
STRATEGIA ITALIANA PER LE TECNOLOGIE QUANTISTICHE

v-1.0 IN CONSULTAZIONE, 25 febbraio 2025

Gruppo di lavoro per la strategia quantistica italiana

Sanzio Bassini, CINECA;

Daniele Binosi, ECT*-Fondazione Bruno Kessler

Edoardo Bompiani, Ministero delle Imprese e del Made in Italy;

Raffaello Bronzini, Ministero dell'Università e della Ricerca;

Davide Calonico, Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica;

Valentina Cardinale, Ministero dell'Università e della Ricerca;

Francesco Saverio Cataliotti, CNR- INO;

Fabrizio Ciarlo, Ministero delle Imprese e del Made in Italy;

Roberto Cimino, Ministero dell'Università e della Ricerca;

Camilla Chiodi, Istituto Nazionale di Fisica nucleare;

Alessandra D'Ambrosio, Ministero delle Imprese e del Made in Italy;

Luca De Angelis, Ministero delle Imprese e del Made in Italy;

Paolo De Natale, CNR-INO;

Elisa Ercolessi, Università di Bologna;

Francesca Galli, Ministero dell'Università e della Ricerca;

Pasquale Guadagno, Ministero della Difesa;

Liviana Lotti, Agenzia per la Cybersicurezza Nazionale;

Stefano Luvini, Ministero delle Imprese e del Made in Italy;

Chiara Macchiavello, Università di Pavia;

Emanuele Nastri, Ministero delle Imprese e del Made in Italy;

Luca Nicoletti, Agenzia per la Cybersicurezza Nazionale

Elisabetta Paladino, Università di Catania;

Massimo Palma, Università di Palermo;

Michela Pellegatta, Ministero dell'Università e della Ricerca;

Vincenzo Pullez, Ministero della Difesa;

Paolo Sandri, Ministero della Difesa;

Serafino Sorrenti, Dipartimento per la Transizione Digitale della Presidenza del Consiglio dei Ministri;

Costanza Toninelli, CNR-INO;

Melissa Valentino, Ministero dell'Università e della Ricerca;

Valeria Vinci, Ministero delle Imprese e del Made in Italy;

Antonio Zoccoli, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

BOZZA

Indice

Glossario	5
1. EXECUTIVE SUMMARY	6
2. IL CONTESTO ITALIANO	7
2.1 LE TECNOLOGIE QUANTISTICHE: SETTORI E SINERGIE.....	7
2.1.1 Scienza quantistica di base.....	9
2.1.2 Calcolo quantistico.....	10
2.1.3 Simulazione quantistica	13
2.1.4 Comunicazione quantistica	14
2.1.5 Metrologia e sensoristica quantistica	16
2.1.6 Sinergie tra tecnologie quantistiche	18
2.1.7 Tecnologie abilitanti e catena del valore	19
2.2 L'ECOSISTEMA ITALIANO DELLE TECNOLOGIE QUANTISTICHE	23
2.2.1 L'ecosistema industriale italiano	23
2.2.2 Progetti di ricerca finanziati dal Ministero dell'Università e della Ricerca	28
2.2.3 Il sistema di istruzione e formazione della forza lavoro	34
2.3 IL POSIZIONAMENTO DELL'ITALIA A LIVELLO INTERNAZIONALE.....	35
2.3.1 Punti di forza, debolezza, opportunità e rischi.....	37
3. LINEE DI AZIONE FUTURE	38
3.1 DIREZIONI DI SVILUPPO SCIENTIFICO.....	38
3.1.1 Scienza quantistica di base.....	38
3.1.2 Calcolo quantistico.....	39
3.1.3 Simulazione quantistica	40
3.1.4 Comunicazione quantistica	40
3.1.5 Metrologia e sensoristica quantistica	41
3.1.6 Tecnologie abilitanti	43
3.2 RACCOMANDAZIONI STRATEGICHE	44
3.2.1 Ricerca	44
3.2.2 Trasferimento tecnologico	47
3.2.3 Istruzione e formazione della forza lavoro	50
3.2.4 Standardizzazione e benchmarking	52
3.2.5 Comunicazione e sensibilizzazione	55

3.2.6 Industria	57
4. GOVERNANCE, INCLUSI SVILUPPI LEGISLATIVI	60

Nota: parte delle sezioni 2.1, 2.1.6, 2.1.7, 2.2.1, 2.3, 3.2.6 è stata tratta dal report “*Ecosistema industriale italiano delle tecnologie quantistiche. Analisi e prospettive strategiche*” redatto dal Ministero delle Imprese e del Made in Italy – Direzione Generale per le nuove tecnologie abilitanti in collaborazione con l’Osservatorio Quantum Computing & Communication del Politecnico di Milano.

Inserire [Link](#)

Glossario

- # **Qubit** – L'unità base dell'informazione quantistica, analoga al bit classico, ma capace di trovarsi in più stati contemporaneamente grazie alla **sovrapposizione**.
- # **Sovrapposizione** – Proprietà per cui un qubit può trovarsi in una combinazione di più stati (0 e 1) contemporaneamente, fino a quando non viene misurato.
- # **Entanglement** – Fenomeno in cui due o più qubit diventano correlati in modo tale che lo stato di uno dipende dallo stato dell'altro, indipendentemente dalla distanza che li separa.
- # **Decoerenza** – Perdita delle proprietà quantistiche di un sistema a causa di interazioni con l'ambiente, che porta il qubit a comportarsi come un bit classico.
- # **Gate quantistico** – Operazione che manipola lo stato di uno o più qubit, simile alle porte logiche nei computer classici.
- # **Circuito quantistico** – Insieme di qubit e gate quantistici che eseguono un algoritmo quantistico.
- # **Errori quantistici** – Errori dovuti alla decoerenza o a imperfezioni nei dispositivi quantistici, che richiedono **correzione degli errori quantistici (QEC, Quantum Error Correction)**.
- # **Tempo di coerenza** – Il periodo in cui un qubit mantiene il suo stato quantistico prima che la decoerenza lo distrugga.
- # **Misurazione quantistica** – Processo che collassa la sovrapposizione di un qubit in uno stato definito (0 o 1), distruggendo l'informazione quantistica.
- # **Computazione quantistica digitale** – Modello più comune di quantum computing, basato su qubit e operazioni logiche tramite gate quantistici.
- # **Quantum Annealing** – Metodo alternativo per il calcolo quantistico, usato per problemi di ottimizzazione.
- # **Teleportazione quantistica** – Tecnica per trasferire l'informazione quantistica di un qubit a un altro, sfruttando l'entanglement.
- # **Vantaggio quantistico** – Momento in cui un computer quantistico esegue un calcolo che sarebbe impossibile (o impraticabile) per un computer classico.
- # **NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum)** – Generazione attuale di computer quantistici, con un numero limitato di qubit e suscettibili agli errori.
- # **FTQC (Fault Tolerant Quantum Computing)** – Utilizza tecniche di correzione degli errori quantistici (QEC) per mitigare gli effetti di decoerenza e rumore, permettendo operazioni affidabili su larga scala.

1. EXECUTIVE SUMMARY

Le Tecnologie Quantistiche (TQ) rappresentano un settore strategico per l'innovazione scientifica e industriale mondiale, con impatti diretti su sicurezza nazionale, competitività economica e sovranità tecnologica. È questo il motivo per cui la competizione globale nel settore è notevolmente aumentata, attirando un'attenzione sempre maggiore e stimolando un incremento degli investimenti sia pubblici che privati.

A livello europeo, dal lancio della European Quantum Technology Flagship nel 2018 sono stati compiuti progressi significativi nel settore, con la promozione di iniziative come l'infrastruttura europea per le comunicazioni quantistiche (EuroQCI) e il programma EuroHPC-JU, fino ad arrivare alla recente pubblicazione della Comunicazione "Competitiveness Compass for the EU"¹, che, nel delineare l'agenda della Commissione per il rafforzamento della competitività in un'ottica di *technology foresight*, individua le tecnologie quantistiche come una delle aree di attività previste nei prossimi mesi. In particolare, la menzionata comunicazione, annuncia la prossima pubblicazione di una strategia europea sulle TQ entro la prima metà del 2025 e una successiva proposta di Quantum Act, nella quale verranno allineati i programmi UE e nazionali e supportati gli investimenti in infrastrutture paneuropee di calcolo quantistico, comunicazione e rilevamento.

Considerata l'importanza crescente delle TQ e la loro rilevanza, il Governo si è impegnato ad elaborare, al pari di altri Stati ed in linea con gli ambiziosi obiettivi europei, la presente strategia nazionale, che possa mettere a sistema le risorse esistenti e disponibili per valorizzare i risultati emersi e continuare a investire sui punti di forza identificati, così da capitalizzare le opportunità e rafforzare il ruolo dell'Italia nel contesto europeo ed internazionale. La strategia è stata redatta da un Gruppo di Lavoro composto da esperti della comunità scientifica e da rappresentanti del Ministero dell'Università e della Ricerca, del Dipartimento per la Transizione Digitale, dell'Agenzia Nazionale per la Cybersicurezza, del Ministero per le Imprese e il Made in Italy ("MIMIT"), e del Ministero della Difesa affinché gli interessi dei diversi stakeholder pubblici e privati fossero debitamente rappresentati.

L'analisi dell'ecosistema italiano ha evidenziato un panorama dinamico e in crescita; l'Italia dispone di una forte competenza accademica e industriale, con istituti di ricerca e aziende attive in tutti i pilastri delle TQ: calcolo, simulazione, comunicazione, metrologia e sensoristica. Dal punto di vista industriale, le TQ relative alla comunicazione e alla sensoristica presentano gradi di TRL più elevati, mentre il settore del calcolo e simulazione necessita di accesso alle infrastrutture. I finanziamenti pubblici nelle TQ, pari a 227,4 milioni

¹ Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, "A Competitiveness Compass For The EU", 29.01.2025, COM(2025) 30 final.

di euro (2021-2024), hanno rappresentato un primo passo importante per lo sviluppo dell'ecosistema italiano, ma risultano inferiori rispetto a quelli stanziati dai principali Stati Membri dell'Unione e da concorrenti internazionali. La presenza di start-up nel settore, inoltre, rimane limitata rispetto a paesi come Stati Uniti, Regno Unito, Francia e Germania.

Dato questo stato dell'arte, per rafforzare il posizionamento dell'Italia sono state individuate azioni mirate a potenziare la ricerca e l'innovazione, migliorare l'accesso alle infrastrutture e stimolare investimenti privati. Oltre al finanziamento della ricerca di base, la creazione di reti di collaborazione tra pubblico e privato è ritenuta cruciale per promuovere la ricerca applicata e il trasferimento tecnologico, mentre la valorizzazione di laboratori nazionali in cui aziende e istituzioni di ricerca possano lavorare congiuntamente permetterà di sviluppare nuove soluzioni industriali. Inoltre, la creazione di programmi di formazione avanzati e di dottorati industriali contribuirà alla crescita della forza lavoro specializzata, un aspetto essenziale per l'espansione del settore.

Sul fronte delle applicazioni industriali, l'Italia deve favorire lo sviluppo di start-up e incentivare investimenti nelle TQ, favorendo anche la mobilitazione di capitali privati. La standardizzazione e la certificazione delle TQ rappresentano un altro elemento chiave, poiché garantiscono la sicurezza e l'interoperabilità delle soluzioni sviluppate, rafforzando la competitività delle imprese italiane a livello globale.

L'implementazione di tali misure richiede dunque l'elaborazione di una struttura di governance efficace a supporto all'innovazione nelle TQ. L'ultima parte della strategia si concentra quindi nel delineare alcuni suggerimenti strategici per un modello di governance. L'Italia ha l'opportunità di posizionarsi come un attore di rilievo nel panorama delle TQ, ma ciò richiede una visione strategica chiara e un impegno costante per sostenere la ricerca e l'innovazione. Il percorso delineato in questo documento offre una roadmap per consolidare il ruolo del Paese nelle TQ e garantire un futuro tecnologico sicuro e competitivo. Investire in queste tecnologie significa non solo cogliere un'opportunità di crescita economica e industriale, ma anche rafforzare la sicurezza nazionale e contribuire al progresso scientifico globale.

2. IL CONTESTO ITALIANO

2.1 LE TECNOLOGIE QUANTISTICHE: SETTORI E SINERGIE

Questa prima parte della strategia fornisce una panoramica tecnica delle tecnologie quantistiche, approfondendo le loro caratteristiche e gli ambiti di applicazione per individuare le linee di sviluppo più promettenti nel campo della ricerca.

Le TQ si collocano tra le tecnologie critiche per la competitività dei Paesi, con un potenziale rivoluzionario in numerose applicazioni e significativi impatti sulla sicurezza nazionale.

Nonostante siano ancora tecnologie in fase prototipale, destinate a consolidarsi nel prossimo decennio, gli sforzi congiunti della ricerca pubblica e industriale ne stanno accelerando lo sviluppo.

La prima rivoluzione quantistica, agli inizi del Novecento, ha determinato la nascita della meccanica quantistica, portando allo sviluppo di tecnologie rivoluzionarie, come il transistor e il laser, che hanno plasmato il mondo moderno. La seconda rivoluzione quantistica, iniziata negli anni '80, ha spostato l'attenzione sulla capacità di manipolare direttamente le proprietà di singole particelle quantistiche - come atomi, fotoni ed elettroni – attraverso principi quali la sovrapposizione degli stati e l'entanglement. Questa nuova fase promette di trasformare ulteriormente la tecnologia.

Con le loro applicazioni rivoluzionarie e trasversali, le TQ necessitano di un approccio lungimirante, per massimizzare lo sviluppo economico, garantire l'indipendenza tecnologica e rafforzare la sicurezza nazionale. Questo approccio va focalizzato sui principali ambiti identificati come pilastri nella strategia europea:

- **Il Calcolo Quantistico** mira a sviluppare dispositivi e protocolli capaci di superare o accelerare i computer classici esistenti, offrendo vantaggi come maggiore precisione, risoluzione più rapida dei problemi, consumo energetico ridotto, costi inferiori. Le sue applicazioni spaziano dalla logistica alla distribuzione dell'energia, dalla diagnostica medica alle previsioni idrologiche o dei cambiamenti climatici, con la potenzialità di contribuire anche al miglioramento delle tecniche di apprendimento automatico e intelligenza artificiale. Tuttavia, la sua potenza solleva anche preoccupazioni sulla vulnerabilità dei sistemi crittografici esistenti, rendendo essenziale lo sviluppo di hardware sicuro e protocolli avanzati per la crittografia.
- **La Simulazione Quantistica** ha lo scopo di sviluppare dispositivi capaci di emulare specifici sistemi a livello atomico, offrendo maggiore semplicità rispetto ai computer quantistici universali. Oltre a importanti ricadute sulle conoscenze scientifiche fondamentali, le sue applicazioni sono molteplici e includono lo sviluppo di nuovi materiali, la progettazione di celle solari e batterie di nuova generazione, il design di nuove molecole e biomolecole, con applicazioni negli ambiti della meccanica, della chimica e della farmacologia tanto in contesti civili quanto in quelli militari.
- **La Comunicazione Quantistica** offre livelli di sicurezza senza precedenti, essenziali per proteggere le trasmissioni civili e militari. Per garantire una crittografia sicura, resistente anche agli attacchi quantistici, è necessario sviluppare hardware quantistico, basarsi su protocolli alternativi di distribuzione delle informazioni (QKD, algoritmi crittografici post-quantistici) e implementare nuove reti di trasmissione, garantendo così sia comunicazioni sicure che lo sviluppo di una rete quantistica, in grado di indirizzare le informazioni tra più dispositivi e consentendo –a sua volta– applicazioni come la sensoristica ed il calcolo distribuito.
- **La Sensoristica Quantistica** sfrutta le proprietà della materia e della radiazione quantistica per raggiungere sensibilità e precisione senza precedenti. I sensori

quantistici trovano applicazioni in tutti i domini operativi, sia in ambito civile che militare, come: orologi atomici quantistici per un posizionamento estremamente preciso; i gravimetri capaci di monitorare i movimenti tettonici o identificare strutture sotterranee; magnetometri per identificare oggetti nascosti o depositi minerari; dispositivi in grado di fornire immagini tramite mappatura dei campi magnetici, che hanno il potenziale per rivoluzionare la diagnostica medica.

Le tecnologie quantistiche rappresentano, dunque, una leva strategica fondamentale per il progresso scientifico, economico e di sicurezza dell'Italia.

Le attuali sfide globali – sociali, politiche ed economiche - evidenziano l'importanza delle tecnologie emergenti e dirompenti, come quelle quantistiche, capaci di integrare e in alcuni casi superare i metodi classici nell'affrontare prove complesse e interconnesse in tutti i domini operativi – terra, mare, aria, cyber e spazio. In questo scenario, è dunque imprescindibile adottare un **approccio prospettico e previsionale**, in grado di: i) valutarne l'impatto, identificando con lungimiranza opportunità e rischi, e ii) attuare una strategia adeguata a promuoverne e gestirne lo sviluppo, mantenendo un vantaggio strategico. Solo in tal modo le tecnologie quantistiche potranno diventare una **risorsa fondamentale per il Sistema Paese**, contribuendo al progresso scientifico, all'innovazione tecnologica e imprenditoriale e alla sicurezza nazionale.

Per questo motivo, è fondamentale orientare lo sviluppo delle tecnologie quantistiche in modo responsabile, bilanciando attentamente i rischi e le opportunità che esse comportano. È necessario adottare politiche che favoriscano l'innovazione, ma al contempo garantiscano la sicurezza e la resilienza delle infrastrutture critiche, proteggendo la privacy e l'integrità dei dati in un mondo sempre più connesso e digitalizzato.

Attraverso una pianificazione integrata fondata sull'analisi previsionale e aggiornata periodicamente, questa **strategia** mira a **massimizzare i benefici delle TQ ed a minimizzarne i rischi**. Il suo scopo è contribuire a **un futuro sostenibile, sicuro e tecnologicamente competitivo per l'intero Sistema paese**.

2.1.1 Scienza quantistica di base

Importanza della scienza di base

La scienza quantistica di base – tutt'ora in evoluzione - costituisce il fondamento su cui si sviluppano le tecnologie quantistiche. Le scoperte di oggi assicurano le tecnologie di domani. Investire nella ricerca fondamentale è cruciale per avanzare le TQ e risolvere quei problemi che ancora impediscono un pieno sviluppo delle stesse come scalabilità e decoerenza. In particolare, la scienza di base supporta il miglioramento delle prestazioni delle piattaforme fisiche, tra cui quelle basate su sistemi fotonici, qubit di spin, qubit superconduttori,

molecole, atomi e ioni. Inoltre, offre opportunità di sviluppo ed ottimizzazione di piattaforme innovative quali sistemi meccanici e opto-meccanici; eccitazioni elettroniche topologiche e qubit molecolari. Non solo: la scienza di base è la principale leva per incentivare studenti talentuosi allo studio delle TQ e forma "ingegneri quantistici" pronti per l'industria emergente.

Scienza di base per l'ampliamento dei confini della meccanica quantistica per le tecnologie quantistiche

I principali temi di ricerca di base con ricadute industriali ad oggi sono la decoerenza quantistica, termodinamica quantistica, materia condensata, gravità quantistica e i fondamenti della meccanica quantistica. Per esempio, migliorare la gestione della decoerenza, ottimizzare l'efficienza energetica, utilizzare i computer quantistici per studiare sistemi complessi, esplorare i limiti della meccanica quantistica e approfondire i suoi principi fondamentali sono passaggi cruciali per sviluppare e potenziare le tecnologie quantistiche.

Scienza di base per la teoria dell'informazione quantistica

Un altro versante è la teoria dell'informazione quantistica. Questa trae grande beneficio dalla ricerca di base, essenziale per comprendere le proprietà degli algoritmi quantistici e sviluppare software capaci di risolvere problemi reali sui computer quantistici. Le principali aree di studio includono l'analisi della complessità degli algoritmi quantistici per individuare vantaggi autentici, la teoria della complessità quantistica per dimostrare e stabilire tali vantaggi, e le teorie dell'informazione quantistica che esaminano le proprietà dell'informazione negli stati quantistici. Queste ricerche sono fondamentali per migliorare le prestazioni dei protocolli di comunicazione quantistica e sfruttare appieno le potenzialità dei computer quantistici rispetto ai sistemi classici.

2.1.2 Calcolo quantistico

Il calcolo quantistico sfrutta i principi della meccanica quantistica per eseguire operazioni di calcolo in modo più efficiente rispetto ai computer classici.

