OPENINDUSTRIA

CULTURA INDUSTRIALE · STRATEGIA D'IMPRESA

WHITE PAPER · OPENINDUSTRIA TECHLAB

Il qubit e la nuova frontiera del calcolo

Come funziona il computer quantistico e perché la correzione d'errore cambia la partita nel 2026

Marco Pugliese

Presidente di OpenIndustria · ORCID 0009-0007-7518-4405

Bolzano, novembre 2026

NOTA DELL'AUTORE

Perché il quantum riguarda l'industria

Per molti anni il calcolo quantistico è stato raccontato come una tecnologia sempre a cinque anni di distanza. Il 2026 cambia il quadro: la correzione degli errori, il vero collo di bottiglia, è stata misurata su macchine commerciali con risultati coerenti con la teoria. Questo white paper spiega in modo rigoroso ma accessibile come funziona il qubit, perché un computer classico non può imitarlo oltre una certa soglia e quali indicatori permettono di leggere con spirito critico gli annunci delle aziende. Per un'associazione che promuove la cultura industriale, capire questa tecnologia significa prepararsi per tempo alle sue ricadute su sicurezza, ricerca e competitività.

Marco Pugliese · Presidente di OpenIndustria · ORCID 0009-0007-7518-4405

SINTESI

1. Il limite classico. Ogni qubit raddoppia la memoria necessaria a simulare la macchina: a 50 qubit servono 18 PB, oltre la capacità di un supercomputer exascale.

2. La correzione funziona. Nel 2026 Quantinuum ha raggiunto una fedeltà logica del 99,9995%, con errori ridotti di 12 volte a ogni aumento della distanza del codice.

3. Leggere i numeri. Contano i qubit logici, il loro tasso d'errore, il rapporto con i qubit fisici e la differenza tra correggere e soltanto rilevare gli errori.

01

Dal bit al qubit

Il bit è un interruttore: vale 0 oppure 1. Il qubit è un sistema quantistico a due livelli che può trovarsi in una sovrapposizione dei due stati, pesati da ampiezze complesse. Ogni stato puro si rappresenta come un punto sulla *sfera di Bloch*, individuato da due angoli: θ, che misura la distanza dai poli, e φ, la fase relativa.

$$|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + e^{i\varphi}\sin\frac{\theta}{2}|1\rangle$$

Le ampiezze diventano probabilità solo alla misura (regola di Born): il qubit restituisce 0 o 1 e lo stato collassa sull'esito. Ai poli il risultato è certo, sull'equatore è testa o croce; la fase φ non cambia queste probabilità ma governa l'interferenza, la risorsa che gli algoritmi quantistici sfruttano. Le piattaforme fisiche oggi più avanzate sono i circuiti superconduttori (IBM, Google), gli ioni intrappolati (Quantinuum, IonQ), gli atomi neutri (QuEra, Atom Computing, Infleqtion) e i fotoni (PsiQuantum); in tutti i casi le porte logiche sono impulsi laser o a microonde che ruotano lo stato sulla sfera.

