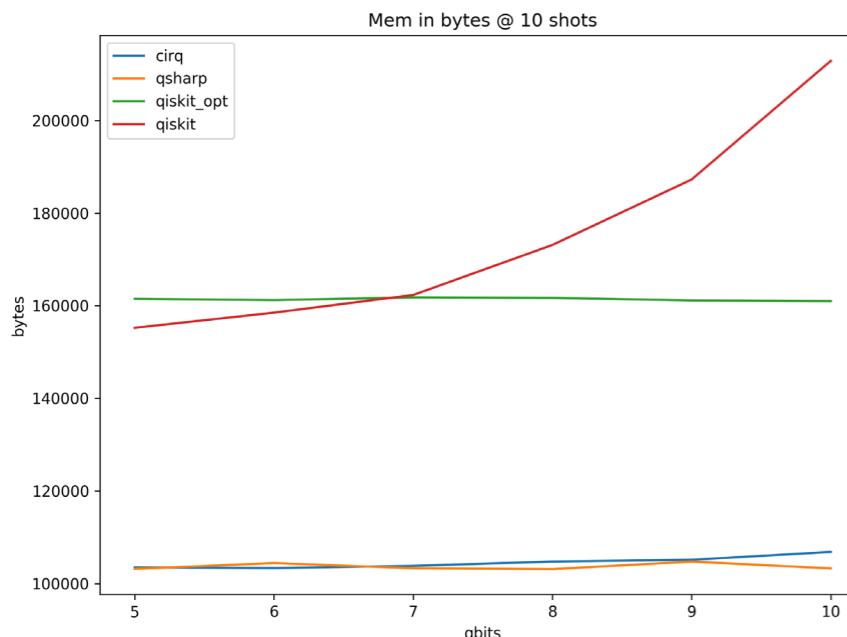
Comparazioni - Tempo



Nei grafici seguenti è stato **fissato il numero di qubits e varia il numero di ripetizioni**. L'unico ad avere **penalità all'aumentare delle ripetizioni** è Q#. Probabilmente simula l'intera macchina senza mai memorizzare gli stati già calcolati. Al contrario **gli altri framework tendono a non ripetere calcoli già effettuati**.

4

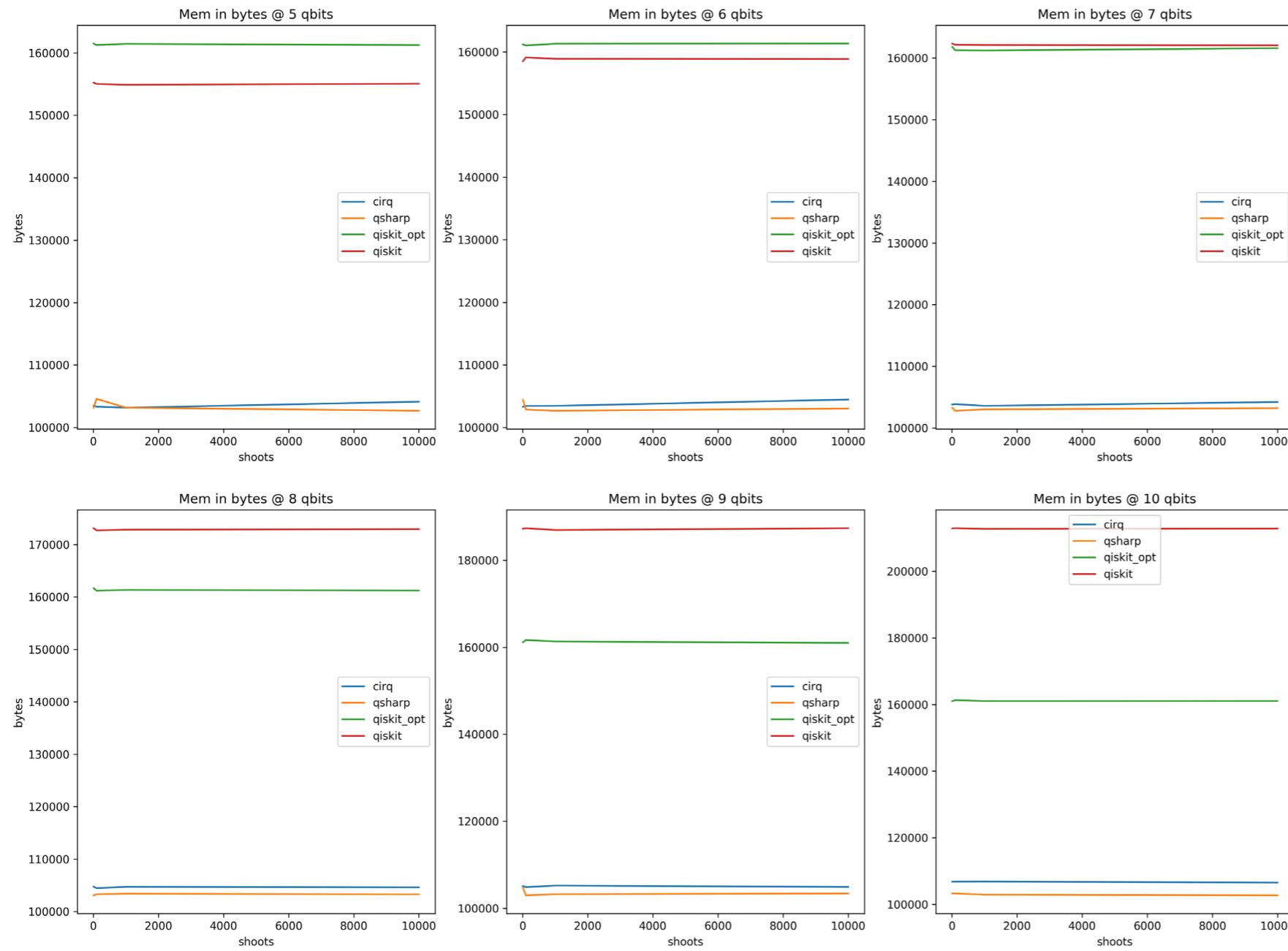
Comparazioni - Memoria



Sia Qiskit ottimizzato che Qiskit presenta un utilizzo di memoria molto più alto rispetto agli altri framework. Oltretutto Qiskit ha sempre un andamento esponenziale all'aumentare dei qubit.

5

Comparazioni - Memoria



Fissando il numero di qubit i framework, dal punto di vista della memoria, **non sono soggetti a penalità all'aumentare delle ripetizioni. Qiskit sia ottimizzato che non rimane comunque il framework meno efficiente dal punto di vista della memoria.**