Il Quantum Computing è un sistema computazionale basato sulla manipolazione attiva degli stati quantistici della materia per l'elaborazione di informazioni. Il Quantum Computing si fonda sull'utilizzo del bit quantistico, o qubit. A differenza del bit tradizionale che può assumere solo valore 0 e 1 – come una moneta può essere solo testa o croce - il qubit può assumere valore 0, 1 o una combinazione lineare di 0 e 1, passando da una misura deterministica a una probabilistica – come la moneta che, grazie al principio di sovrapposizione degli stati, mentre ruota ha una certa probabilità di assumere testa e una di assumere croce. Grazie a questo principio, il sistema quantistico può elaborare più input nello stesso momento, riducendo il numero di operazioni necessarie per ottenere un certo risultato. Questo produce un'accelerazione: idealmente, se il computer classico può realizzare n operazioni con n bit, un computer quantistico con n qubit può realizzarne 2^n e

quindi può essere 2^n volte più veloce. Ciò porta ad un aumento della capacità computazionale che su alcune operazioni complesse può essere esponenziale, aprendo la strada per la risoluzione di problemi complessi finora irrisolvibili.

L'obiettivo primario è creare dispositivi di calcolo quantistico che superino o accelerino i computer classici esistenti nella risoluzione di specifici problemi industriali, scientifici e tecnologici. Questo “vantaggio quantistico” può manifestarsi in varie forme: maggiore rapidità; maggiore precisione; migliore efficienza energetica; riduzione dei costi operativi; o una combinazione di tali benefici. Sebbene l'impatto complessivo del calcolo quantistico sia ancora in fase di valutazione, è altamente probabile che questa tecnologia superi i computer classici in alcune aree di interesse, pur mantenendo una relazione di complementarità e competizione con essi.

Applicazioni del calcolo quantistico

Le applicazioni del calcolo quantistico includono la crittografia, la simulazione, l'ottimizzazione e l'intelligenza artificiale. I computer quantistici potrebbero rendere meno sicuri i metodi di protezione attuali, spingendo a sviluppare nuovi protocolli di sicurezza. Nella simulazione, questi computer possono modellare materiali e molecole complessi, accelerando la scoperta di farmaci e nuovi materiali. Per l'ottimizzazione, gli algoritmi quantistici possono risolvere problemi complessi in settori come la logistica e la finanza in modo più efficiente. Infine, nell'intelligenza artificiale, il calcolo quantistico può velocizzare l'addestramento dei modelli, migliorando applicazioni avanzate come veicoli autonomi e diagnostica medica. Questi progressi promettono di trasformare vari ambiti, rendendo le tecnologie più rapide e potenti.

L'apprendimento automatico (*Machine Learning, ML*), una branca dell'intelligenza artificiale, può beneficiare notevolmente dal calcolo quantistico. Integrando algoritmi quantistici con metodi tradizionali di machine learning, si possono migliorare tecniche come le macchine a vettori di supporto per la classificazione dei dati, l'apprendimento per rinforzo quantistico e le macchine di Boltzmann quantistiche. Queste applicazioni avanzate trovano impiego in settori come la diagnosi medica basata su immagini, la previsione dei cambiamenti climatici e le previsioni idrologiche, offrendo risultati più accurati ed efficienti.

Dispositivi Noisy Intermediate Scale Quantum (NISQ)
L'attuale generazione di dispositivi quantistici opera nel regime Noisy Intermediate Scale Quantum (NISQ), caratterizzato dalla presenza di qubit rumorosi e dall'assenza di meccanismi completi per la correzione degli errori quantistici (Quantum Error Correction, QEC). Una delle principali sfide nei prossimi anni sarà quella di stabilire se ed in che modo sia possibile ottenere vantaggi quantistici utilizzando tali dispositivi. A lungo termine, l'obiettivo è sviluppare computer quantistici a tolleranza di errore (Fault Tolerant Quantum

Computation, FTQC) capaci di eseguire calcoli complessi con errori minimi. Ciò include la possibilità di interconnettere i computer quantistici, consentendo lo scambio di informazioni quantistiche e l'eventuale sviluppo di un internet quantistico. Il regime NISQ rappresenta un motore fondamentale per l'avanzamento tecnologico dei dispositivi quantistici, dei loro sistemi di controllo e del software quantistico, gettando le fondamenta per la precisione e la scalabilità necessarie per la FTQC.

Fault Tolerant Quantum Computing (FTQC)

I Qubit sono estremamente sensibili ai fattori ambientali, richiedendo il funzionamento in ambienti altamente controllati. Il raggiungimento della FTQC dipende da una drastica riduzione dei tassi di errore, resa possibile attraverso la QEC, in cui più qubit fisici imperfetti vengono raggruppati in qubit logici in cui eventuali errori possono essere rilevati e corretti. Tuttavia, ciò introduce un significativo *overhead* hardware, poiché per creare un singolo qubit logico è necessario un gran numero di qubit fisici. Per affrontare questa sfida verso una computazione quantistica robusta e scalabile, è essenziale: i) progettare nuovi tipi di qubit con caratteristiche migliorate; ii) sviluppare architetture di chip ottimizzate per la correzione degli errori; e iii) implementare codici QEC avanzati per ridurre al minimo le risorse hardware richieste.

Sfide scientifiche, tecnologiche e industriali

Lo sviluppo di computer quantistici coinvolge più livelli di tecnologia, noti collettivamente come stack di calcolo quantistico. La costruzione su larga scala di sistemi FTQC richiede l'integrazione di milioni di qubit ad alta fedeltà. Il funzionamento ottimale dei computer quantistici dipende dunque da un'efficace caratterizzazione, sintonizzazione e controllo dei qubit. Ciò comporta la misurazione delle proprietà dei qubit, il contrasto delle derive nelle prestazioni e la regolazione fine dei segnali di controllo per ottenere la massima fedeltà. Con la scalabilità dei sistemi quantistici, il consumo energetico, l'ingombro fisico e la robustezza devono migliorare, rendendo necessaria l'integrazione dell'elettronica di controllo vicino ai qubit talvolta in ambienti criogenici. Il superamento delle sfide necessarie per passare dalla scala NISQ alla scala FTQC richiede una collaborazione attiva tra l'industria europea e gli istituti di ricerca, favorendo cicli di feedback rapidi e la co-progettazione dell'intero stack di elaborazione. Questo stack integra le unità di elaborazione quantistica (QPU) con l'infrastruttura per l'alloggiamento, la schermatura, l'instradamento del segnale, l'elettronica di controllo, il firmware ed il software.

Stack hardware quantistico

La costruzione di computer quantistici si basa su diverse tecnologie per i qubit, ciascuna con i propri vantaggi e sfide. I qubit superconduttori sono tra i più avanzati, offrendo flessibilità ma richiedendo condizioni particolari per mantenere la loro efficienza. Quelli a base di semiconduttori, come quelli in silicio, promettono una grande scalabilità grazie alla tecnologia già consolidata. Gli ioni intrappolati e gli atomi neutri garantiscono alta precisione e lunghi tempi di funzionamento, ma sono difficili da scalare. I fotoni sono ideali per comunicazioni a lungo raggio, mentre i qubit a centro colore offrono potenziale per operazioni ad alta temperatura. I sistemi ibridi, che combinano diverse tecnologie, offrono maggiore flessibilità ma sono più complessi da gestire. Indipendentemente dalla tecnologia scelta, è essenziale sviluppare materiali di alta qualità, metodi di fabbricazione efficienti, ambienti di raffreddamento avanzati e soluzioni di integrazione hardware-software. Inoltre, è importante migliorare il controllo dei qubit, ridurre il consumo energetico e integrare i computer quantistici con i supercomputer tradizionali per sfruttare al meglio le loro potenzialità. Questi progressi richiedono una stretta collaborazione tra industria e ricerca per superare le sfide e realizzare computer quantistici su larga scala.

Stack software quantistico

La costruzione di computer quantistici si basa su diverse tecnologie per i qubit, ciascuna con i propri vantaggi e sfide. I qubit superconduttori sono tra i più avanzati, offrendo flessibilità ma richiedendo condizioni particolari per mantenere la loro efficienza. Quelli a base di semiconduttori, come quelli in silicio, promettono una grande scalabilità grazie alla tecnologia già consolidata. Gli ioni intrappolati e gli atomi neutri garantiscono alta precisione e lunghi tempi di funzionamento, ma sono difficili da scalare. I fotoni sono ideali per comunicazioni a lungo raggio, mentre i qubit a centro colore offrono potenziale per operazioni ad alta temperatura. I sistemi ibridi, che combinano diverse tecnologie, offrono maggiore flessibilità ma sono più complessi da gestire. Indipendentemente dalla tecnologia scelta, è essenziale sviluppare materiali di alta qualità, metodi di fabbricazione efficienti, ambienti di raffreddamento avanzati e soluzioni di integrazione hardware-software. Inoltre, è importante migliorare il controllo dei qubit, ridurre il consumo energetico e integrare i computer quantistici con i supercomputer tradizionali per sfruttare al meglio le loro potenzialità. Questi progressi richiedono una stretta collaborazione tra industria e ricerca per superare le sfide e realizzare computer quantistici su larga scala.

2.1.3 Simulazione quantistica

I simulatori quantistici sono dispositivi specializzati che imitano il comportamento di sistemi quantistici complessi, rendendo più semplice lo studio di tali sistemi rispetto ai computer quantistici universali. Questi simulatori, noti anche come computer quantistici analogici,

sono progettati per risolvere problemi specifici seguendo le leggi dei sistemi che emulano. Anche se non possono eseguire calcoli generali, si prevede che riusciranno a risolvere certe tipologie di problemi prima dei computer quantistici digitali, grazie a requisiti meno rigorosi per la qualità dei qubit. Esistono diversi tipi di simulatori quantistici: quelli digitali utilizzano sequenze di porte quantistiche per approssimare la dinamica quantistica, quelli analogici replicano il comportamento di sistemi reali in condizioni controllate e i dispositivi euristici offrono soluzioni approssimate per problemi di ottimizzazione, combinando componenti classici e quantistici. Questi strumenti sono particolarmente utili per applicazioni specifiche, come la simulazione di reti complesse nel settore industriale.

Applicazioni della simulazione quantistica

Le applicazioni della simulazione quantistica sono numerose e riguardano sia ambiti civili che militari, suddividendosi principalmente in due aree: la simulazione di sistemi quantistici complessi e l'ottimizzazione. Nella simulazione, i computer quantistici possono modellare molecole e materiali difficili da analizzare con i computer tradizionali, favorendo innovazioni nei settori automobilistico, chimico, petrolifero, fotovoltaico e farmaceutico, oltre a supportare la ricerca fondamentale in fisica e biologia. Per quanto riguarda l'ottimizzazione, la simulazione quantistica può risolvere problemi complessi come la gestione del traffico veicolare, il commercio energetico e l'ottimizzazione delle catene di approvvigionamento, beneficiando anche settori come la finanza, le assicurazioni, i trasporti, la logistica, la produzione e la sanità.

Sfide scientifiche, tecnologiche e industriali

Lo sviluppo della simulazione quantistica si trova ad affrontare diverse sfide scientifiche, tecnologiche e industriali su diversi livelli del sistema. Una simulazione quantistica efficace richiede un controllo preciso dei qubit e la loro programmabilità. I simulatori quantistici digitali hanno requisiti di controllo dei qubit simili a quelli dei computer quantistici, ma con una certa flessibilità a seconda del problema. I simulatori quantistici analogici, invece, richiedono un'elevata precisione nel controllo per preparare e pilotare accuratamente le dinamiche quantistiche, anche se non necessariamente a livello di singolo qubit.

Aumentare la scala delle piattaforme di simulazione quantistica è fondamentale per ampliare il loro campo di applicazione, in particolare nella progettazione dei materiali, nella chimica quantistica e nei problemi di ottimizzazione. Lo sviluppo, inoltre, della programmabilità per approcci non basati sui qubit è essenziale per rendere queste piattaforme più versatili e per supportare applicazioni rilevanti per l'industria.

Stabilire benchmark e protocolli di verifica per le operazioni quantistiche analogiche è cruciale per far scalare i simulatori quantistici oltre i 1000 qubit, migliorando la loro capacità di affrontare e risolvere problemi quantistici complessi.

2.1.4 Comunicazione quantistica

La comunicazione quantistica sfrutta stati e risorse quantistiche per lo sviluppo di nuovi protocolli di comunicazione con caratteristiche radicalmente nuove che spaziano dalla sicurezza fisica alla capacità di rete senza precedenti. La sicurezza nelle comunicazioni quantistiche, siano esse civili o militari, è intrinsecamente garantita, poiché si basa sull'impossibilità fisica di clonare le informazioni quantistiche: qualsiasi tentativo di intercettare, leggere e inoltrare una comunicazione basata su qubit è rintracciabile confrontando gli stati dei qubit ricevuti con gli stati dei qubit inviati. La comunicazione quantistica è quindi potenzialmente immune da interferenze esterne, a condizione che mittente e ricevente possano identificarsi reciprocamente in modo affidabile. Ciò apre la strada allo scambio e all'elaborazione dei dati in modo fondamentalmente sicuro.

Parallelamente, i protocolli quantistici consentono di implementare nuovi metodi di trasmissione capaci di incrementare il volume di dati trasmessi per unità di tempo ben oltre gli attuali limiti tecnologici. In prospettiva, le reti di comunicazione quantistica evolveranno verso l'internet quantistico, un'infrastruttura in grado di connettere computer e sensori quantistici per risolvere complessi problemi di ottimizzazione, distribuire l'entanglement quantistico tra nodi remoti, sincronizzare dispositivi con una precisione temporale senza precedenti, ed abilitare nuove funzionalità oggi impensabili.

Applicazioni della comunicazione Quantistica

La sicurezza delle comunicazioni è cruciale per consumatori, imprese e governi. I protocolli crittografici attuali, basati su computer classici, potrebbero essere violati dai computer quantistici, spingendo allo sviluppo della crittografia post-quantistica, che resiste agli attacchi quantistici. Inoltre, la crittografia quantistica, già disponibile sul mercato, offre una protezione superiore contro intercettazioni e sabotaggi, rendendo le comunicazioni più sicure. Queste tecnologie aumentano la resilienza delle infrastrutture fisiche e digitali, proteggendo dati sensibili e rispettando la privacy degli utenti. L'integrazione della comunicazione quantistica nelle strategie di sicurezza migliora la capacità di contrastare minacce emergenti grazie alla collaborazione tra istituti di ricerca, aziende tecnologiche e governi. Infine, investire nella comunicazione quantistica e nelle tecnologie emergenti rafforza l'indipendenza tecnologica europea, migliorando le catene di approvvigionamento e promuovendo l'innovazione, posizionando l'Europa come leader globale nella sicurezza avanzata e nelle comunicazioni.

Sfide scientifiche, tecnologiche, industriali

Lo sviluppo delle reti quantistiche affronta sfide scientifiche, tecnologiche e industriali, richiedendo componenti avanzati come rilevatori di fotoni singoli ed emettitori di luce quantistica, oltre a software efficienti e protocolli di crittografia quantistica. È essenziale migliorare la stabilità e la sicurezza dei sistemi quantistici, affrontando problemi come la decoerenza e la perdita di informazioni. La collaborazione tra fisici, ingegneri e informatici, supportata da finanziamenti governativi, è fondamentale per trasformare le teorie in

applicazioni pratiche. Le attività di comunicazione quantistica si suddividono in tre aree principali: reti di comunicazione sicure tramite Distribuzione di Chiavi Quantistiche (QKD), comunicazione quantistica a lunga distanza con ripetitori quantistici e reti satellitari, e condivisione dell'entanglement per applicazioni in settori come sanità, Difesa, agricoltura, energia, finanza e logistica. Questi progressi mirano a rivoluzionare la comunicazione e l'elaborazione dei dati, creando reti quantistiche sicure e robuste con ampie applicazioni pratiche.

2.1.5 Metrologia e sensoristica quantistica

Le tecnologie quantistiche in metrologia, sensoristica e imaging sfruttano le proprietà quantistiche avanzate per consentire precisione e sensibilità senza precedenti nelle misure. Queste tecnologie usano fenomeni quantistici come la sovrapposizione, l'entanglement e la quantizzazione per fornire misure precise, sensibili e robuste in un ampio spettro di applicazioni, come, per esempio, la diagnostica medica, la navigazione di alta precisione, ed il monitoraggio ambientale. I sensori quantistici non solo sono più sensibili di quelli classici, ma forniscono anche nuove capacità e migliorano le condizioni operative, non richiedendo una taratura regolare grazie alla loro dipendenza dalle costanti fisiche.

La metrologia quantistica, inoltre, fornisce le basi per la definizione e la disseminazione delle unità di misura del Sistema Internazionale (SI) e si basa su dispositivi quantistici altamente riproducibili e basati su costanti fisiche fondamentali, come orologi atomici, standard elettrici quantistici, ed altri strumenti che sfruttano fenomeni quantistici per ottenere una precisione di misura senza precedenti.

Applicazioni della metrologia e del sensing quantistico

I sensori quantistici trovano applicazione in vari ambiti civili e militari grazie alla loro elevata sensibilità e precisione. In campo biologico, permettono di rilevare attività metaboliche a livello cellulare e sviluppare tecniche di imaging avanzate per studiare batteri e virus. Nella sensoristica a radiofrequenza e nei controlli non distruttivi, offrono una risoluzione spaziale superiore e un'analisi precisa dei campi elettromagnetici. I gravimetri quantistici e gli orologi atomici sono utilizzati per monitorare minime variazioni gravitazionali, utili in idrologia, vulcanologia ed esplorazione delle risorse. Nel posizionamento, navigazione e timing, gli orologi atomici migliorano la precisione dei sistemi di navigazione e rendono i sistemi più resistenti ad attacchi come spoofing e jamming. Infine, con la crescita del mercato quantistico, è sempre più necessario sviluppare standard e servizi di test accurati per la caratterizzazione e la convalida dei dispositivi quantistici, garantendo affidabilità e sicurezza nelle loro applicazioni.

Sfide scientifiche, tecnologiche e industriali

Le tecnologie di sensoristica quantistica utilizzano diverse piattaforme fisiche, ognuna con i propri vantaggi e sfide. Ad esempio, atomi e ioni ultrafreddi offrono grande sensibilità per

applicazioni come gravimetria e orologi atomici, ma richiedono complessi sistemi di raffreddamento. Oscillatori nano-meccanici e sistemi opto-meccanici possono misurare forza e massa con alta precisione, ma sono sensibili al rumore termico. I circuiti superconduttori permettono di creare magnetometri avanzati e radar quantistici, ma necessitano di temperature molto basse. I centri NV nel diamante funzionano a temperatura ambiente e sono ideali per imaging biologico, ma la produzione dei materiali è complessa. Altri sensori, come i quantum-dot e gli stati non classici della luce, offrono applicazioni innovative in rilevamento e imaging, ma devono migliorare la loro efficienza e affidabilità. Inoltre, è fondamentale integrare e miniaturizzare questi sensori per applicazioni pratiche, supportati da tecnologie abilitanti come fotonica avanzata, laser sofisticati e sistemi criogenici efficienti. Questi progressi permetteranno di utilizzare i sensori quantistici in vari settori, migliorando la precisione e l'affidabilità delle misurazioni in ambiti civili e militari.

Sviluppi comuni a tutte le piattaforme

Per sfruttare appieno il potenziale del sensing quantistico, è necessario affrontare diverse sfide fondamentali. Innanzitutto, è essenziale controllare e proteggere i sistemi quantistici, garantendo che possano operare in ambienti rumorosi, preparandoli e manipolandoli con precisione. Questo richiede collaborazioni interdisciplinari con campi come l'elaborazione dei segnali per migliorare sensibilità e risoluzione. Inoltre, la miniaturizzazione e il packaging dei sensori quantistici devono progredire grazie a tecnologie avanzate come la criogenia e la fotonica, permettendo la diffusione di questi sensori in applicazioni pratiche. Parallelamente, l'infrastruttura metrologica deve evolversi per supportare la progettazione, la fabbricazione e la misurazione dei dispositivi quantistici, richiedendo una rete globale di laboratori specializzati per testare e standardizzare questi sensori. È inoltre necessario sviluppare supporto metrologico specifico per le tecnologie quantistiche, come la crittografia quantistica, e creare standard di riferimento per garantire l'affidabilità e la precisione delle misure. Questi sforzi combinati sono cruciali per rendere i sensori quantistici affidabili, integrabili e standardizzati, facilitando la loro adozione in vari settori civili e militari.