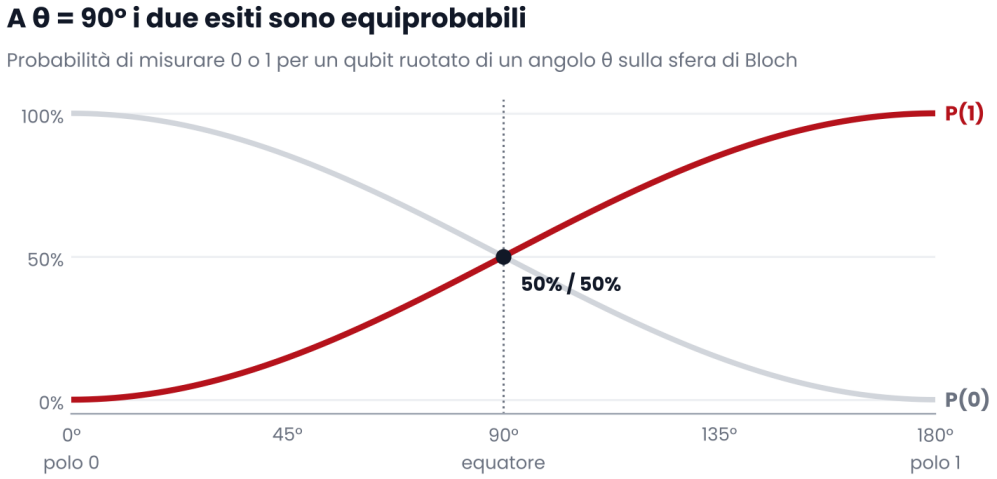


Figura 1 · Calcolo: P(0) = cos²(θ/2), P(1) = sin²(θ/2).

02

Entanglement e il muro della simulazione classica

Con più qubit entra in gioco l'entanglement. Una porta Hadamard seguita da una CNOT produce lo stato di Bell: i due qubit non hanno più uno stato individuale e la misura del primo determina con certezza quella del secondo.

$$|\Phi^+\rangle = \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}$$

Lo stato di n qubit richiede 2^n ampiezze. È un errore diffuso dedurne che la macchina «provi tutte le soluzioni in parallelo»: la misura restituisce una sola stringa di bit, e il vantaggio esiste solo quando l'algoritmo fa interferire le ampiezze fino a concentrare la probabilità sulla risposta corretta, come negli algoritmi di Shor (fattorizzazione), di Grover (ricerca) e nella simulazione di molecole e materiali. Ciò che cresce davvero in modo esponenziale è il costo di imitare la macchina con un computer classico: ogni ampiezza in doppia precisione occupa 16 byte.

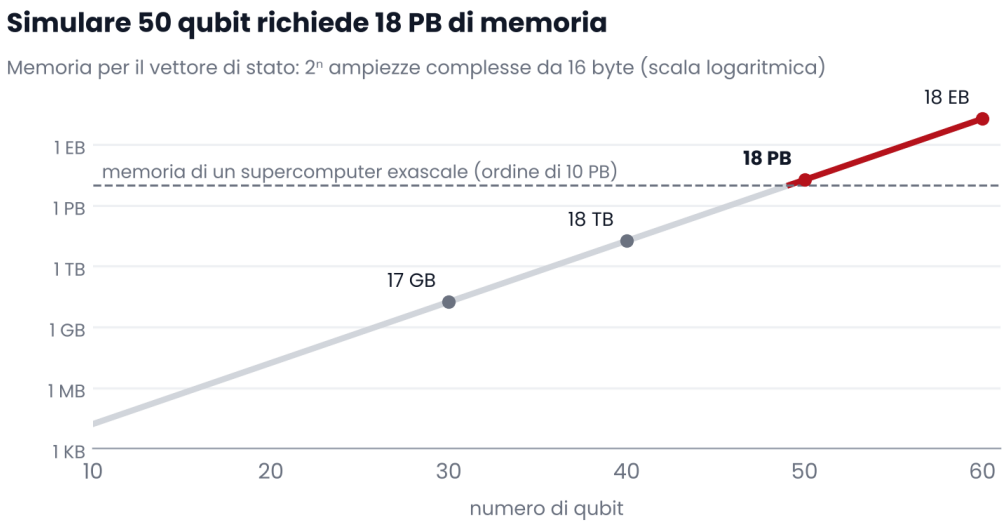


Figura 2 · Calcolo: 16 byte × 2^n. La soglia del supercomputer è un ordine di grandezza indicativo.

Oltre i 45-50 qubit la simulazione esatta esce dalla portata dei maggiori sistemi di calcolo; i metodi approssimati, come le reti tensoriali, spostano il limite solo per circuiti poco entangled. È in questa zona che si colloca il potenziale vantaggio quantistico, a condizione che la macchina sia abbastanza affidabile da eseguire circuiti profondi.