Scenario di metrologia e rilevamento quantistico

La metrologia e il sensing quantistico in Europa sono fondamentali nell'iniziativa Quantum Flagship on Quantum Technologies, che promuove il trasferimento tecnologico nel settore delle tecnologie quantistiche. Dal 2024, inoltre, l'infrastruttura europea di misura e test per dispositivi quantistici (EuroQMTI) supporta l'industria e gli stakeholder europei. In ambito europeo, l'Italia è attivamente coinvolta in Qu-Test e Qu-Pilot, concentrandosi sulla fabbricazione di sensori microstrutturati. Parallelamente, il mercato dei sensori quantistici richiede urgentemente standardizzazione e certificazione, guidate dall'High Level Forum europeo mediante la definizione di un workstream specifico (WS16), per garantire la comparabilità e la fiducia nei dispositivi. Allo stesso tempo, il Network di Metrologia Europea per le Tecnologie Quantistiche (EMN-Q) coordina gli Istituti Nazionali di Metrologia per rafforzare la competitività europea.

In Italia, la ricerca sui sensori quantistici è vivace, utilizzando diverse piattaforme come atomi, semiconduttori e superconduttori, e partecipando attivamente agli organismi internazionali di standardizzazione.

2.1.6 Sinergie tra tecnologie quantistiche

Le sinergie tra i pilastri sono fondamentali per sfruttare appieno le potenzialità delle tecnologie quantistiche. Da un lato, alcuni dispositivi hardware, come la fibra ottica e le sorgenti a singolo fotone, sono comuni tra le diverse filiere e quindi diventa fondamentale ottimizzare la loro fabbricazione e favorire lo scambio tra le filiere. Dall'altro, esiste la possibilità di integrare queste tecnologie in un ecosistema interconnesso, dove i benefici di ciascuna area si amplificano a vicenda, aprendo a nuove applicazioni e migliorando l'efficienza complessiva.

Di seguito vengono proposti alcuni scenari di integrazione:

- **Calcolo/Simulazione e Comunicazione:** le tecnologie di comunicazione quantistica potrebbero supportare la protezione dei dati elaborati da computer quantistici, garantendo scambi di informazioni sicuri in ambienti vulnerabili. Questo consentirebbe anche di collegare computer quantistici distribuiti in modo efficiente, trasferendo direttamente l'informazione quantistica, senza dover ripassare dall'informazione classica;
- **Calcolo/Simulazione e Sensoristica:** i progressi nella computazione quantistica potrebbero migliorare le capacità di elaborazione dei dati provenienti dai sensori quantistici, traendo vantaggio dalla natura già quantistica del dato sorgente ad elevata precisione;
- **Comunicazione e Sensoristica:** le reti di comunicazione quantistica potrebbero consentire la trasmissione sicura di dati sensibili derivanti da sensori quantistici, come quelli utilizzati in applicazioni mediche o geofisiche.

In sintesi, la convergenza tra quantum computing, communication e sensing consentirebbe lo sviluppo di sistemi altamente sicuri, precisi e performanti, in cui ciascuna tecnologia potrebbe potenziare le altre, creando nuove opportunità in settori come la sicurezza informatica, l'esplorazione scientifica, e le applicazioni industriali avanzate. Integrando tutti questi scenari, si potrebbe arrivare ad una prospettiva di reti quantistiche che collegano sensori quantistici e computer quantistici, segnando la direzione verso il futuro Quantum Internet.

2.1.7 Tecnologie abilitanti e catena del valore

La catena del valore delle Tecnologie Quantistiche

La catena del valore delle tecnologie quantistiche segue in parte il modello delle tecnologie classiche, richiedendo un avanzamento sinergico di hardware e software per creare servizi ad alto valore aggiunto. Questa spinta lungo l'intero stack tecnologico, unita all'azione di attori come fondi di investimento, società di consulenza ed enti facilitatori e di formazione, può generare non solo un valore economico diretto, ma anche effetti indotti che stimolano la crescita di nuovi mercati. Inoltre, l'espansione di questo settore favorirà lo sviluppo di un ecosistema occupazionale, creando nuove opportunità di lavoro altamente specializzate e stimolando la formazione di competenze avanzate, contribuendo così alla creazione di un vero e proprio mercato del lavoro nel campo delle tecnologie quantistiche.

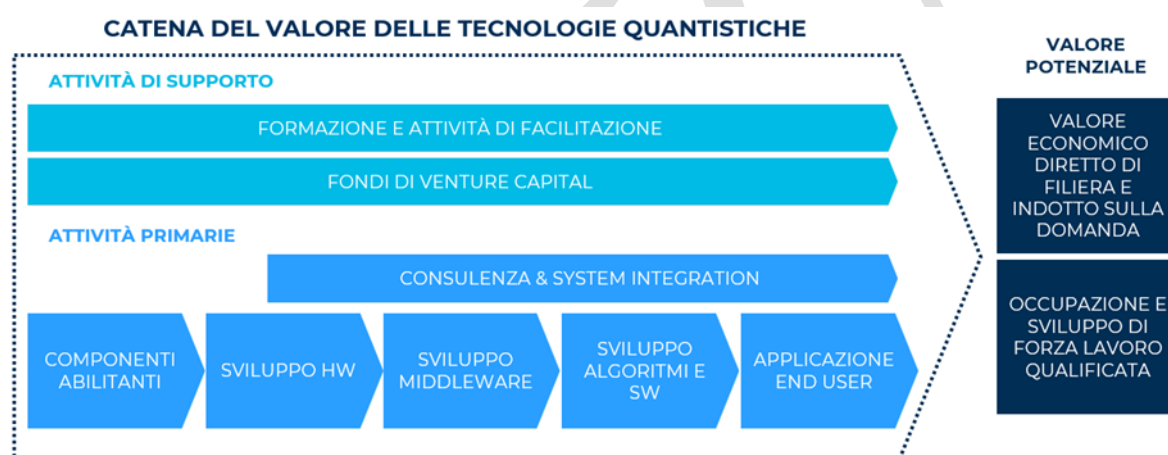


Figura 1 – Catena del valore delle tecnologie quantistiche, Osservatorio Quantum Computing e Communication, Politecnico di Milano

La catena del valore è composta anzitutto da una serie di attività primarie che concorrono allo sviluppo dello stack tecnologico delle tecnologie quantistiche, dalla creazione dei componenti di base fino alle applicazioni finali, ciascuno dei quali può essere associato a uno o più attori di filiera (figura 1). Di seguito si riporta una panoramica:

- **Produttori di tecnologie abilitanti:** il primo elemento necessario allo sviluppo delle tecnologie quantistiche è costituito dallo sviluppo di componenti abilitanti, necessarie alla realizzazione di infrastrutture più complesse. Esempi di componenti abilitanti sono un criostato, in grado di abbassare la temperatura a qualche mK, ben al di sotto della temperatura dello spazio assoluto, utile per il funzionamento del computer quantistico a superconduttore, oppure sorgenti e rilevatori di singolo fotone, utili ad esempio nel campo delle comunicazioni quantistiche e del quantum computing fotonico.

- **Produttori dell'hardware:** la realizzazione dell'infrastruttura quantistica è una delle sfide più complesse. Essa richiede tecnologie avanzate per manipolare l'informazione quantistica a livello di singola particella, come atomi o fotoni. A tale scopo, è necessario sviluppare sistemi di controllo, manipolazione e lettura dell'informazione quantistica, insieme a sistemi di correzione degli errori per gestire la decoerenza, ovvero la perdita di informazione quantistica, uno dei principali ostacoli alla scalabilità dei computer quantistici. La capacità di mantenere l'integrità dell'informazione quantistica a grandi scale è fondamentale per superare il limite della decoerenza e migliorare le performance dei dispositivi.
- **Società di sviluppo del middleware:** per poter utilizzare l'infrastruttura, è necessario sviluppare il middleware che faciliti l'interazione tra l'infrastruttura quantistica e le applicazioni pratiche. Questo include la creazione di piattaforme di sviluppo del codice quantistico (software development kit – SDK), che permettano di programmare su dispositivi quantistici, così come interfacce per la gestione del dispositivo e sistemi di integrazione tra elementi classici e quantistici.
- **Società di sviluppo degli algoritmi e del software:** Per trarre vantaggio dalle tecnologie quantistiche, è essenziale sviluppare algoritmi e software specifici che sfruttino le proprietà uniche della meccanica quantistica, come la sovrapposizione e l'entanglement. In particolare, nel campo della computazione quantistica, la riformulazione di problemi computazionali in chiave quantistica e la riscrittura del codice sono attività necessarie ad abilitare l'utilizzo pratico di questi nuovi computer.
- **Aziende utilizzatrici e applicazione end-user:** l'applicazione end-users costituisce l'elemento finale dello stack tecnologico. Le applicazioni possono essere di tipo general purpose, quindi applicabili trasversalmente a qualsiasi settore merceologico, oppure verticali per settore, come nel campo chimico-farmaceutico, finanziario o energetico. Nel campo del quantum computing alcune tipologie di problemi applicativi sono l'ottimizzazione, come nel caso della logistica; la simulazione, utile per simulare molecole e materiali; il machine learning, utile per problemi di pattern recognition e l'identificazione di anomalie.

Introduzione all'ingegneria e alle tecnologie abilitanti

Per garantire che le tecnologie TQ hardware – i dispositivi quantistici - possano trovare applicazione nel mondo reale, il sistema quantistico deve essere integrato con tecnologie esistenti o modificati di altri sistemi hardware, come ad esempio dispositivi per basse temperature, alto vuoto o microchip e che poi consentano di interfacciare le TQ con il mondo classico per renderle fruibili.

Lo sviluppo di queste tecnologie abilitanti richiede un approccio trasversale che coinvolge tutti i pilastri delle tecnologie quantistiche e richiede lo sviluppo ed il controllo dell'intera catena di fornitura.

Le principali aree di interesse per lo sviluppo delle tecnologie quantistiche includono la produzione, il test e il packaging su larga scala, che richiedono infrastrutture industriali

avanzate per la micro e nano-fabbricazione, l'integrazione di dispositivi quantistici e classici, e l'ottimizzazione di processi come la gestione termica e la schermatura. È essenziale anche disporre di una vasta gamma di dispositivi e componenti, come circuiti fotonici ed elettronici, apparecchiature di controllo a basso rumore e refrigeratori criogenici, garantendo al contempo accesso sostenibile alle licenze per le PMI. Inoltre, le interfacce di controllo e lettura devono essere ottimizzate per operazioni quantistiche ad alta fedeltà, permettendo di identificare e rispettare i limiti di prestazione dei dispositivi. Questi elementi sono fondamentali per sostenere e proteggere la crescita dell'industria quantistica nazionale.

Circuiti elettronici e integrazione

Lo sviluppo delle tecnologie dei chip classici è cruciale per avanzare le tecnologie quantistiche. A proposito, risultano necessarie diverse azioni, tra cui l'approccio "More than Moore" che integra funzionalità e materiali avanzati, come il diamante, nei processi di produzione dei chip. È essenziale inoltre sviluppare soluzioni di packaging specifiche capaci di gestire alta densità di componenti, dispositivi criogenici e interfacce ad alto vuoto, utilizzando tecniche avanzate 2D e 3D. Infine, è fondamentale implementare misure affidabili per testare e convalidare le prestazioni dei materiali e dei qubit, mediante tecniche spettroscopiche on-chip e protocolli di misura armonizzati. Queste azioni garantiranno l'integrazione efficace delle tecnologie quantistiche nei sistemi e nelle applicazioni reali.

Criogenia e integrazione criogenica

La maggior parte delle tecnologie quantistiche richiede temperature estremamente basse, supportate da potenti sistemi di raffreddamento, con alcune piattaforme che necessitano di temperature inferiori a 4K e altre ancora meno di 1K. Per mantenere queste tecnologie competitive ed efficienti, è essenziale migliorare continuamente i sistemi di raffreddamento e integrare meglio tutti i componenti. I refrigeratori specifici per i qubit sono fondamentali non solo per il calcolo quantistico, ma anche per dispositivi che utilizzano luce speciale, e con l'aumento del numero di qubit cresce la necessità di raffreddamenti più potenti e su larga scala. Inoltre, è importante posizionare vicino ai chip quantistici l'elettronica di controllo per garantire un controllo più efficiente e facilitare l'espansione dei circuiti quantistici, sviluppando nuovi tipi di chip di controllo che funzionano a basse temperature, migliorando così la velocità e l'efficienza nella lettura dei qubit. Questi progressi sono cruciali per far progredire le tecnologie quantistiche e renderle più accessibili e performanti.

Fotonica e integrazione fotonica

I laser, le sorgenti di fotoni e i rivelatori sono componenti chiave per le tecnologie quantistiche. È importante sviluppare circuiti integrati fotonici e guide d'onda per creare dispositivi avanzati. I laser devono essere precisi e compatti per controllare particelle come atomi e ioni, essenziali per applicazioni come orologi quantistici. Le sorgenti e i rivelatori di fotoni sono fondamentali per la comunicazione sicura e il calcolo quantistico, richiedendo miglioramenti nell'efficienza e nella riduzione del rumore. Inoltre, i circuiti integrati fotonici

devono essere scalabili e a basso costo, con particolare attenzione al loro utilizzo in ambienti a basse temperature. Questi progressi sono vitali per rendere le tecnologie quantistiche più efficaci e accessibili.

Catene di approvvigionamento e componenti critici

Lo sviluppo di catene di approvvigionamento solide e sicure è fondamentale per il successo delle tecnologie quantistiche. Attualmente, la fornitura di componenti è ancora in crescita, principalmente gestita da piccole e medie imprese o spin-off universitari. In questo contesto, il Governo può svolgere un ruolo chiave colmando le lacune e creando condizioni favorevoli per supportare i fornitori europei di hardware e software quantistico. È essenziale garantire una fornitura sicura di componenti critici come refrigeratori, sistemi laser e componenti ottici, monitorando continuamente le catene di approvvigionamento per evitare interruzioni. Inoltre, il Governo può favorire la crescita del mercato e mantenere relazioni commerciali stabili con paesi dell'UE e non UE, ad esempio attraverso regolamentazioni mirate che impediscano acquisizioni straniere ostili di aziende che sviluppano tecnologie critiche nell'UE.

Iniziative europee in corso

Le principali iniziative europee atte a sviluppare le tecnologie abilitanti le TQ includono Qu-Pilot, Qu-Test e le Joint Undertaking. Qu-Pilot, parte della Quantum Flagship, sviluppa linee pilota per integrare la progettazione e la produzione di chip quantistici, favorendo la crescita dell'industria quantistica europea e la produzione industriale sostenibile. Qu-Test, una rete di banchi di prova europei, offre servizi di test e convalida per garantire una catena di approvvigionamento affidabile e promuovere standard tecnologici. Inoltre, le Joint Undertaking finanziano progetti collaborativi su larga scala, come ESCEL MATQu, che si concentra su componenti e materiali per il calcolo quantistico superconduttivo, sostenendo l'innovazione e lo sviluppo nel settore.

Chips Act e Tecnologie Quantistiche

Il Chips Act, in linea con l'Agenda Strategica per la Ricerca e l'Industria (SRIA), mira a sviluppare chip specifici per le tecnologie quantistiche su diverse piattaforme, integrando le tecnologie classiche avanzate come quelle abilitanti. È fondamentale coordinare l'industria dei chip, le fonderie e le infrastrutture quantistiche per creare una catena di strumenti integrata che comprenda progettazione, fabbricazione e librerie modulari per fotonica, criogenia ed elettronica superconduttore. Lo sviluppo dei chip quantistici prevede la creazione di librerie di progettazione innovative tramite strumenti di Electronic Design Automation, il potenziamento delle capacità italiane di nanofabbricazione attraverso l'iniziativa Qu-Pilot e la collaborazione con fonderie industriali, nonché investimenti in strutture di test avanzate e definizione di standard per garantire la qualità e l'affidabilità dei dispositivi quantistici.

2.2 L'ECOSISTEMA ITALIANO DELLE TECNOLOGIE QUANTISTICHE

2.2.1 L'ecosistema industriale italiano

In Italia, il settore industriale delle Tecnologie Quantistiche (TQ) è ancora emergente ma in crescita, trainato innanzitutto dagli investimenti pubblici nell'ambito del PNRR che hanno favorito la creazione di una rete di ricerca e sviluppo e stimolato la crescita del settore privato. Tuttavia, i fondi stanziati in Italia rimangono nettamente inferiori rispetto a quelli stanziati dal Regno Unito, dalla Germania e dalla Francia, sebbene superiori a quelli di altri paesi come la Spagna (cfr. par. 3.2). Ciò significa che, pur potendo ancora giocare un ruolo importante, l'ecosistema nazionale è in fase embrionale e il Paese si trova in ritardo nella corsa globale alle tecnologie quantistiche, ma ha iniziato a muoversi nella giusta direzione.

Al fine di mappare lo scenario industriale italiano, il Ministero delle Imprese e del Made in Italy ha realizzato, in collaborazione con l'Osservatorio Quantum Computing & Communication del Politecnico di Milano, una consultazione pubblica che ha coinvolto 52 stakeholder del settore, che rappresentano almeno 180 FTE² nell'ambito delle tecnologie quantistiche. È emerso un ecosistema variegato e composto da aziende dell'offerta e della domanda, fondi di venture capital e facilitatori / associazioni di categoria / fondazioni come riportato nella figura 2.



Figura 2 - Distribuzione della tipologia di organizzazione partecipante alla consultazione MIMIT sulle TQ [fonte: elaborazione dati MIMIT-Osservatorio quantum computing & communication del Politecnico di Milano]

² Equivalente a tempo pieno. Si segnala che solamente il 60% dei rispondenti ha fornito il numero di FTE.

Analizzando le 46 aziende consultate (escludendo quindi VC e associazioni di categoria), l'ecosistema si compone di:

- grandi attori italiani del settore ICT e della componentistica come system integrator, società di consulenza e telco provider, che stanno differenziando la propria *value proposition* nel campo delle tecnologie quantistiche: ad esempio, lo sviluppo di algoritmi quantistici, la creazione di librerie e la commercializzazione di prodotti di comunicazione quantum-safe;
- grandi attori internazionali del settore dell'informatica posizionati prevalentemente sullo sviluppo di hardware e middleware per il Quantum Computing, che hanno interessi commerciali sul mercato italiano;
- aziende e startup native del settore delle tecnologie quantistiche, nate oltreoceano o in altri Paesi europei, che stanno guardando con interesse al mercato italiano come potenzialità industriali;
- aziende e startup italiane native del settore che operano prevalentemente nello sviluppo di software quantistico per la computazione, nello sviluppo di hardware, middleware e software per le comunicazioni quantistiche e per i sensori quantistici;
- grandi aziende italiane potenziali utilizzatrici della tecnologia prevalentemente in ambito finanziario, assicurativo, energetico e chimico-farmaceutico.

Spostando il focus in ambito geografico, emerge una distribuzione territoriale che rispecchia la presenza dei centri di ricerca nelle TQ (figura 3). Ciò è dovuto allo stato non ancora maturo della tecnologia, che richiede un significativo avanzamento scientifico per raggiungere la piena applicabilità industriale.



Figura 3 – Distribuzione territoriale dei partecipanti alla consultazione MIMIT sulle TQ. [fonte: elaborazione dati MIMIT-Osservatorio quantum computing & communication del Politecnico di Milano]

La spinta principale è da attribuirsi ai finanziamenti pubblici, mentre il settore privato si ferma a soli 12,5 mln € stanziati tra il 2023 ed il 2024 attraverso fondi di venture capital. A tal proposito si segnala la recente costituzione del fondo di Cassa Depositi e Prestiti Venture Capital Sgr, ammontante a un miliardo di euro destinato alle tecnologie deep tech come IA, cyber e quantum.

Rispetto alle diverse tipologie di tecnologie quantistiche, come mostrato in Figura 4, il campione è variegato e presente trasversalmente in tutti i campi seppur con una prevalenza sul Computing.

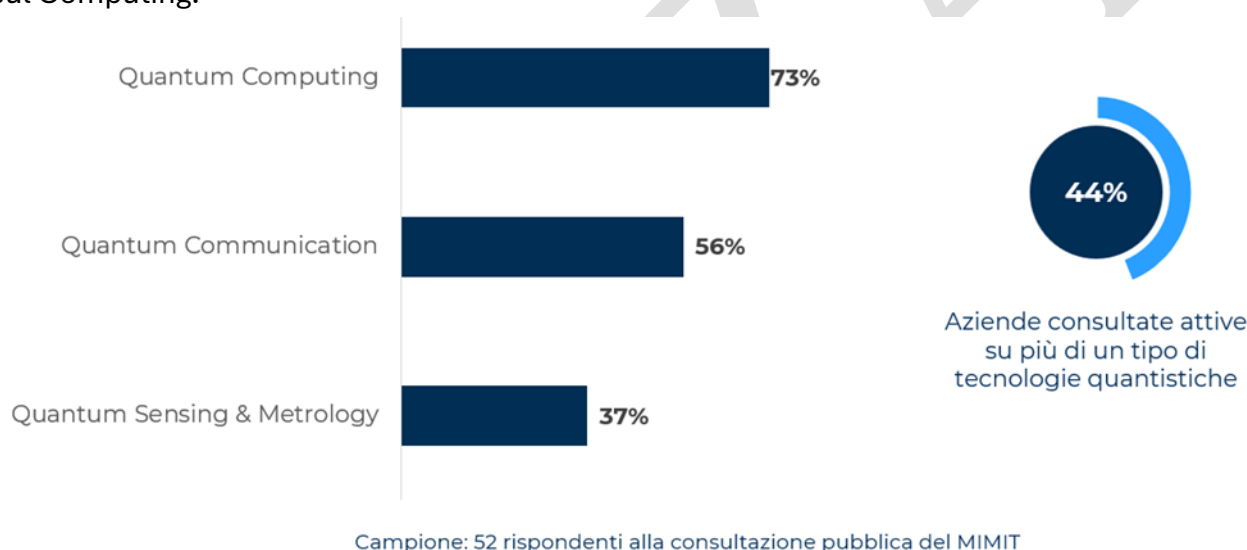


Figura 4 – Distribuzione pilastri quantistici sviluppati dalle imprese. [fonte: elaborazione dati MIMIT-Osservatorio quantum computing & communication del Politecnico di Milano]

❖ Calcolo quantistico

Le consultazioni evidenziano come il mercato del calcolo quantistico sia ancora in una fase embrionale. L'Italia si distingue per l'eccellenza nella componentistica, in particolare nella fotonica, ma registra un ritardo nello sviluppo di startup di rilievo internazionale. Sebbene alcune startup stiano orientando gli sforzi verso una futura creazione di hardware, attualmente non esistono aziende che offrano una soluzione interamente italiana. Quest'assenza potrebbe rappresentare un limite per la realizzazione di prodotti finali interamente nazionali nel lungo termine, rendendo necessario nel breve termine l'adozione di politiche di approvvigionamento che stimolino l'innovazione senza imporre restrizioni. Infatti, la maggior parte delle imprese e delle startup italiane si concentra principalmente su

software e applicazioni, con un ampio potenziale di sviluppo di servizi a valore aggiunto per l'industria. Gli investimenti nel software risultano meno rischiosi, grazie anche ad approcci di breve termine come il quantum-inspired, che consente di avvicinare i ritorni sull'investimento, rendendo il settore più attrattivo per capitali privati.

Tra gli ostacoli oggi segnalati in questo campo, le consultazioni evidenziano i tempi di attesa prolungati per l'accesso alle infrastrutture, i tempi di inattività molto lunghi dei laboratori e l'indisponibilità dei nuovi sistemi di calcolo quantistico recentemente completati all'estero per l'utilizzo da parte delle imprese. Inoltre, il tema della proprietà intellettuale è critico: l'assenza di fonderie specializzate in Italia porta molte aziende a collaborare con strutture estere, creando preoccupazioni riguardo alla tutela dei loro brevetti e alla sicurezza dei processi.

❖ Comunicazione Quantistica

Secondo quanto emerge dalle consultazioni, la comunicazione quantistica è un settore in cui l'Italia eccelle per presenza di startup e sperimentazioni riconosciute a livello internazionale. Dal punto di vista della catena del valore, la produzione delle tecnologie di comunicazione quantistica in Italia fa leva su componenti elettroniche assemblate all'estero poiché non esistono una filiera nazionale e strutture di produzione europee.

A livello di dispositivi hardware quantistici per la comunicazione quantistica, l'Italia presenta startup, riconosciute a livello internazionale, che producono sistemi di Quantum Key Distribution, già commercializzabili e integrabili in reti esistenti. Tuttavia, dal punto di vista tecnico, viene segnalato che le tecnologie attuali hanno ancora problematiche sul lungo raggio (chilometraggio) e costano significativamente di più rispetto alle tecnologie tradizionali. A livello software, sono già disponibili degli algoritmi provati per essere resistenti all'attacco di un potenziale computer quantistico e anche in Italia esistono attori che si stanno attivando per offrire servizi di Post-Quantum Cryptography. QKD e Post-Quantum Cryptography possono essere tecnologie complementari e integrate in un unico prodotto. La complessità maggiore risiede nell'aggiornamento degli attuali sistemi di crittografia e delle attuali infrastrutture di rete.

L'ostacolo principale allo sviluppo del settore è oggi rappresentato dall'assenza di standardizzazione e certificazione delle tecnologie, che rallenta la loro diffusione capillare in una generale mancanza di consapevolezza da parte delle aziende della domanda.

❖ Metrologia e sensoristica quantistica

Nella metrologia e sensoristica quantistica, l'Italia vanta una significativa filiera di sensoristica tradizionale che potrebbe essere valorizzata in ottica quantistica e agevolare la futura industrializzazione del settore. La componentistica, in particolare in aree come laser e controllo automatico (tra le altre), rappresenta un'opportunità significativa.

Guardando alla catena del valore, l'approvvigionamento di componenti fa spesso riferimento all'estero. Anche in questo caso, la mancanza di fonderie europee che lavorino per conto terzi rappresenta un limite nello sviluppo del settore. Dal punto di vista dell'hardware,

l'ecosistema italiano sta lavorando da un lato con nuove iniziative imprenditoriali, dall'altro con aziende della filiera tradizionale, che si stanno attivando per la realizzazione di sensori quantistici. Nell'ambito del software, alcune aziende stanno lavorando con l'obiettivo di integrare i sensori quantistici in contesti reali e interconnetterli con le tecnologie spaziali.

L'interesse attuale per queste tecnologie comprende diversi settori, tra i quali la Difesa, il settore medicale, l'automotive, l'aerospazio, le telecomunicazioni, l'energia, la geofisica e l'industria manifatturiera avanzata. La principale sfida per sviluppare il potenziale della sensoristica quantistica riguarda la capacità di costruire infrastrutture sopra a queste tecnologie e integrarle con quelle di calcolo/simulazione e comunicazione.

In merito alle aziende utenti interessate all'uso delle TQ, nello specifico computing e communication, la situazione italiana è in linea con quella internazionale caratterizzata da poche grandi aziende che investono per rendersi precursori di queste tecnologie. Tra i settori di interesse la maggioranza è rappresentata dal finance seguito da energy, utility & telco e aerospace & defence (figura 5).

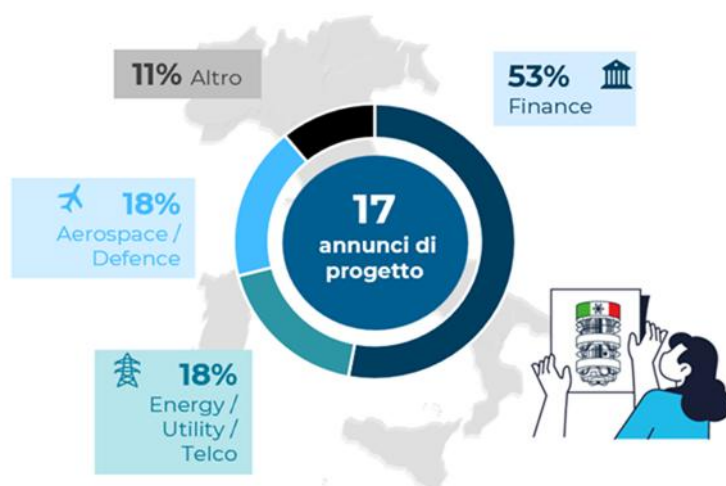


Figura 5 – Annunci di progetto pubblici di calcolo quantistico e comunicazione quantistica in Italia per settore. Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication del Politecnico di Milano

Nel corso delle consultazioni è altresì emerso un tema trasversale ai diversi pilastri delle TQ: le aziende hanno bisogno di accedere a strutture sofisticate per convalidare le proprie soluzioni e dimostrare la redditività commerciale delle TQ. Tuttavia, la natura sperimentale delle TQ, unita ai notevoli requisiti di capitale necessari per svilupparle, e ai lunghi orizzonti di pianificazione, possono rappresentare ostacoli significativi agli investimenti del settore privato, soprattutto nello sviluppo delle infrastrutture. Sebbene l'Italia disponga di diverse

infrastrutture in seno agli istituti di ricerca, queste sono utilizzate principalmente a scopi di ricerca con accesso limitato all'industria. Le principali istituzioni europee offrono strutture avanzate con capacità superiori rispetto a quelle nazionali, ma barriere finanziarie e amministrative ne limitano l'accesso alle imprese italiane.

Si genera così un'inefficienza di mercato che richiede un intervento pubblico accanto al settore privato, al fine di creare economie di scala e sinergie, in particolare per: fornire infrastrutture avanzate accessibili, in grado di supportare le aziende nello sviluppo di prototipi e nella convalida delle soluzioni tecnologiche; creare un contesto favorevole per catalizzare i loro investimenti nel settore; promuovere la collaborazione pubblico-privato, incentivando sinergie che accelerino il progresso tecnologico e industriale.

La disponibilità di strutture specializzate per la produzione e la prototipazione, dotate di strumentazioni all'avanguardia e personale qualificato è essenziale per affrontare queste sfide. È quindi emersa la necessità di costruire una rete di infrastrutture con l'obiettivo di creare canali di accesso semplificati per le aziende interessate a sviluppare e testare prototipi e di migliorare il coordinamento tra le infrastrutture italiane e quelle europee. Un esempio di tale rete è rappresentato a livello europeo dal programma Qu-Pilot, un progetto di Horizon Europe che sta costruendo un catalogo digitale per prodotti e servizi tecnici certificati relativi alle TQ.

Come sarà approfondito nella sezione “Raccomandazioni industria” (par. 3.3), per massimizzare il potenziale di queste infrastrutture, si profilano quindi due approcci complementari: la creazione di una rete integrata di infrastrutture di ricerca e di prototipazione, comprendente le camere pulite, i laboratori e le strutture specializzate; lo sviluppo di una domanda indirizzata dall'industria per guidare l'evoluzione di questa rete e adattarla alle esigenze di prototipazione delle TQ.

2.2.2 Progetti di ricerca finanziati dal Ministero dell'Università e della Ricerca

In Italia, il Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR) ha investito 227,4 milioni di euro di finanziamenti pubblici in iniziative di ricerca sulle TQ tra il 2021 e il 2024 (Fig. 6). La maggior parte dei fondi proviene dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (87%), mentre il restante 13% proviene da altre fonti di finanziamento.

Questi fondi sono distribuiti principalmente su tre iniziative: il **Partenariato esteso**, che ha assorbito poco più della metà dei fondi totali, seguito dal **Centro nazionale** e l'**Infrastruttura di ricerca** che insieme rappresentano quasi il 30%. Il restante 20% è suddiviso tra i cosiddetti progetti di rilevante interesse nazionale (PRIN; 7%), i progetti gestiti all'interno di CNR e INFN (in totale, 4%), e altri progetti (10%).

Se si considera il numero di progetti invece dell'ammontare dei fondi, queste percentuali cambiano significativamente (Fig. 7). In questo caso, infatti, il PRIN rappresenta il 64% di tutti i progetti di tecnologia quantistica, mentre INFN e CNR coprono rispettivamente il 15% ed il 3%, con il restante 18% distribuito tra altri progetti.

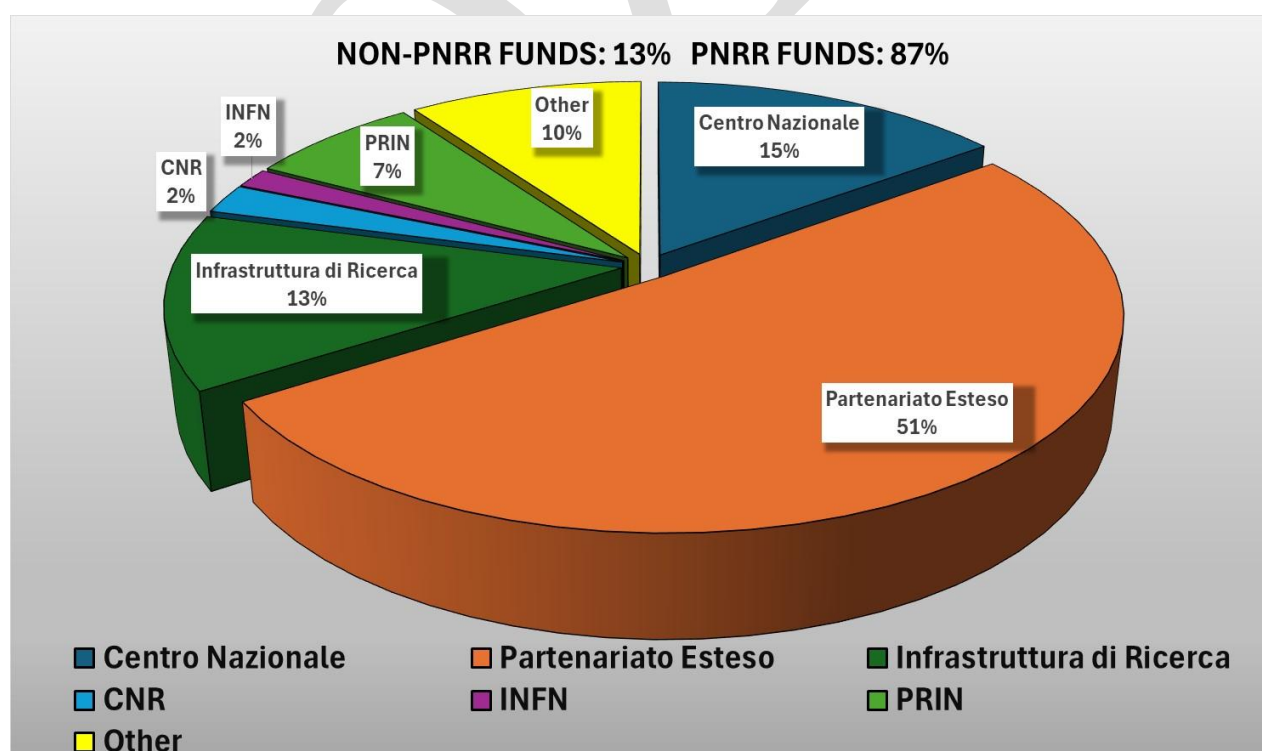
I progetti sulle TQ possono essere raggruppati nei sei pilastri descritti nella prima parte:

- a) Calcolo Quantistico;
- b) Simulazione Quantistica;
- c) Comunicazione Quantistica;
- d) Metrologia e Sensoristica Quantistica;
- e) Ingegneria e Tecnologie Abilitanti;
- f) Scienza di Base e Meccanica Quantistica.

La distribuzione dei progetti tra i pilastri è generalmente uniforme, con un numero inferiore di progetti dedicati alla comunicazione quantistica e alla ricerca quantistica di base, quest'ultima in quantità residuale (Fig. 8).

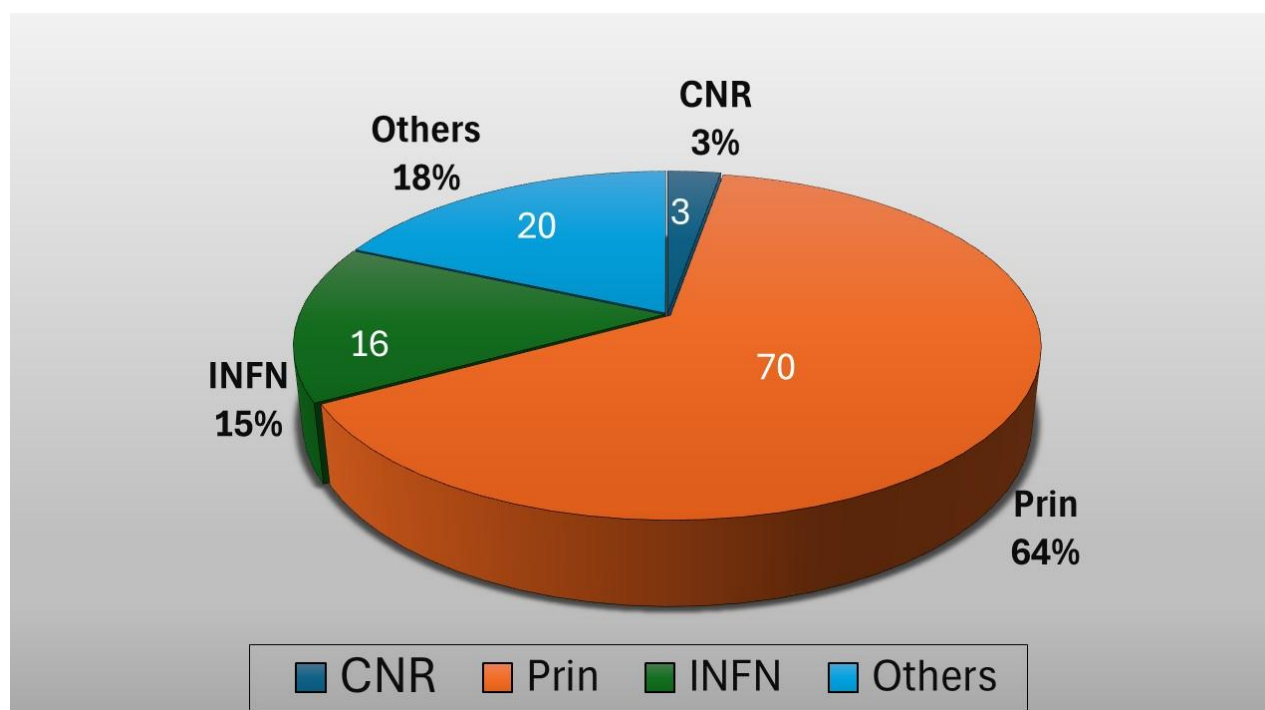
I finanziamenti possono anche essere suddivisi in base al tipo di iniziativa: progetti strategici dedicati alle tecnologie quantistiche (85% dei fondi) trainati dal Centro nazionale, dal Partenariato esteso e dall'Infrastruttura di ricerca, e programmi competitivi aperti ad altre tematiche (Fig. 9). Tuttavia, se si guarda al numero di progetti, la situazione si inverte: il 77% dei progetti è finanziato attraverso procedure competitive, grazie al forte contributo del PRIN. All'interno del PRIN, circa due terzi dei Principal Investigator provengono dal sistema universitario, mentre l'altro terzo è equamente suddiviso tra INFN e CNR (Fig. 10), evidenziando una forte collaborazione tra università e centri di ricerca nella promozione delle TQ.