03

La fragilità e la correzione d'errore

Il qubit perde coerenza interagendo con l'ambiente (tempi T_1 e T_2) e ogni porta introduce un errore: le migliori porte a due qubit sbagliano circa una volta su mille, troppo per algoritmi che richiedono milioni o miliardi di operazioni. Poiché un qubit non si può copiare (teorema di no-cloning) né leggere senza distruggerlo, la correzione d'errore codifica un *qubit logico* nell'entanglement di molti qubit fisici e misura soltanto controlli di parità, le sindromi, che localizzano l'errore senza rivelare l'informazione. Se l'errore fisico è sotto la soglia del codice, ogni aumento della distanza d moltiplica la protezione, al prezzo di più qubit fisici: circa $2d^2$ nel codice di superficie.

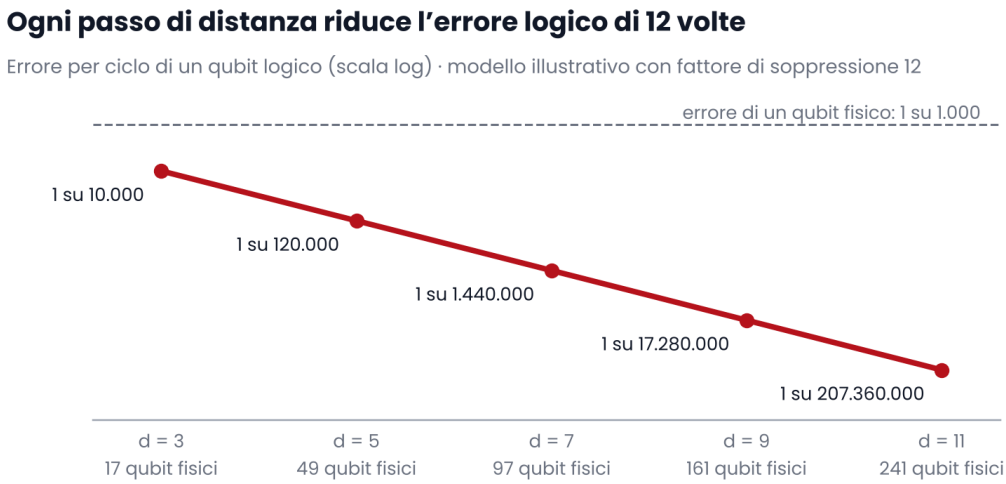


Figura 3 · Modello illustrativo: errore a d = 3 fissato a 1 su 10.000; fattore di soppressione 12 per passo, come riportato da Quantinuum (ottobre 2026); qubit fisici stimati con $2d^2 - 1$.

04

Lo stato dell'arte nel 2026

Nel 2026 la soppressione esponenziale dell'errore è uscita dai modelli ed è stata osservata su sistemi commerciali di tecnologie diverse. La tabella riassume i risultati principali.

Data	Chi	Piattaforma	Risultato
ott. 2026	Quantinuum	Ioni intrappolati, Helios	Fedeltà logica 99,9995% con color code; errore logico ridotto di 12 volte a ogni aumento di distanza; qubit logico circa 100 volte migliore dei fisici
set. 2026	Quantinuum	Ioni intrappolati, Helios	Codice Helix: record di memoria e calcolo logici con meno qubit fisici

Data	Chi	Piattaforma	Risultato
set. 2026	Infleqtion	Atomi neutri, Sqale	30 qubit logici entangled su 80 atomi; codice a distanza 2, rileva ma non corregge
giu. 2026	Atom Computing	Atomi neutri	Prima correzione con toric code su più cicli; errore logico in calo con la scala
giu. 2026	Microsoft e Quantinuum	Ioni intrappolati	Errore logico ridotto fino a 800 volte (Nature)

Fonti: HPCwire, VMblog, PostQuantum, Dealroom, The Week in Quantum Computing (vedi Fonti).