Figura 2 Finanziamento pubblico per progetti di tecnologia quantistica (2021-2024) - 227,4 milioni (risorse nazionali e fondi di recupero gestiti dal MUR)



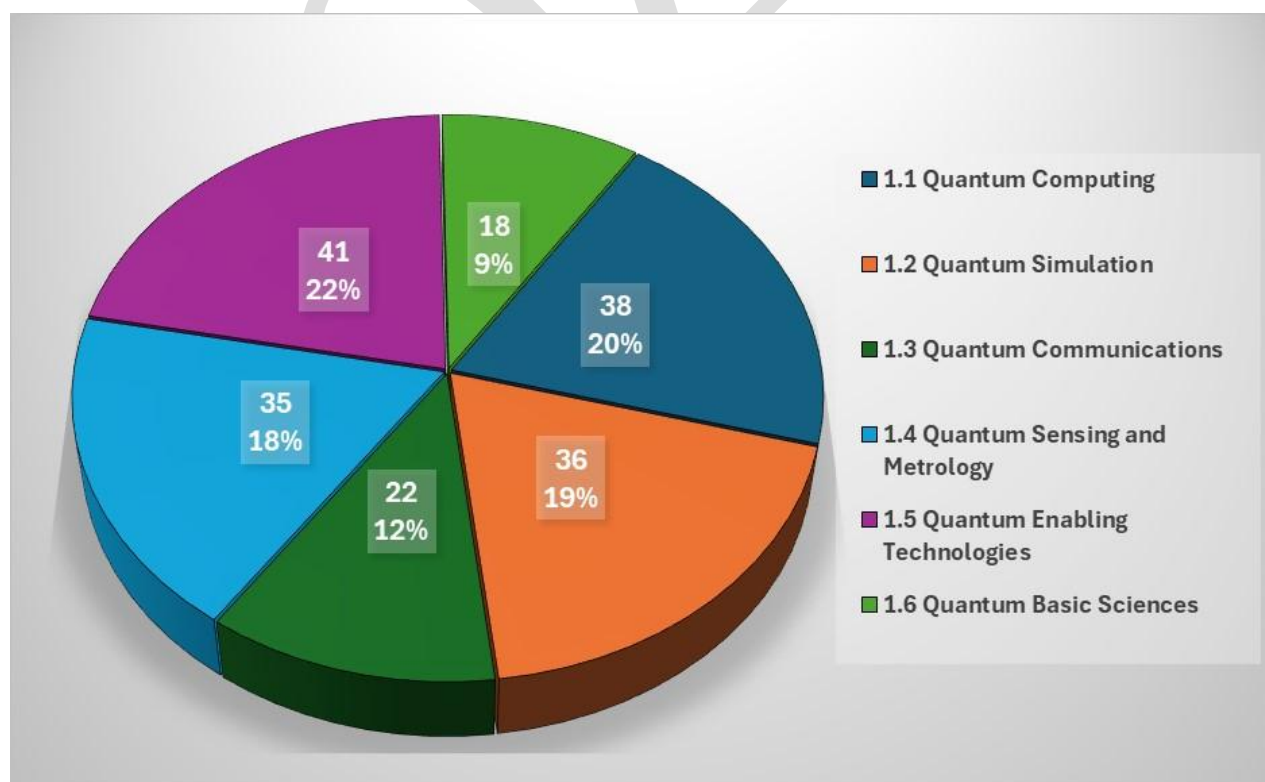
Fonte: Ministero dell'Università e della Ricerca

Figura 3 - NUMERO DI PROGETTI



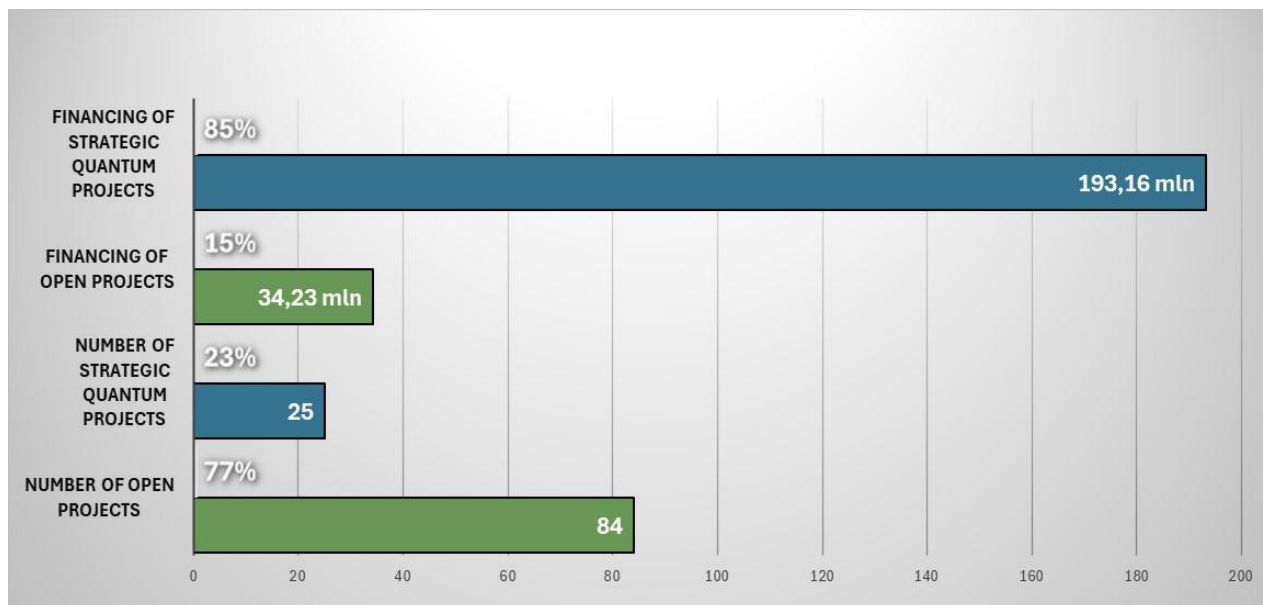
Fonte: Ministero dell'Università e della Ricerca

Figura 4 - Numero e percentuali di progetti per pilastro



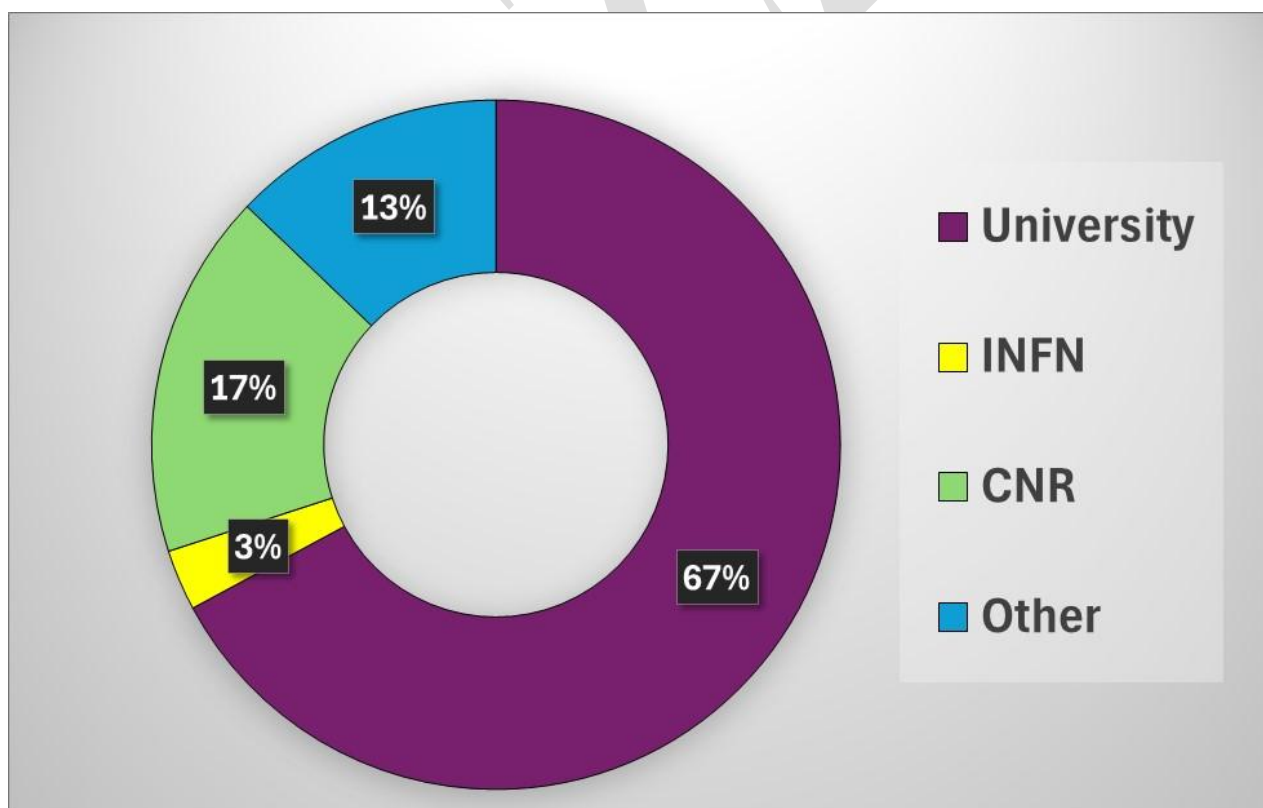
Fonte: Ministero dell'Università e della Ricerca

Figura 5 - Progetti quantistici strategici vs progetti aperti



Fonte: Ministero dell'Università e della Ricerca

Figura 6 - Affiliazione dei ricercatori principali - PRIN



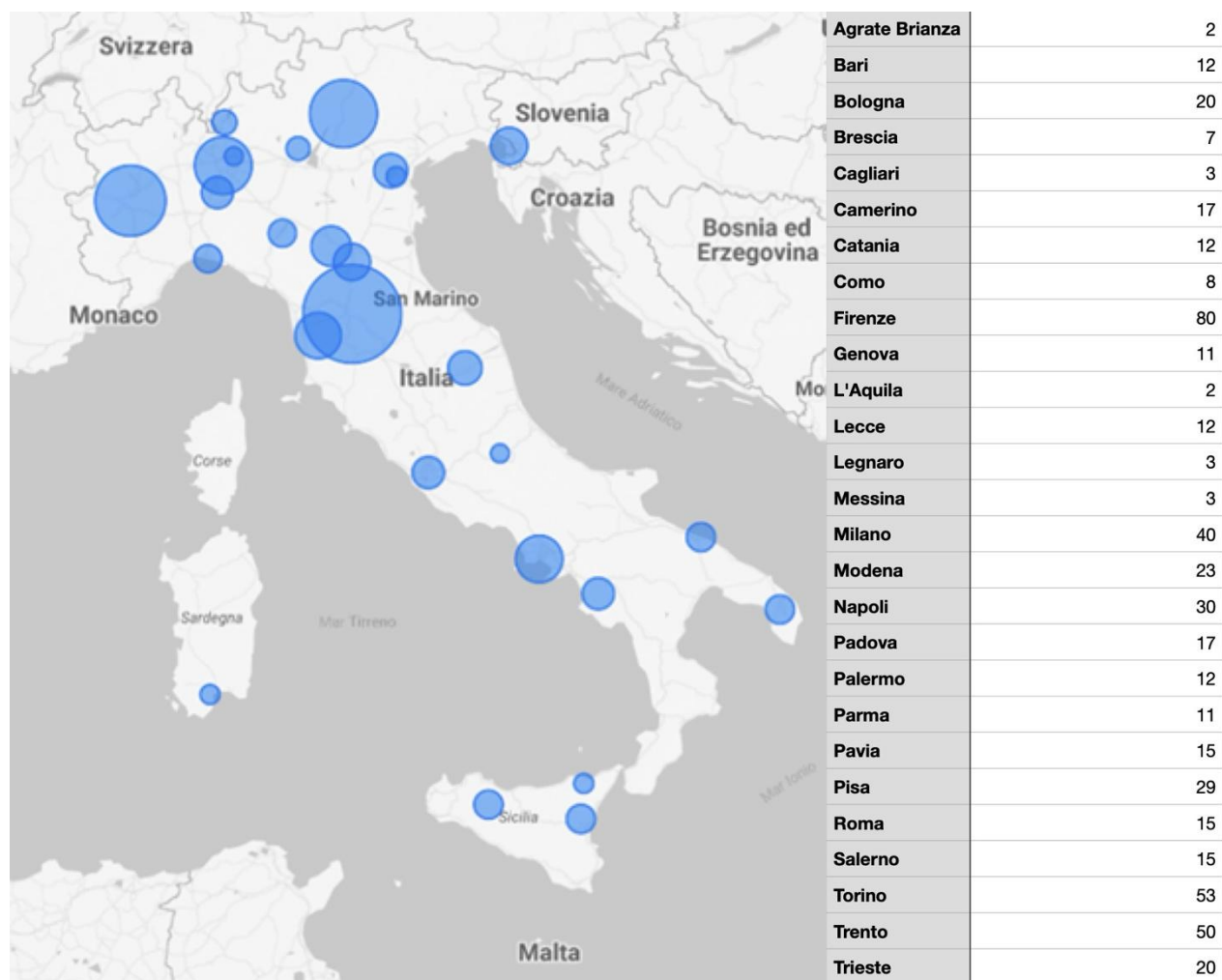
Fonte: Ministero dell'Università e della Ricerca

Le istituzioni italiane partecipano anche a 68 progetti di ricerca quantistica finanziati dal programma Horizon Europe, ricevendo complessivamente circa 62 milioni di euro, e a 3 progetti finanziati dal programma Digital Europe, ricevendo circa 8,1 milioni di euro.

Il panorama della ricerca italiana sulle tecnologie quantistiche è stato mappato anche attraverso un'indagine capillare, condotta tramite la compilazione di un questionario che ha raccolto più di 130 risposte da università ed enti di ricerca. Il risultato principale è illustrato graficamente nella Fig. 11, in cui le bolle situate in corrispondenza delle città italiane sono rappresentate con una dimensione proporzionale al numero di personale permanente e di ricercatori a tempo determinato impiegati nel settore pubblico.

L'analisi evidenzia una distribuzione geografica ampia dello sforzo di ricerca, che coinvolge l'intero territorio nazionale; emerge anche l'esistenza di cluster di ricerca concentrati in alcune aree specifiche.

Figura 7 - Il personale nel mondo della ricerca: università ed enti di ricerca in italia (la dimensione della bolla è proporzionale all'impegno del personale nelle scienze e tecnologie quantistiche, settore pubblico)



2.2.3 Il sistema di istruzione e formazione della forza lavoro

Sfide e opportunità

Il rapido sviluppo delle TQ sta aprendo nuove opportunità sia nelle scienze fondamentali che in quelle applicate. Per sfruttare appieno il potenziale delle TQ, è necessaria un'ampia comunità scientifica in grado di lavorare all'intersezione di varie discipline, tra cui fisica, chimica, matematica, informatica e ingegneria. Questa necessità è condivisa sia dalla comunità accademica che da quella industriale, dove l'interesse per le TQ è in costante crescita.

Con la loro evoluzione, le TQ sono destinate a diventare un importante fattore economico nel settore delle tecnologie avanzate, creando numerose opportunità lavorative e ponendo rilevanti sfide sociali. La prevista crescita dei posti di lavoro in questo settore richiederà nuova forza lavoro, preparata sia per il mercato attuale che per le esigenze future. È quindi essenziale anticipare ed affrontare proattivamente i cambiamenti previsti nel mercato del lavoro italiano: man mano che le TQ penetrano i vari settori industriali, la formazione potrà essere sviluppata attraverso uno stretto coordinamento tra tutte le parti interessate. La sfida consiste nel formare personale altamente qualificato con competenze interdisciplinari fondamentali per un settore così avanzato e in rapida evoluzione.

Panorama del sistema della formazione attuale

- Lauree di I livello.

Le scienze e le tecnologie quantistiche richiedono competenze specifiche e di alto livello che non possono essere fornite solo da una laurea di I livello. Tuttavia, quest'ultima può offrire una solida introduzione ai concetti fondamentali, in grado di rendere gli studenti consapevoli dei possibili sviluppi della loro carriera di studio e professionale. Attualmente, i fondamenti della fisica quantistica sono insegnati in modo completo solo all'interno della classe di laurea L-30 (Scienze e Tecnologie Fisiche), con alcuni corsi introduttivi di base offerti in altri programmi STEM, come ad esempio in Chimica (L-27) e/o Ingegneria (L-8 Fisica/Elettronica/Energia/Informazione).

- Lauree magistrali.

La grande maggioranza dei programmi magistrali di Fisica (LM-17) è organizzata in curricula/indirizzi -che sono strettamente legati alle discipline tradizionali della fisica, come la fisica teorica, nucleare e sub-nucleare, della materia condensata, o applicata. Attualmente, diversi corsi di laurea magistrale in Fisica includono anche un curriculum in Scienze e Tecnologie. Esistono inoltre diversi esempi di programmi STEM che includono singoli corsi che trattano argomenti specifici di Scienza e Tecnologia Quantistica. Tuttavia, i programmi completamente strutturati sono ancora un'eccezione mentre in Europa esistono già o stanno nascendo più di 40 master specializzati in "Tecnologie Quantistiche" e "Ingegneria Quantistica".

- Dottorati di ricerca.

A livello di dottorato di ricerca, alcune iniziative sono già state avviate nelle università, anche grazie ai finanziamenti dell'UE Next Generation diverse posizioni di dottorato incentrate su temi di TQ hanno fornito un notevole impulso verso la formazione di personale specializzato e qualificato.

- Master professionalizzanti.

Negli ultimi anni sono stati attivati in Italia alcuni master professionali nell'ambito delle TQ, che non sono tuttavia ancora diffuse e in grado di soddisfare la prevista crescita dei posti di lavoro nel settore, sia dal punto di vista delle competenze richieste che per la numerosità.

2.3 IL POSIZIONAMENTO DELL'ITALIA A LIVELLO INTERNAZIONALE

Come accennato in precedenza, il settore industriale delle TQ in Italia è emergente ed in crescita grazie alla spinta fornita dai fondi PNRR. L'Italia poteva tuttavia già vantare alcune eccellenze nell'ambito della ricerca accademica: si colloca infatti al settimo posto mondiale con oltre 4.200 pubblicazioni nel campo del Quantum Computing³. Si registra altresì un crescente numero di master e corsi di laurea magistrali sul tema. Sul fronte finanziamenti invece, la posizione italiana risulta in ritardo in uno scenario guidato da diverse nazioni che hanno investito ingenti quantità di capitale su lunghi periodi di tempo (figura 12), tenendo anche in considerazione che 14 di queste hanno pubblicato una strategia nazionale per coordinare le attività necessarie al proprio sviluppo tecnologico.



Figura 8 – Rappresentazione dei finanziamenti pubblici internazionali. Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication del Politecnico di Milano

³ Fonte Scopus: pubblicazioni sul Quantum Computing dal 1980 ad oggi.

Puntando la lente sul continente europeo, i principali investitori risultano essere il Regno Unito, la Germania e la Francia, con l'Olanda poco distante. Rispetto a questi leader europei, l'Italia (227,4 mln €) ha margini di miglioramento in termini di quantità di fondi stanziati, orizzonte temporale e definizione di un programma strategico.

Paese	Finanziamenti pubblici
Regno Unito	4.122
Germania	3.030
Francia	1.800
Paesi Bassi	1.100
Danimarca	179
Austria	140
Spagna	98
Finlandia	34

Tabella 2 – Finanziamenti pubblici europei per le tecnologie quantistiche (in milioni di euro) nel 2024. Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication del Politecnico di Milano

Ciò ha ripercussioni anche nello sviluppo del settore privato in termini di numero di aziende native e fondi di venture capital raccolti. Come rappresentato nella tabella 3 c'è una presenza esigua di startup native nel nostro paese ma rispetto ad altri leader europei la distanza risulta colmabile.

Paese	Numero Aziende Native
Stati Uniti	102
Canada	39
Regno Unito	35
Germania	28
Francia	18
India	14
Cina	14
Paesi Bassi	14
Giappone	13
Italia	13
Spagna	10

Tabella 3 – Numero di aziende native di TQ per Paese nel 2024. Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication del Politecnico di Milano

2.3.1 Punti di forza, debolezza, opportunità e rischi

Sulla base di quanto emerso dalla mappatura effettuata a valle della consultazione pubblica degli stakeholder industriali, della ricognizione dei fondi stanziati in ambito accademico italiano, nonché del posizionamento dell'Italia a livello internazionale, sono stati individuati di seguito alcuni punti di forza, debolezza, opportunità e rischi.

Punti di forza

- Distribuzione geografica sul territorio nazionale di università ed enti di ricerca che si occupano di tecnologie quantistiche e ne favoriscono l'industrializzazione;
- Ecosistema delle TQ ben strutturato;
- Ottime capacità di ricerca e trasferimento tecnologico nel Quantum Sensing & Metrology;
- Filiera, dalla ricerca all'impresa, riconosciuta a livello internazionale nelle Quantum Communication technologies;
- Presenza di capacità di ricerca e startup di Quantum Computing a livello software;
- Presenza di alcune grandi aziende della domanda che stanno già investendo sulle tecnologie quantistiche;
- Presenza di grandi aziende all'avanguardia che possono stimolare la crescita della filiera;
- Presenza di laboratori che potrebbero essere accresciuti per assecondare le necessità delle aziende.

Punti di debolezza

- Ritardo ad oggi, di un hardware quantistico italiano competitivo per il quantum computing;
- Necessità ingente di capitali per lo sviluppo di hardware quantistico;
- Disegnare politiche incentivanti più allineate alle esigenze del settore (per rapidità delle procedure, entità dei finanziamenti, tempi di ritorno degli investimenti);
- Mancanza di un ecosistema strutturato e di un tavolo di coordinamento tra filiera, ricerca e istituzioni;
- Filiera dell'offerta ancora embrionale rispetto ad altri Paesi europei;
- Scarsa competitività del mercato del lavoro in ambito deep tech;
- VC italiani non ancora allineati con le reali necessità delle imprese che operano nelle TQ;
- Mancanza di infrastrutture: assenza di fonderie italiane e necessaria espansione della fibra per QKD;
- Consapevolezza non diffusa in merito alle potenzialità delle TQ e alle minacce sul fronte cybersecurity;
- Mancanza di standardizzazione e linee guida governative su quantum e post-quantum security;

- Sistema di procurement governativo che non permette stimolo della domanda nella sperimentazione;
- Difficoltà di trattenere o attrarre talenti.

Opportunità

- Sono presenti ancora diversi campi di ricerca aperti con notevoli potenzialità;
- Attenzione europea alle tecnologie quantistiche come arena tecnologica in cui instaurare una leadership;
- Progetti europei permettono di realizzare investimenti e dare accesso alle infrastrutture;
- Elevate potenzialità formative per giovani ricercatori e di acquisizione di nuove competenze per il mercato del lavoro;
- Fase di mercato precompetitiva che richiede collaborazione tra settore privato pubblico;
- Valore economico potenzialmente elevato derivante dall'utilizzo delle TQ in diversi settori.

Rischi

- Investimenti ingenti in altri Paesi che rendono l'Italia attualmente poco competitiva, rischiando di creare una situazione di dipendenza da altri Stati, di generare una fuga di talenti e di perdere opportunità di sviluppo economico;
- Attuale assenza di una strategia industriale europea che sta generando sforzi nazionali poco coordinati;
- Rischio di limitare la filiera del software per via del limitato sviluppo e accesso all'hardware;
- Rischio di ridurre le potenzialità di sviluppo di hardware nazionale in caso di eccessiva dipendenza da macchinari esteri.
- Dati a rischio a causa dei futuri attacchi di cybersicurezza mediante le TQ: *"harvest now, decrypt later"*.

3. LINEE DI AZIONE FUTURE

3.1 DIREZIONI DI SVILUPPO SCIENTIFICO

3.1.1 Scienza quantistica di base

1. Mantenere e rafforzare il ruolo dominante dell'Italia nella ricerca di base nello scenario europeo e mondiale.

Obiettivo

La ricerca scientifica di base rappresenta oggi un elemento essenziale per garantire ulteriori progressi in tutti i pilastri delle tecnologie quantistiche e per fornire nuove applicazioni in

futuro. Un investimento consistente in questo ambito permetterà di mantenere la posizione di forza che l'Italia ha nella ricerca di base nello scenario europeo e mondiale.

Linee di azione

- a) Approfondire la comprensione dei fenomeni alla base dei sistemi e dei dispositivi quantistici esistenti (esperimenti e teoria);
- b) Progettare nuove architetture per applicazioni di informazione quantistica, tra cui qubit, memorie, protocolli e algoritmi, e sviluppare architetture quantistiche scalabili e ibride
- c) Ottimizzare le misure quantistiche sfruttando risorse o protocolli alternativi, con vantaggi rispetto agli approcci classici;
- d) Sviluppare strategie per estendere e proteggere l'entanglement e il trasferimento di stati quantistici;
- e) Progettare interfacce efficienti sia tra qubit che tra piattaforme fisiche diverse, promuovendo l'interoperabilità tra tecnologie eterogenee;
- f) Sviluppare metodi per la ricostruzione e la stima di stati quantistici complessi e/o canali quantistici, assieme alla certificazione delle loro proprietà;
- g) Approfondire la comprensione delle risorse quantistiche (quantificazione di entanglement, non-località di Bell, ecc) e sviluppare teorie delle risorse per l'informazione quantistica;
- h) Progettare task di informazione quantistica efficienti e indipendenti dal dispositivo.

3.1.2 Calcolo quantistico

I calcolatori quantistici, oltre ai simulatori quantistici, sono le tecnologie quantistiche che hanno visto oltreoceano il più rapido sviluppo negli ultimi anni. Questo è stato reso possibile grazie a ingenti investimenti da parte di venture capital e di grosse compagnie. Diversi stati membri dell'UE stanno sviluppando hardware quantistico. È necessario uno sforzo a supporto di analoghe iniziative a livello nazionale, in collaborazione con altri stati membri e nell'ambito dello sviluppo di un ecosistema europeo di calcolo ad alte prestazioni. È importante inoltre raccordare questa area di ricerca con il parallelo sviluppo delle tecnologie legate all'intelligenza artificiale.

Obiettivo: Raggiungere uno stadio di comprovato vantaggio quantistico rispetto al calcolo classico

Linee d'azione:

- Migliorare la qualità dell'hardware e delle interfacce e sviluppare tecniche di mitigazione degli errori per raggiungere la transizione dal regime NISQ al regime FTQC e consentire l'integrazione con sistemi di calcolo ad alte prestazioni e di comunicazione classica e quantistica.

- Identificare algoritmi e casi d'uso ed algoritmi per verificare il vantaggio quantistico rispetto al calcolo classico
- Sviluppare algoritmi ibridi quantistici – classici ed esplorare forme di intelligenza artificiale e di apprendimento automatico quantistici
- promuovere il trasferimento di conoscenze e le sinergie tra il nostro Paese, l'ecosistema High Performance Computing-Quantum Computing and Simulation (HPC-QCS) europeo esistente, ed i programmi di Digital/Horizon Europe e le varie iniziative quantistiche adottate degli Stati membri;

3.1.3 Simulazione quantistica

Obiettivo: implementare algoritmi in grado di risolvere in modo efficiente problemi di ottimizzazione su piattaforme fisiche avanzate

Linee d'azione:

- Sviluppare strategie per affrontare complessi problemi di ottimizzazione in specifiche piattaforme di simulazione quantistica con comprovati vantaggi quantistici.
- Promuovere l'adozione di architetture ibride quantistico-classiche e facilitare l'accesso a simulatori quantistici avanzati per affrontare applicazioni rilevanti per il settore industriale

3.1.4 Comunicazione quantistica

Riconoscendo il pieno potenziale dell'Internet quantistico ed i benefici derivanti dall'attuazione della maggior parte dei passi intermedi, l'Italia e tutti i 27 Stati membri dell'UE si sono impegnati per realizzare **un'infrastruttura di comunicazione quantistica sicura integrata a livello Europeo**. Questa rete, denominata **EuroQCI**, mira a potenziare le capacità scientifiche e tecnologiche dell'Europa in ambiti chiave come la sicurezza informatica, le tecnologie quantistiche e la competitività industriale, rafforzandone al contempo l'autonomia strategica. **EuroQCI** sarà un'infrastruttura operativa che coprirà l'intera UE, compresi i suoi territori d'oltremare, sfruttando una combinazione ottimale di tecnologie terrestri e spaziali.

Questo obiettivo generale e ambizioso richiede sforzi infrastrutturali, scientifici e tecnici.

Obiettivo

Sviluppare le reti di comunicazione quantistica, rendere quantum-ready e quantum-resilient le attuali reti di comunicazione ed integrare la comunicazione quantistica sicura nelle reti classiche.

Linee di azione

- a) Completare la dorsale quantistica italiana e collegarla a EuroQCI integrando comunicazioni quantistiche satellitari, connessioni transfrontaliere in fibra ottica e reti metropolitane.
- b) Progettare architetture di reti quantistiche e relativi protocolli quantistici che rispondano ad esigenze ad esigenze combinando la crittografia post-quantistica e le primitive quantistiche, insieme al toolkit software specifici per integrare le comunicazioni quantistiche in reti sicure.
- c) Favorire la rapida piena attivazione del Centro nazionale di crittografia, quale centro di riferimento nazionale per tutti gli aspetti della crittografia in ambito non classificato.

Obiettivo

Superare le barriere tecniche che limitano la comunicazione quantistica su grandi distanze, per garantire i massimi livelli di sicurezza e funzionalità nelle reti quantistiche

Linee di azione

- a) Sviluppare ripetitori quantistici veloci e affidabili per estendere la portata della comunicazione insieme a switch e hub necessari per l'instradamento dinamico dei segnali nella rete. Migliorare componenti chiave come sorgenti e rivelatori.
- b) Migliorare i canali quantistici sia fibre ottiche che collegamenti nello spazio libero, ottimizzandoli per ridurre le perdite e garantire alta fedeltà di trasmissione

Obiettivo

Abilitare la creazione di reti quantistiche in grado di scambiare direttamente risorse quantistiche per permettere l'elaborazione quantistica distribuita, l'accesso sicuro a risorse quantistiche remote e l'installazione di reti di sensori quantistici,

Linee di azione

- a) Sviluppare interfacce quantistiche robuste e affidabili per collegare i dispositivi quantistici a una rete quantistica e trasferire in modo efficiente le informazioni quantistiche dai qubit volanti ai dispositivi quantistici specifici.
- b) Progettare architetture di reti quantistiche e relativi protocolli quantistici che rispondano ad esigenze ad esigenze pratiche riducendo i requisiti hardware richiesti.

3.1.5 Metrologia e sensoristica quantistica

La metrologia e il sensing hanno pienamente riconosciuto i vantaggi della tecnologia quantistica. Progressivamente i campioni primari delle misure hanno incorporato misure di tipo quantistico, usando le proprietà di atomi, fotoni, materiali superconduttivi e con proprietà quantistiche esotiche: questo è avvenuto nella Convenzione del Metro e nelle realizzazioni internazionali e nazionali, Italia compresa. Oltre i campioni primari, la sensoristica vede nelle tecnologie quantistiche la possibilità di misure a sensibilità aumentata.

Esiste una stringente esigenza di migliorare campioni e sensori da un lato, e di avere gli strumenti per testarli e certificarli dall'altro: la Commissione Europea sta lanciando l'iniziativa di **un'infrastruttura di testing e misura per le tecnologie a livello Europeo, denominata EuroQMTI (European Quantum Measuring and Testing Infrastructure)** sulla linea seguita per EuroQCI, con la finalità di potenziare le capacità europee a sostegno dello sviluppo di sensori quantistici in ambito di ricerca e industriale.

Lo scenario europeo offre all'Italia un ambizioso percorso che la renda capace di cogliere i vantaggi di ricerca e industriali attraverso obiettivi infrastrutturali, scientifici e tecnici.

Obiettivo

Sviluppare le capacità di test e certificazione delle tecnologie e dei sensori quantistici nell'ambito della strategia comunitaria European Quantum Metrology and Testing Initiative (EuroQMTI).

Linee di azione

- a. Ampliare le competenze di testing per le tecnologie quantistiche, competenze che si configurano spesso come nuove, innovative, e interdisciplinari; queste competenze inoltre si interfacciano con lo sviluppo parallelo della standardizzazione delle tecnologie.
- b. Favorire la possibilità di testing di terze parti pubbliche per gruppi di ricerca e industrie, in modo da elevare il grado di maturazione tecnologica dei sensori senza gravare interamente sugli sviluppatori a basso TRL, così accelerando l'adozione industriale.
- c. Sviluppare un Centro Nazionale per il test e la certificazione delle tecnologie e dei sensori quantistici che sia protagonista nell'iniziativa EuroQMTI.

Obiettivo

Favorire le infrastrutture di ricerca che sviluppino sensori quantistici, con prototipazione e sperimentazione, per accelerare il trasferimento tecnologico e l'implementazione industriale.

Linee di azione

- a. Sviluppare le infrastrutture a supporto della sensoristica in termini di integrazione, di tecnologie abilitanti come le tecnologie di vuoto e di elettronica di controllo, che supporti una logica di filiera per lo sviluppo di dispositivi completi e non solo componenti o dimostrazioni di fattibilità
- b. Sviluppare le infrastrutture a supporto della miniaturizzazione dei sensori quantistici, vista come una tendenza tecnologica dominante in Europa e a livello globale

Obiettivo

Indirizzare gli sviluppi scientifici dei sensori quantistici che sono considerati strategici dall'industria italiana, attraverso la ricognizione delle competenze presenti nel Paese, per piattaforme e per classi di sensori. Favorire lo sviluppo di nuovi sensori, valorizzando realizzazione a più bassa maturità tecnologica, ma che possano garantire le basi di un più alto valore aggiunto.

Linee di azione

- a. Sostenere la rete di ricerca che offre soluzioni a bassa maturità tecnologica nei settori di sensoristica su cui l'Italia può esprimere un contributo industriale significativo in termini di

investimenti propri e di mercato oppure di utenti istituzionali, in particolare l'aerospazio, il biotecnologico, la filiera energetica e quella digitale.

- b. Favorire il trasferimento tecnologico attraverso misure mirate allo sviluppo della sensoristica quantistica nei settori aerospazio e biotecnologico, e in ogni altro settore dove sia stato evidenziato un livello di investimento industriale significativo

3.1.6 Tecnologie abilitanti

Per garantire un accesso ampio e sostenibile alle tecnologie quantistiche, è essenziale sviluppare strategie mirate per la fornitura e lo sviluppo di materiali, componenti e dispositivi necessari per l'assemblaggio di hardware quantistico. Queste strategie devono riflettere la diversità delle piattaforme attuali, che costituiscono la spina dorsale delle tecnologie quantistiche. Ciò comporta una pianificazione a lungo termine accompagnata da una mappatura dettagliata della catena di approvvigionamento e la valorizzazione delle capacità esistenti.

Obiettivo

Come delineato in precedenza, la varietà delle tecnologie abilitanti richiede una strategia nazionale ben coordinata con la strategia globale dell'UE, per garantire il pieno controllo delle piattaforme tecnologiche selezionate, riducendo significativamente la dipendenza da materiali e tecnologie non UE.

Strumenti generali

- ▶ **Sforzo sinergico:** Per raggiungere questi obiettivi, nel quadro di una strategia nazionale, è necessario promuovere una collaborazione tra tutti gli attori significativi: Università, Centri di ricerca, start-up, aziende medio-grandi e il comparto Difesa e Sicurezza. Tale collaborazione deve abbracciare tutte le fasi di maturità tecnologica (TRL) per accelerare l'innovazione in un contesto tecnologico senza precedenti.
- ▶ **Informazione all'industria e investimenti pubblici:** È necessario fornire informazioni dettagliate alle associazioni industriali e pianificare investimenti pubblici mirati per indirizzare gli sforzi industriali verso tappe tecnologiche ben definite. Parallelamente, gli investimenti pubblici dovrebbero favorire la creazione di start-up che rappresentano lo strumento più efficiente per accelerare il trasferimento tecnologico.
- ▶ **Sviluppo della forza lavoro:** È necessario predisporre misure specifiche per garantire la formazione di personale altamente qualificato, con una strategia ben pianificata in grado da una parte di attrarre risorse chiave e dall'altra di contrastare la fuga di talenti.
- ▶ **Regolamentazione:** I governi possono contribuire a stimolare la crescita del mercato e garantire relazioni commerciali stabili con i Paesi dell'UE e non UE per i componenti critici. Regole come la selezione degli investimenti diretti esteri o l'attrazione e il mantenimento delle risorse umane chiave possono impedire acquisizioni straniere ostili di produttori di tecnologie critiche nell'UE.
- ▶ **Catena di approvvigionamento:** Sebbene, come evidenziato da questo rapporto, diversi attori siano attivi in Italia, è necessario monitorare le catene di fornitura nel

tempo per salvaguardare la posizione dell'Italia e alleviare potenziali colli di bottiglia. È essenziale garantire l'accesso sicuro a componenti critici, come frigoriferi a diluizione, sistemi laser, componenti ottici ed elettronici, e sistemi criogenici o ad alto vuoto.

Strumenti specifici

- ▶ **Materiali:** Devono essere sviluppati metodi affidabili per quantificare le proprietà dei materiali e comprenderne l'impatto sui dispositivi quantistici e sulle loro prestazioni.
- ▶ **Dispositivi e componenti:** La disponibilità delle componenti essenziali e dei dispositivi necessari per la realizzazione di prodotti quantistici è strategica per mantenere un ruolo di primo piano a livello mondiale e per sostenere lo sfruttamento economico delle tecnologie quantistiche. Inoltre, garantire un accesso economico alle licenze relative all'uso di dispositivi e componenti essenziali per le startup e le piccole e medie imprese (PMI) dell'UE è cruciale per consentire e proteggere la crescita dell'industria quantistica dell'UE.
- ▶ **Fotonica e laser:** È essenziale sviluppare infrastrutture di ricerca avanzate e supportare finanziariamente la capacità produttiva italiana, colmando il divario tra le grandi fonderie e le PMI. L'estensione delle tecnologie quantistiche allo spettro infrarosso e il miglioramento delle sorgenti di fotoni singoli sono vitali per applicazioni come la distribuzione di chiavi quantistiche e il calcolo distribuito. La stabilizzazione della frequenza laser e l'uso di circuiti integrati fotonici (PIC) necessitano di ulteriore sviluppo, in particolare per l'imballaggio criogenico.
- ▶ **Refrigeratori e criogenia:**
 - ▶ Sono necessarie nuove infrastrutture criogeniche ottimizzate per grandi circuiti quantistici, la
 - ▶ co-localizzazione dell'elettronica di controllo di alto livello con i chip quantistici, lo sviluppo di chip di controllo classici che funzionano a temperature criogeniche (ad esempio, crio-CMOS), e la fabbricazione di chip di controllo superconduttori veloci.
- ▶ **Elettronica e integrazione:**

È fondamentale integrare componenti elettronici, magnetici, fotonici, a microonde e superconduttori in processi di produzione completi per soddisfare i requisiti delle applicazioni quantistiche complesse.

3.2 RACCOMANDAZIONI STRATEGICHE

3.2.1 Ricerca

Come emerge dai paragrafi precedenti, l'Italia vanta un solido e diffuso tessuto di ricerca, capace di competere a livello internazionale. Il Paese possiede un'estesa rete di gruppi di ricerca e laboratori distribuiti in numerose istituzioni, tra cui enti di ricerca nazionali (CNR, INRIM, INFN, ASI, CINECA, INAF) affiancati da numerosi centri di ricerca e laboratori

universitari. All'interno di queste istituzioni, spesso in collaborazione fra loro, vi sono diverse infrastrutture di fabbricazione e sviluppo per micro e nano-elettronica, optoelettronica e fotonica, sensoristica atomica, oltre ad una importante base industriale in tecniche del vuoto e criogenia.

Il PNRR ha avuto un ruolo cruciale nello sviluppo di molte di queste infrastrutture, a partire dalle attività di calcolo quantistico all'interno del Centro Nazionale di Calcolo ad alte prestazioni, alla messa a sistema di una iniziativa di Partenariato Esteso dedicata a scienza e tecnologie quantistiche che coinvolge università, enti di ricerca ed aziende.

Altre azioni tese alla valorizzazione sul territorio della ricerca nell'ambito delle tecnologie quantistiche sono state intraprese da alcune regioni e province autonome, con impegni finanziari anche cospicui e con fondi europei, che riguardano in prevalenza la messa in rete di infrastrutture e la promozione delle collaborazioni tra il settore pubblico e le aziende.

Per consolidare questo potenziale, è necessario intraprendere azioni specifiche volte a: i) rafforzare il sistema della ricerca, consolidando un ecosistema integrato e capace di sostenere l'innovazione tecnologica; ii) connettere il mondo della ricerca ed innovazione con quello dell'impresa promuovendo sinergie volte a massimizzare l'impatto economico e sociale; e iii) favorire le collaborazioni territoriali, valorizzando le specificità regionali e le risorse locali, con un effetto positivo sulla crescita economica, sulla sicurezza nazionale e sulla coesione sociale.

Raccomandazioni

1. Favorire lo sviluppo coordinato ed il trasferimento tecnologico per le TQ

Obiettivo

Creare un ecosistema di ricerca e innovazione efficiente e sinergico, facilitando il coordinamento delle infrastrutture, il trasferimento tecnologico e la collaborazione tra pubblico e privato per accelerare la commercializzazione delle tecnologie quantistiche.

Linee di azione

- a) Efficace **coordinamento delle attività, degli investimenti, dell'accesso alle infrastrutture** ed ai centri esistenti e **condivisione dei risultati dell'attività di ricerca**. Le piattaforme tecnologiche sono, infatti, ancora in fase di sviluppo e richiedono infrastrutture di fabbricazione e misura flessibili, nonché laboratori strutturali per sviluppare protocolli di misura quantistica e codici/algoritmi per hardware quantistico.
- b) Rapido **trasferimento tecnologico verso partner industriali, e relativa commercializzazione dei prodotti della ricerca**, anche attraverso la **standardizzazione dei processi per la valorizzazione dei risultati della ricerca, adottando**, quando disponibili, **best practice internazionali**.
- c) **Rafforzamento dell'articolazione dell'ecosistema sul territorio**, per favorire la partecipazione alle attività da parte di ricercatori provenienti da altre realtà sia pubbliche (enti di ricerca) che private (aziende), anche attraverso:

- Cooperazione nei laboratori di ricerca universitari fra **personale di provenienza sia pubblica che privata**;
- Accesso aperto alle infrastrutture di ricerca degli Enti da parte di **personale di provenienza sia pubblica che privata**;
- Costituzione di **laboratori congiunti pubblico/privati** con obiettivi specifici e concreti per portare sul mercato i risultati della ricerca. Ancora una volta è essenziale che le risorse umane coinvolte abbiano provenienza mista per "fondere" la cultura di ricerca e quella dell'innovazione. Tutte queste strutture saranno collaborative per costituzione, ma necessariamente localizzate sul territorio.

2. **Coordinamento dei finanziamenti della ricerca.**

Obiettivo

La creazione di un ecosistema solido e sostenibile implica da un lato l'individuazione di opportune e adeguate fonti di finanziamento pubblico, anche e soprattutto successivamente alla cessazione dei finanziamenti PNRR, dall'altro la capacità del sistema di gestire efficientemente tali risorse pubbliche assieme a quelle private, evitare duplicazioni e frammentazione, che ostacolerebbero la realizzazione degli ambiziosi obiettivi cui la presente Strategia Nazionale tende.