Il costo della protezione si misura in qubit fisici per qubit logico e varia di oltre un ordine di grandezza tra gli approcci. Il valore più basso, quello di Infleqtion, non è confrontabile con gli altri perché un codice a distanza 2 segnala l'errore senza correggerlo e scarta le esecuzioni difettose; tra i codici che correggono, Quantinuum riporta che Helix usa meno qubit, mentre il color code ottiene errori logici più bassi.

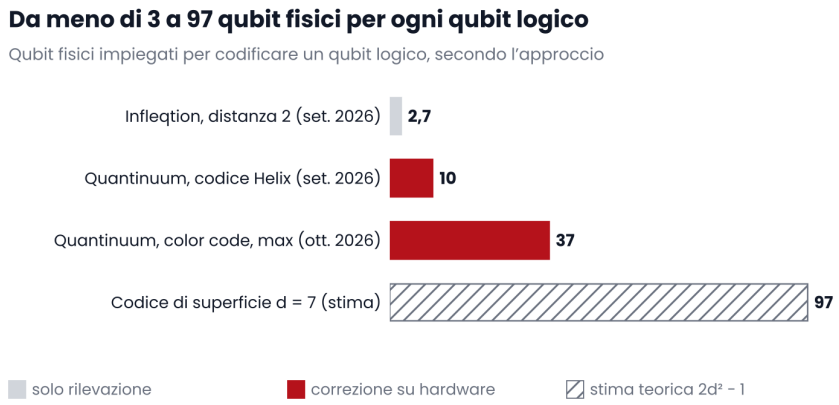


Figura 4 · Fonti: HPCwire (Quantinuum, ottobre 2026), PostQuantum (Infleqtion, settembre 2026); codice di superficie: stima teorica.

05

Implicazioni per imprese e istituzioni

L'orizzonte dichiarato per una macchina universale tollerante ai guasti si è accorciato: Quantinuum indica il 2029 per Apollo. La ricaduta strategica più immediata riguarda la sicurezza informatica. Su una macchina di questo tipo l'algoritmo di Shor renderebbe vulnerabili RSA e la crittografia a curve ellittiche, e la minaccia «harvest now, decrypt later», cioè dati cifrati raccolti oggi per essere decifrati domani, rende urgente la migrazione agli standard post-quantum pubblicati dal NIST nel 2024. Per imprese e amministrazioni la priorità non è acquistare calcolo quantistico, ma censire i sistemi crittografici in uso e pianificarne la sostituzione, a partire dai dati con una vita utile lunga.

Sul piano industriale, la competizione si sposta dalla fisica all'ingegneria di sistema: controllo elettronico, criogenia e laser, software di decodifica in tempo reale, spesso basato su intelligenza artificiale. Nella lettura degli annunci conviene infine monitorare quattro indicatori: numero di qubit logici, tasso d'errore logico, rapporto tra qubit fisici e logici, correzione effettiva o semplice rilevazione. Il numero di qubit fisici, preso da solo, non dice più molto.

Fonti

· Quantinuum, fedeltà logica 99,9995% su Helios. HPCwire, ottobre 2026. hpcwire.com/off-the-wire/quantinuum-reports-99-9995-logical-fidelity-on-helios-quantum-computer

· Quantinuum, record di correzione d’errore e roadmap Apollo. VMblog, 19 ottobre 2026. vmblog.com/?p=88090

· Infleqtion, 30 qubit logici con rilevazione d’errore. PostQuantum, 24 settembre 2026. postquantum.com/industry-news/infleqtion-30-logical-qubits

· Atom Computing, correzione d’errore con toric code. Dealroom, giugno 2026. app.dealroom.co/news/feed/atom-computing-achieves-quantum-error-correction-with-toric-code-using-neutral-atoms

· Microsoft e Quantinuum, riduzione fino a 800 volte dell’errore logico. The Week in Quantum Computing, 15 giugno 2026. quantumpirates.substack.com