Linee di azione

- a) Evitare dispersioni e sovrapposizioni tra i finanziamenti pubblici garantendo una rapida focalizzazione delle risorse sui pilastri prioritari e sui progetti più promettenti in linea con le priorità strategiche del Governo sulle tecnologie critiche essenziali per il perseguimento degli obiettivi di autonomia strategica;
- b) Superare gli attuali deficit legati alla gestione dei finanziamenti alla ricerca, assicurando una maggiore efficacia dei processi di spesa, pubblica e privata, e garantendo la continuità dei fondi disponibili e la possibilità di programmazione della ricerca nel medio-lungo termine.
- c) Favorire una ricaduta positiva degli investimenti pubblici nella ricerca sul sistema produttivo, rafforzando il legame tra la ricerca pubblica e le imprese;
- d) Snellire e semplificare le procedure amministrative, per garantire una riduzione dei tempi tra stanziamento, impegno ed erogazione dei fondi, mantenendo al contempo un'accurata selezione dei progetti basata sulla qualità;
- e) Realizzare un quadro amministrativo e finanziario trasparente ed accessibile, rispondendo alle esigenze delle imprese e facilitando il loro accesso ai finanziamenti per ricerca e sviluppo. Si tratta del primo miglio della sinergia tra pubblico e privato che l'attuazione della Strategia Nazionale intende realizzare, anche rafforzando il partenariato pubblico-privato per accelerare l'innovazione;
- f) Promuovere un raccordo strutturato con iniziative delle regioni e degli enti locali, per favorire la sinergia istituzionale nell'ambito degli ecosistemi territoriali

3. Attrattività della ricerca e internazionalizzazione.

Obiettivo

Il Ministero dell'Università e della Ricerca ha messo a punto una serie di iniziative, anche con il sostegno dei fondi PNRR, per sviluppare un solido sistema di incentivi che possano attrarre in Italia sia ricercatori italiani attualmente all'estero che studiosi stranieri, e che possano premiare i ricercatori delle università italiane impegnati in progetti di particolare rilievo.

Queste iniziative intendono promuovere una circolazione dei talenti non solo a livello europeo e internazionale, ma anche all'interno della penisola, valorizzando sia ai luoghi dove la ricerca avviene che le persone che la rendono possibile ogni giorno.

È importante ragionare in maniera sistemica: le varie misure non debbono sovrapporsi tra loro ma moltiplicare invece le opportunità per i ricercatori desiderosi di rientrare in Italia o di contribuire al sistema scientifico nazionale.

Nella creazione di un ecosistema virtuoso e attrattivo, che capitalizzi al meglio le proprie risorse, è altresì importante promuovere il ruolo delle ricercatrici donne, contrastando i fenomeni che generano ambienti sfavorevoli o degradanti (ad esempio, il bias di genere).

Linee di azione

All'interno di un "**pacchetto attrattività**" si possono immaginare una serie di misure, che affianchino il sistema delle chiamate dirette, gli incentivi premiali e le misure relative a decontribuzioni.

- a) Azioni di informazione e di formazione per supportare imprese, enti locali, associazioni di categoria, centri di formazione professionale e servizi per il lavoro accreditati, le università, i centri di ricerca e gli altri soggetti dell'ecosistema della ricerca e dell'innovazione nella loro capacità di attrarre, accogliere e valorizzare talenti ad elevata specializzazione;
- b) Creazione di un Manifesto per l'attrazione dei talenti nelle filiere produttive nazionali, predisposto in collaborazione con diversi stakeholder, al fine di indirizzare e favorire le azioni per l'attrazione, la permanenza e la valorizzazione dei talenti. Tale manifesto potrebbe anche contenere buone pratiche e linee guida per università ed enti di ricerca al fine di monitorare l'attuazione delle politiche per l'attrazione dei talenti.
- c) Promozione dei processi di reclutamento e assegnazione dei fondi che incoraggino l'ampia partecipazione della comunità nella valorizzazione della sua diversità.

3.2.2 Trasferimento tecnologico

Le tecnologie quantistiche rappresentano un cambiamento di paradigma fondamentale per l'informatica, la crittografia e la modellazione scientifica. Una leadership precoce in questo settore determinerà la supremazia tecnologica globale nei prossimi decenni. Per questo motivo, la politica dell'innovazione e i piani di investimento sono stati considerati prioritari

nella stesura di questa strategia, ma ancora più importante è che tali investimenti siano rafforzati e agevolati durante la sua attuazione.

Attualmente l'Europa, Italia compresa, è in ritardo rispetto a Stati Uniti e Cina nello sviluppo delle TQ.

Negli Stati Uniti, ad esempio, il National Quantum Initiative Act (NQIA) ha quasi raddoppiato i finanziamenti federali per la ricerca e sviluppo nelle TQ, raggiungendo oltre 900 milioni di dollari all'anno tra il 2019 e il 2022. Questo investimento pubblico ha catalizzato ulteriori 6 miliardi di dollari di investimenti privati in ricerca e sviluppo, rafforzando una robusta industria nazionale.

In Europa, la frammentazione tra gli SM rischia di marginalizzare tecnologicamente il continente; tuttavia, la corsa alle TQ è ancora agli inizi, e questo rappresenta un'opportunità per agire con decisione e colmare il divario.

Il Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR) e il Ministero dell'Impresa e del Made in Italy (MIMIT) hanno già messo in atto iniziative per il trasferimento tecnologico attraverso significativi investimenti in centri per il trasferimento tecnologico e Centri di Competenza, tra gli altri. Data la fase iniziale del livello di preparazione tecnologica (TRL) delle TQ, queste iniziative hanno comprensibilmente mantenuto finora un approccio piuttosto destrutturato e intermittente nei confronti dell'industria analizzata. Tuttavia, poiché le TQ continuano a dimostrare uno sviluppo sostanziale e un crescente potenziale di mercato, vi è ora l'opportunità di espandere questi programmi per affrontare il settore quantistico in modo più strutturato.

Inoltre, in base alle consultazioni con le parti interessate, l'attuale allocazione delle risorse infrastrutturali sembra favorire fortemente le iniziative di ricerca pura rispetto ai progetti di trasferimento tecnologico, creando un vuoto nella pipeline di commercializzazione. Appare quindi fondamentale garantire l'accessibilità alle infrastrutture per l'industria quantistica. Questo adattamento strategico dei meccanismi di trasferimento tecnologico esistenti aiuterebbe a massimizzare il valore degli investimenti attuali, sostenendo al contempo il crescente ecosistema italiano delle TQ.

Guardando a queste iniziative, è quindi chiaro che il Pubblico dovrà individuare e incentivare forti partnership con il settore privato, sia per rafforzare lo sviluppo tecnologico, sia per favorire la catena di valore e di fornitura intorno alle TQ. Le iniziative dovranno abbracciare l'intera catena del valore dell'innovazione, dalla ricerca (a partire dalla formazione avanzata attraverso dottorati) allo scale-up e alla diffusione su larga scala delle TQ. Una rete d'innovazione ben strutturata sarà fondamentale per attivare solide collaborazioni e partnership con incubatori, acceleratori e capitali di rischio, con l'obiettivo non solo di far emergere nuove tecnologie, ma anche di fornire finanziamenti adeguati e accesso agli utenti finali o ai fornitori di tecnologie, chiudendo così il cerchio tra innovazione, applicazione pratica e adozione industriale.

L'obiettivo finale è quindi quello di rafforzare l'autonomia strategica dell'Italia e, di riflesso, dell'Europa nel settore digitale, promuovendo lo sviluppo su larga scala delle TQ e favorendo partnership capaci di colmare il divario tra ricerca e investimenti.

Raccomandazioni

1. Ecosistema Collaborativo per l'Innovazione Quantistica

Obiettivo

Favorire la crescita di un ecosistema quantistico solido e dinamico attraverso reti di collaborazione pubblico-private, programmi di incubazione e accesso alle infrastrutture.

Linee di azione

- a) Costruire reti collaborative per l'innovazione, formate da partner pubblici e privati affidabili, attraverso le quali start-up, spin-off e nuove iniziative imprenditoriali possano testare, convalidare e valutare le loro proposte attraverso programmi di incubazione e accelerazione.
- b) Favorire l'accesso regolamentato a infrastrutture chiave condivise per consentire a tutte le tipologie di partner industriali, comprese le PMI, di avvicinarsi al settore delle TQ, sviluppando prodotti e servizi.
- c) Promuovere sinergie tra gli attori pubblici e privati, rafforzando le partnership e puntando all'accesso a grandi finanziamenti, per garantire il successo delle TQ e per sostenere la crescita di un ecosistema competitivo.

2. Strumenti Finanziari e Incentivi per la Crescita

Obiettivo

Creare strumenti economici e finanziari mirati per accelerare la crescita del settore quantistico, facilitando il trasferimento tecnologico e stimolando l'innovazione.

Linee di azione

- a) Creare strumenti finanziari dedicati che aiutino sia attori pubblici che privati nella loro crescita.
- b) Lanciare programmi di premi di incentivazione in collaborazione con fondazioni, istituti di ricerca e partner industriali al fine di stimolare l'innovazione nelle applicazioni delle TQ. Questi premi fungerebbero da catalizzatori per l'identificazione di nuovi casi d'uso, incoraggiando al contempo la formazione di nuove start-up. Questo approccio si è dimostrato efficace in altri settori ad alta tecnologia e potrebbe accelerare in modo significativo l'innovazione quantistica in Italia.
- c) Stabilire un programma di trasferimento tecnologico coordinato che unisca gli sforzi tra le diverse istituzioni coinvolte, garantendo un'allocazione efficiente delle risorse e semplificando lo sviluppo dell'industria. Unendo le competenze e le risorse, un'iniziativa congiunta di questo tipo, consentirebbe di affrontare meglio le sfide e le opportunità uniche del settore quantistico.

3. Sviluppo delle Competenze e Partnership Strategiche

Obiettivo

Potenziare la formazione di competenze tecniche e manageriali necessarie per il funzionamento delle tecnologie quantistiche e rafforzare la collaborazione tra governo e industria per favorire l'adozione e la commercializzazione.

Linee di azione

- a) Impostare e gestire iniziative per lo sviluppo delle competenze e abilità necessarie al funzionamento e alla manutenzione delle TQ (ad esempio, hackathon, sfide tematiche, corsi di formazione e programmi di sviluppo professionale);
- b) Sviluppare partenariati strutturati per l'innovazione tra governo e industria per agevolare l'adozione delle TQ, creando percorsi chiari sia per sostenere sia aziende consolidate che investono nelle applicazioni quantistiche che le startup emergenti che investono nella loro crescita. Tali collaborazioni contribuirebbero a colmare il divario tra ricerca e commercializzazione, promuovendo al contempo un ecosistema quantistico nazionale più solido e dinamico.

3.2.3 Istruzione e formazione della forza lavoro

Le iniziative di formazione attualmente in corso e quelle previste per il prossimo futuro saranno cruciali per lo sviluppo della futura forza lavoro quantistica italiana.

La distribuzione geografica delle comunità accademiche e industriali suggerisce che è possibile promuovere programmi di istruzione/formazione su tutto il territorio nazionale. L'implementazione dovrebbe considerare le risorse disponibili a livello accademico e quelle legate ai piani produttivi che caratterizzano i diversi territori, basandosi anche sulle collaborazioni esistenti con le istituzioni locali (ad esempio le regioni).

1. Educazione di base

Obiettivo

- Favorire l'orientamento dei giovani e portare le TQ nella formazione di base, mediante l'istituzione di percorsi formativi accademici interdisciplinari basati su un approccio trasversale.

Linee di azione

- a) Curricula specifici all'interno della LM-17, che possano coprire in modo trasversale i diversi aspetti teorici, sperimentali e applicativi delle scienze e tecnologie quantistiche;
- b) Nuovi corsi di laurea (ad esempio in "Quantum Engineering") con un forte impianto interdisciplinare rispetto ai corsi di studio STEM tradizionali.

Tali programmi dovrebbero offrire una preparazione avanzata in quei sottocampi specifici che costituiscono l'eccellenza della ricerca condotta sul territorio da accademia, enti di ricerca ed aziende. Questo può essere molto importante per orientare gli studenti nei progetti di stage e di tesi finale, formando così la futura forza lavoro sia in contesti di ricerca che in ambiti industriali.

Inoltre, per favorire la creazione di un ecosistema educativo italiano distribuito sul territorio, si raccomanda l'istituzione di programmi congiunti tra varie università, che permettano agli studenti di beneficiare delle competenze di diversi atenei. Ad esempio, il programma Erasmus italiano, che sostiene la mobilità a breve termine degli studenti verso un'altra università per frequentare corsi specifici sulle TQ, potrebbe rappresentare uno strumento molto flessibile. Un'ulteriore possibile misura consiste in un curriculum dedicato alle Scienze e Tecnologie Quantistiche all'interno del corso magistrale in Fisica (LM-17) attivato congiuntamente tra diverse Università, analogamente al "doppio titolo" organizzato in collaborazione con un'Istituzione straniera, come previsto dalla normativa italiana ed europea.

2. Educazione di terzo livello

Obiettivo

- Potenziare l'istituzione di percorsi formativi di alto livello, che offrano una formazione completa e solida nell'ambito delle TQ, mirata anche ad alimentare l'attuale ricerca fondamentale ponendo i semi per l'innovazione futura e preparando la prossima generazione di ricercatori e professionisti.

Linee di azione

Data la distribuzione geografica delle Università, dei centri di ricerca e delle risorse industriali, nonché la varietà di potenziali direzioni di ricerca in scienze e tecnologie quantistiche, pur mantenendo i programmi specifici legati al contesto accademico ed economico, si raccomanda la creazione di:

- a) Dottorati consortili, mediante consorzi tematici, ad esempio dedicati ai diversi pilastri delle TQ, che sfruttino le competenze complementari di diverse istituzioni accademiche.
- b) Dottorati industriali, che coinvolgano industrie e start-up per la formazione della forza lavoro professionale già impiegata nelle aziende.
- c) Programmi di dottorato interdipartimentali all'interno di un'unica istituzione accademica per la ricerca teorica e applicata su aspetti interdisciplinari delle TQ (ad esempio la già citata "Quantum Engineering").

Tali iniziative dovrebbero essere supportate da schemi dedicati, cofinanziati da MUR, MIMIT, aziende private, enti di ricerca e enti locali. Ulteriore supporto può arrivare da sovvenzioni competitive europee, siano esse individuali o cooperative.

3. Formazione e aggiornamento della forza lavoro per le industrie

Obiettivo

- Incoraggiare nuovi programmi di formazione altamente specifici, rivolti sia a giovani ricercatori che ai professionisti che già lavorano nelle aziende e che hanno bisogno di acquisire competenze altamente specializzate.

Linee di azione

- a) Istituzione di corsi di Master di secondo livello, su tematiche specialistiche in stretta collaborazione con i centri di ricerca e le aziende locali, dove i partecipanti dovrebbero svolgere stage⁸.

Queste attività possono essere rivolte sia ai giovani ricercatori che ai professionisti già attivi nel settore. Richiedono programmi specifici di formazione e aggiornamento altamente qualificati, modulari e flessibili, per adattarsi rapidamente a requisiti mutevoli con l'evoluzione e la maturazione delle TQ.

Per l'attuazione di tali programmi è fondamentale il sostegno finanziario esterno, che può provenire sia dal settore privato sia da fondi regionali.

Osservazioni finali

Per un adeguato sviluppo delle competenze nel campo delle scienze e tecnologie quantistiche, essenziale per favorire l'avanzamento del campo, è indispensabile un forte investimento nella formazione dei ricercatori e dei lavoratori, sia all'interno delle università e centri di ricerca sia nel contesto industriale. Appare opportuno quindi ampliare l'offerta formativa universitaria e post-universitaria con corsi mirati, intensificarne il carattere interdisciplinare, rafforzare i legami tra atenei, enti di ricerca e imprese e, infine, sistematizzare le informazioni disponibili sulle offerte educative e formative. In questo contesto, la presente strategia può costituire una valida opportunità e offrire utili strumenti per un'efficace pianificazione e coordinamento delle varie iniziative, creando un sistema integrato che favorisca la crescita del settore.

3.2.4 Standardizzazione e benchmarking

A: Standardizzazione

La standardizzazione delle tecnologie quantistiche è essenziale per strutturare e accelerare la loro adozione sul mercato, garantendo **affidabilità, coerenza e interoperabilità** con infrastrutture, sistemi e componenti esistenti. La standardizzazione va oltre i requisiti di certificazione per comprendere aspetti fondamentali come vocabolario, terminologia, parametri di qualità, modelli, protocolli di scambio e altro ancora. Data la notevole influenza di altri Paesi sugli organismi di standardizzazione internazionali, è fondamentale che l'Europa adotti un approccio proattivo nello sviluppo di standard e parametri propri, prevenendo le potenziali insidie dovute al doversi conformare a standard stranieri che potrebbero svantaggiare la TQ europee.

Lo sviluppo di standard a livello europeo facilita inoltre la creazione di una voce europea unificata e forte nelle discussioni internazionali, superando l'approccio frammentario che potrebbe emergere se i singoli SM dell'UE tentassero di stabilire il consenso in modo indipendente. All'interno dello Spazio economico europeo, i forti legami sociali, culturali,

scientifici ed economici consentono una più rapida creazione del consenso rispetto al livello internazionale.

Una componente fondamentale di una standardizzazione efficace è la definizione di parametri di riferimento, indispensabili per fornire misure oggettive nella valutazione dei progressi, prestazioni e capacità delle TQ. Tali parametri consentono agli utenti di prendere decisioni informate quando valutano le varie soluzioni quantistiche a disposizione. Accademia e industria identificano questi parametri, insieme alle infrastrutture di misura, come aspetti prioritari della standardizzazione.

Progetti come Qu-Test, finanziato dall'UE, rispondono a tali esigenze sviluppando banchi di prova federati per le TQ, garantendo alle aziende strutture di misura adeguate per supportare il benchmarking e la conformità agli standard. Inoltre, nel marzo 2023, gli enti di normazione europei CEN e CENELEC hanno istituito un nuovo comitato congiunto, il JTC22, sulle TQ. Questo comitato si basa sul lavoro del Focus Group on Quantum Technologies (FGTQ), che ha presentato una roadmap sulla standardizzazione delle TQ in Europa all'inizio del 2023. La roadmap del FGTQ è la prima del suo genere a livello globale e identifica le esigenze di standardizzazione in tutti gli aspetti delle TQ, fornendone una classificazione completa ed evidenziandone l'interdipendenza degli sforzi di standardizzazione in corso e futuri. La roadmap è concepita come un documento in evoluzione, che riflette sia i progressi tecnologici che i progressi nella standardizzazione.

Il JTC22 ha il compito di standardizzare le tecnologie quantistiche, comprese le tecnologie abilitanti, i sottosistemi, le piattaforme e le applicazioni in settori quali la metrologia quantistica, il rilevamento, l'imaging avanzato, il calcolo quantistico, la simulazione, la comunicazione e la crittografia. Il comitato è organizzato in quattro gruppi di lavoro, uno incentrato sulla strategia e tre su settori specifici. Tra i membri figurano esperti dei produttori di tecnologie quantistiche e del mondo accademico di tutta Europa. Il JTC22 lavorerà anche per identificare ed eventualmente adottare standard internazionali pertinenti di organizzazioni come ISO, IEC e ITU-T, assicurando che il consenso europeo sia rappresentato nelle discussioni sulla standardizzazione internazionale.

Inoltre, diversi organismi nazionali di standardizzazione (National Standardization Body, NSB) hanno istituito comitati speculari al JTC22, consentendo loro di valutare e partecipare agli sforzi di standardizzazione a livello europeo e internazionale. L'ISO-IEC JTC1, un comitato congiunto per le tecnologie digitali, ha già istituito un gruppo di lavoro sull'informatica quantistica e altre organizzazioni, come l'IEEE, hanno iniziato a lavorare sulle tecnologie quantistiche. L'Europa deve garantire che il suo consenso sulle tecnologie quantistiche, sviluppato da FGTQ, JTC22 ed ETSI, sia rappresentato in queste discussioni internazionali.

Per contribuire efficacemente agli sforzi di standardizzazione, è fondamentale che gli esperti di tutte le parti interessate, compresi i produttori, le start-up, le università e i programmi europei, partecipino attivamente ai comitati pertinenti. Una sfida importante nei prossimi anni sarà quella di garantire una partecipazione sufficiente di esperti nei comitati specchio degli ONN, in particolare nel comitato CEN-CENELEC JTC22.

Raccomandazioni

1. Coordinamento e collaborazione

Obiettivo

Promuovere una strategia efficace e inclusiva per la standardizzazione delle tecnologie quantistiche, incentivando la partecipazione dell'industria e della ricerca, sviluppando strumenti di supporto accessibili e razionalizzando il coordinamento a livello europeo per evitare duplicazioni e massimizzare l'impatto.

Linee di azione

- a) **Incoraggiare la partecipazione:** Stabilire incentivi per coinvolgere l'industria nazionale, i rappresentanti accademici e gli esperti di quantistica nel JTC22 e in altre organizzazioni di sviluppo degli standard (SDO). Promuovere i contributi dei borsisti di EuroHPC ed EuroQCI alle attività di sviluppo degli standard del JTC22.
- b) **Sviluppare una guida agli standard accessibile:** Supportare il gruppo strategico JTC22 nella creazione di un documento dinamico e di facile utilizzo che illustri gli standard esistenti ed emergenti e fornisca informazioni aggiornate sulle attività di standardizzazione quantistica globale.
- c) **Razionalizzare il coordinamento:** Assegnare al gruppo strategico del JTC22 il compito di supervisionare e unificare le iniziative di standardizzazione della tecnologia quantistica a livello europeo, evitando duplicazioni. Incoraggiare altre iniziative di standardizzazione ad allinearsi e contribuire alla strategia del JTC22.

B. Benchmarking

I benchmark nelle TQ servono come riferimenti accettati che forniscono misure oggettive per valutare le prestazioni e le capacità dei dispositivi in fase di test. Questi benchmark sono fondamentali per stimolare la collaborazione, la concorrenza e gli investimenti nelle TQ.

Il benchmarking nel campo del calcolo quantistico, della simulazione quantistica, della sensoristica e metrologia quantistica, e della comunicazione quantistica implica lo sviluppo di strumenti di misurazione specifici che supportino l'intera catena del valore tecnologico. Ciò include la progettazione tecnologica, la definizione di casi d'uso, il monitoraggio dei programmi di ricerca, la regolamentazione, la strutturazione del mercato e l'implementazione negli appalti pubblici.

La necessità di disporre di parametri di riferimento per le TQ è particolarmente pressante a causa della natura emergente del settore, della diversità delle tecnologie in fase di esplorazione e della forte concorrenza internazionale. Test e valutazioni affidabili ed indipendenti sono essenziali per verificare le prestazioni e promuovere una comprensione condivisa delle capacità tecnologiche. È necessario progettare benchmark oggettivi e affidabili che tengano conto delle varie piattaforme hardware, delle loro proprietà fisiche, delle applicazioni, dei livelli di preparazione e della potenziale rapida evoluzione.

Attualmente i benchmark sono considerati a diversi livelli, seguendo approcci complementari. A livello di componenti hardware, essi si concentrano sulla caratterizzazione delle proprietà fisiche fondamentali, particolarmente rilevanti per i produttori di dispositivi. A livello di sistema i benchmark considerano le prestazioni e capacità considerando il sistema

quantistico nel suo complesso, mentre a livello di applicazione, i benchmark risultano particolarmente interessanti per gli utenti finali, poiché consentono di valutare i vantaggi pratici delle tecnologie quantistiche in contesti reali.

Sono state lanciate diverse iniziative internazionali per sviluppare benchmark per il calcolo e la simulazione quantistica, tra cui le iniziative di IBM (Quantum Volume, CLOPS), Super.tech (SupermarQ), QED-C, US DARPA, US DOE (Sandia National Labs) e UC Berkeley.

In Europa sono state avviate diverse iniziative di benchmarking, principalmente orientate alle applicazioni, in vari SM. Il progetto Horizon Europe Qu-Test, che riunisce Organizzazioni di Ricerca e Tecnologia (Research and Technology Organization, RTO) e Istituti nazionali di metrologia, sta lavorando alla caratterizzazione e al collaudo armonizzati di componenti e sottosistemi quantistici. Sebbene la maggior parte delle attuali iniziative di benchmarking orientate alle applicazioni siano nazionali, vi è una forte volontà di collaborazione tra i progetti, per garantire la complementarità ed evitare la duplicazione degli sforzi.

Raccomandazioni

1. Coordinamento e collaborazione

Obiettivo

Creare un ecosistema europeo strutturato e collaborativo per il benchmarking delle tecnologie quantistiche, favorendo il coordinamento tra le iniziative e l'integrazione tra ricerca e industria.

Linee di azione

- a) Creare un forum unificato: Promuovere la creazione di un unico forum di coordinamento per le iniziative europee di benchmarking.
- b) Promuovere la collaborazione: Incoraggiare l'interazione e lo scambio tra le attività di standardizzazione e benchmarking.

2. Strumenti e infrastrutture

Obiettivo

Fornire risorse e accesso a infrastrutture chiave per sviluppare metodologie di benchmarking affidabili, quantitative e oggettive a livello europeo.

Linee di azione

- a) Definire un programma europeo di R&S: Sviluppare un programma a livello europeo per sostenere la ricerca e lo sviluppo con un approccio interdisciplinare, integrando le università e l'industria a fini di benchmarking.
- b) Consentire l'accesso alle macchine EuroHPC: Facilitare l'accesso alle macchine EuroHPC per lo sviluppo e il collaudo dei benchmark, per sostenere la creazione di benchmark quantitativi e oggettivi.

3.2.5 Comunicazione e sensibilizzazione

Un potenziale ostacolo per sostenere gli sforzi dell'Italia nello sviluppo delle TQ è la mancanza di interesse e consapevolezza da parte della società. Il sostegno pubblico è fondamentale per continuare a finanziare la ricerca quantistica, reclutare forza lavoro e promuovere l'adozione delle TQ emergenti.

In Italia si sono già svolte numerose iniziative di sensibilizzazione, tra cui l'evento pubblico "Italian Quantum Weeks", ospitato in numerose città italiane attivamente impegnate nella ricerca nelle TQ. Analogamente, un intenso programma di sensibilizzazione è stato condotto dal Partenariato Esteso NQSTI. Tuttavia, per garantire un impatto a lungo termine, queste misure dovrebbero essere ampliate nei prossimi anni, con l'obiettivo di generare un'alfabetizzazione quantistica diffusa.

La consapevolezza delle TQ è fondamentale per il futuro dell'istruzione e della formazione. È necessaria non solo per stimolare l'interesse dei futuri professionisti nel settore, ma anche per informare e orientare i decisori politici e favorire l'accettazione sociale delle tecnologie emergenti. Sebbene i programmi di formazione avanzata possano soddisfare le esigenze immediate, la futura forza lavoro nelle TQ sarà costituita dagli attuali studenti delle scuole superiori. Pertanto, esporre gli studenti alle TQ durante il loro percorso educativo è essenziale per ispirare le future generazioni di esperti. È quindi necessario un impegno coordinato per coinvolgere insegnanti e scuole, offrendo loro strumenti e risorse per integrare i fondamenti delle tecnologie quantistiche nei programmi scolastici.

Parallelamente, la crescente integrazione delle TQ nelle imprese, crea la domanda di una forza lavoro specializzata. Sebbene la crescita iniziale sia sostenuta dai primi investitori e dagli early adopters, l'adozione su scala più ampia dipende dalla velocità con cui la consapevolezza dei percorsi di monetizzazione si diffonderà in tutti i settori industriali. Linee guida trasparenti e basate sulla ricerca, insieme a programmi di formazione per i decisori aziendali, saranno fondamentali per aiutare le organizzazioni a valutare, valorizzare e adottare le TQ. Le aziende che scelgono di adottare per prime le TQ svolgono un ruolo fondamentale nella maturazione dell'ecosistema industriale e della catena di sviluppo. È quindi fondamentale riconoscere e sostenere il loro contributo, fornendo incentivi e risorse per accelerare la maturazione del settore e incoraggiare ulteriori investimenti.

Raccomandazioni:

1. Sensibilizzazione diffusa e ampio accesso alle TQ

Obiettivo: Generare un'alfabetizzazione quantistica diffusa nella società e garantire ampio accesso al campo delle TQ, considerando fattori quali l'uguaglianza di genere e la diversità. Ispirare i giovani, aumentando la loro consapevolezza delle potenzialità dell'impatto sociale delle TQ.

Linee d'azione:

- a. Consolidare ed ampliare misure di sensibilizzazione per il grande pubblico, promuovendo eventi di divulgazione che coinvolgano la società nel suo complesso.
- b. Sostenere l'istruzione e la formazione con misure di supporto dedicate per contrastare il fenomeno dell'abbandono della carriera di ricerca da parte delle

donne, piuttosto comune nelle discipline STEM, che aumenta il divario di genere in ogni fase della carriera (il cosiddetto "leaky pipeline").

- c. Predisporre l'esposizione dei giovani ai principi di base delle TQ già a partire dalla scuola secondaria. In questo contesto sono necessari anche sforzi coordinati per far conoscere queste tecnologie agli insegnanti e alle scuole.

2. Consapevolezza nei decisori aziendali e nelle industrie

Obiettivo: Favorire l'integrazione delle TQ nelle aziende in modo da avere una adozione sempre più ampia nei vari settori industriali interessati e maturare un ecosistema globale.

Linee d'azione:

Promuovere programmi informativi dedicati alle TQ rivolti ai decisori aziendali.

3.2.6 Industria

1. Favorire la creazione di meccanismi di confronto permanente degli attori dell'ecosistema italiano sulle TQ

Obiettivo

Stimolare il confronto continuo tra istituzioni, decisori politici, esperti, referenti dell'accademia e dell'industria per definire le priorità d'investimento e coordinare i lavori nonchè potenziare la complementarità tra iniziative a livello locale e nazionale.

Linee di azione

- a) Istituire un tavolo di confronto permanente che coinvolga istituzioni, decisori politici, esperti, fondi di venture capital, referenti dell'accademia e dell'industria. Questo tavolo, attraverso incontri periodici, avrebbe l'obiettivo di garantire una continuità strategica nel monitoraggio dell'ecosistema, nell'attuazione dei relativi piani d'azione e nella raccolta delle esigenze da parte dell'industria.

2. Finanziare la creazione di un ecosistema pubblico-privato strutturato e maturo

Obiettivo

Stimolare la collaborazione tra gli attori pubblici e privati presenti sul territorio (centri di ricerca, università e imprese) e creare una rete di lavoro basata su obiettivi di ricerca e sviluppo coordinati con lo scopo di coinvolgere sia le eccellenze nazionali sia le aziende internazionali presenti sul territorio.

Linee di azione

- a) Garantire continuità alle iniziative esistenti adottando una prospettiva strategica di medio-lungo termine (5-7 anni), favorendo logiche di collaborazione pubblico-privata e promuovendo azioni che incentivino l'investimento privato.

3. Promuovere l'industrializzazione e l'imprenditorialità sulle tecnologie quantistiche a livello nazionale

Obiettivo

Favorire la creazione di una filiera nazionale delle tecnologie quantistiche in grado di (i) promuovere la nascita di startup italiane competitive, anche in seno alla ricerca accademica, (ii) valorizzare competenze e tecnologie già presenti sul territorio e (iii) far leva su fornitori internazionali laddove necessario.

Linee di azione

- a) Sviluppare, in collaborazione con l'industria, programmi specifici di accelerazione che permettano di portare le tecnologie sul mercato, prendendo spunto anche da prassi sviluppate a livello internazionale (e.g. Challenge prizes nel Regno Unito, dove si prevede lo stanziamento di fondi volti a incentivare lo sviluppo di soluzioni tecnologiche avanzate a supporto di specifici problemi). Questi programmi dovrebbero essere rivolti all'intera value chain e avere una specifica interconnessione con i domini industriali.
- b) Creare occasioni di match making tra fondi di venture capital o di corporate venture capital con il tessuto di startup nazionali, favorendo anche la collaborazione tra iniziative istituzionali e venture capital privati.
- c) Relazionare la strategia industriale per le tecnologie quantistiche con quella relativa ad altre filiere critiche a cui quest'ultima è fortemente correlata, come quella dell'Intelligenza Artificiale.

4. Garantire l'accesso a tecnologie e infrastrutture quantistiche critiche al sistema paese

Obiettivo

Garantire l'accesso diretto a infrastrutture critiche per la competitività e la sicurezza nazionale, in particolare prodotti finiti, come risorse di calcolo quantistico e reti di comunicazione quantistiche, e infrastrutture di produzione, ovvero laboratori specializzati di ricerca, impianti industriali e fonderie per lo sviluppo delle componenti abilitanti.

Linee di azione

a) Nel breve termine:

- realizzare una mappatura delle infrastrutture industriali e dei laboratori specializzati presenti sul territorio con l'obiettivo di definire piani di finanziamento anche di lungo termine
- implementare politiche di manutenzione e di accesso per garantire un pieno sfruttamento del sistema italiano delle strutture esistenti oltre l'orizzonte temporale del PNRR (già dalla seconda metà del 2025).

- garantire l'accesso alle migliori infrastrutture tecnologiche quantistiche a livello europeo, facendo leva anche sull'utilizzo di servizi Cloud, per accelerare la sperimentazione e promuovere lo sviluppo di soluzioni software innovative. Questo si potrebbe realizzare sviluppando programmi dedicati volti a ridurre ostacoli finanziari e burocratici e migliorare il coordinamento tra le infrastrutture italiane e quelle europee, massimizzando le sinergie.
- b) Nel medio termine, analizzare le esigenze degli stakeholder industriali per identificare necessità industriali specifiche e aggiornare le strutture esistenti per colmare eventuali lacune;
- c) Nel lungo termine, investire nello sviluppo di nuove infrastrutture quantistiche a livello nazionale, riducendo la dipendenza da infrastrutture critiche estere e garantendo autonomia tecnologica strategica.
- d) Coordinare gli investimenti italiani in infrastrutture con quelli realizzati dalle istituzioni europee, anche rafforzando le partnership con gli altri Stati membri dell'UE, garantendo una presenza attiva italiana nelle iniziative strategiche europee

5. Sviluppare una forza lavoro qualificata e creare un mercato attrattivo per talenti nazionali ed esteri

Obiettivo

Sviluppare talenti sulle tecnologie quantistiche a livello nazionale, rafforzando la filiera industriale del settore e creando un mercato del lavoro attrattivo.

Linee di azione

- a) In coordinamento tra MIMIT e Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR), finanziare dottorati e post-doc in collaborazione pubblico-privato lavorando con i domini industriali più rilevanti.
- b) In coordinamento con il MUR, favorire l'avvicinamento tra mondo imprenditoriale e accademico, anche con l'inserimento di corsi e programmi relativi all'imprenditorialità e al trasferimento tecnologico nei percorsi di formazione sulle tecnologie quantistiche. Favorire la valorizzazione delle esperienze di successo attraverso testimonianze e incontri tra imprenditori e accademia.
- c) Definire incentivi per le imprese per attrarre e trattenere talenti in ambito deep tech.

6. Definire dei programmi di disseminazione di conoscenza e aumento della consapevolezza su opportunità e rischi nelle imprese utilizzatrici

Obiettivo

Garantire che le imprese italiane potenziali utilizzatrici delle tecnologie quantistiche ne conoscano opportunità e rischi per mantenere il tessuto economico competitivo.

Linee di azione

- a) Creare dei programmi di disseminazione ed eventi che aumentino la consapevolezza delle opportunità e dei rischi legati alle tecnologie quantistiche, in particolare in merito alle possibili risposte legate alla cybersicurezza.
- b) Monitorare la Quantum Readiness delle imprese italiane attraverso specifiche ricerche di mercato e definire dei piani di azione di lungo termine per garantire uno sviluppo sostenibile del settore.
- c) Lavorare in coordinamento con le istituzioni europee per definire standard tecnologici e certificazioni delle tecnologie quantistiche, in modo da favorirne l'adozione nelle aziende utilizzatrici.

7. Promuovere la cooperazione internazionale nell'ambito delle politiche industriali e di ricerca applicata sulle tecnologie quantistiche

Obiettivo

Garantire la competitività europea nell'ecosistema internazionale delle tecnologie quantistiche e valorizzare gli sforzi nazionali all'interno di una politica sovranazionale.

Linee di azione

- a) Monitoraggio e aggiornamento strategia nazionale da parte degli istituti di governance di cui all'intervento 1, politica a).
- b) Accordi bilaterali per uno sviluppo sinergico del settore, per la normativa e per la standardizzazione tecnologica.
- c) Garantire una rappresentanza italiana nei tavoli decisionali sovranazionali.

4. GOVERNANCE, INCLUSI SVILUPPI LEGISLATIVI

Quadro di sintesi

Come emerso dall'analisi condotta sin qui, l'Italia deve valorizzare le competenze scientifiche di elevato profilo presenti nel Paese al fine di consolidarne il ruolo di *leadership* europea e stabilire una propria capacità indipendente per lo sviluppo, la produzione e la distribuzione delle TQ. Questo processo va guidato anche dai valori fondamentali della sicurezza nazionale, al fine di creare un ecosistema tecnologico virtuoso e resiliente, capace di fronteggiare i rischi emergenti e di garantire la salvaguardia degli interessi strategici del Paese.

Per raggiungere questi obiettivi, è necessario incentivare la ricerca scientifica, di base ed applicata, e colmare l'attuale divario con la produzione su larga scala, realizzando così un

ecosistema capace di dare vita ad un ampio ventaglio di applicazioni scientifiche ed industriali. È altresì essenziale che l'ecosistema sia strutturato per rafforzare la resilienza tecnologica, contribuendo alla sicurezza nazionale e collettiva.

Al fine di raggiungere gli obiettivi di ricerca e innovazione delineati nella Strategia e favorire così il rafforzamento del ruolo italiano nello sviluppo delle TQ a livello nazionale, europeo e mondiale, le raccomandazioni settoriali devono tradursi in azioni ed opportunità all'interno di un ecosistema dell'innovazione ben strutturato, a garanzia del coinvolgimento e coordinamento di tutti gli attori interessati.

Emerge infatti con chiarezza a livello internazionale l'importanza di coinvolgere, nella governance dello sviluppo delle TQ, tutti gli stakeholder considerati rilevanti lungo l'intera catena del valore della ricerca e dell'industria, che di seguito si elencano:

- **Governo, istituzioni nazionali e regioni:** sono i principali stakeholder in qualsiasi programma di governance, per il ruolo di guida regolatorio e di policy-making a livello nazionale ed internazionale. In particolare:
- Il Governo, oltre ad elaborare una condivisa Strategia nazionale, svolge un ruolo fondamentale nell'identificazione delle aree di finanziamento dell'innovazione prioritarie per il Paese, nell'indirizzare le sfide di policy e nel facilitare la nascita e lo sviluppo di ecosistemi locali;
- Il Comparto Difesa e Sicurezza assicura che le tecnologie quantistiche rispondano alle esigenze strategiche di sicurezza nazionale;
- Le Regioni assicurano il coordinamento e lo sviluppo degli ecosistemi territoriali.
- **Università ed enti di ricerca:** come già sottolineato nei precedenti paragrafi, lo sviluppo delle TQ dipende in larga parte dalle attività di ricerca avanzata e formazione condotte da Università ed Enti Pubblici di Ricerca (EPR), e dal relativo finanziamento, pubblico e privato.
- **Aziende ed enti privati:** svolgono un ruolo importante nello sviluppo, l'innovazione, e la commercializzazione delle TQ. Le aziende tecnologiche, comprese le grandi imprese, sono spesso motori dell'innovazione, ad esempio nel campo dell'hardware e del software quantistico. Parallelamente, PMI, start-up e spin-off giocano un ruolo importante nel tradurre le scoperte accademiche in prodotti e servizi commerciali.
- **Individui, consumatori, e società nel suo insieme:** Gli individui, in qualità di futuri professionisti e ricercatori, sono cruciali per alimentare il sistema delle competenze necessarie allo sviluppo del settore; I consumatori favoriscono l'accettazione e l'adozione delle tecnologie emergenti. La fiducia del pubblico nei confronti delle TQ, alimentata dalla trasparenza e dalla consapevolezza dei benefici e dei rischi associati, è essenziale per creare mercati sostenibili e dinamici. Infine, la società nel suo complesso beneficia delle applicazioni delle tecnologie quantistiche, ma ne condivide anche le responsabilità etiche, sociali e ambientali.

Per istituire una forma stabile di coordinamento tra tutti gli stakeholder è necessario ripensare i tradizionali meccanismi di collaborazione interistituzionale, al fine di creare un

ecosistema che sia in grado di tradurre rapidamente obiettivi e traguardi della Strategia Nazionale in azioni concrete. Come detto, tale collaborazione deve garantire un'attenzione particolare agli aspetti di sicurezza, al fine di prevenire usi impropri delle tecnologie e, al contempo, garantire un approccio sicuro e responsabile al progresso tecnologico.

Le iniziative avviate con i progetti PNRR rappresentano un punto di riferimento per la costruzione di questo ecosistema coordinato. In particolare, il Partenariato Esteso NQSTI, il National Research Centre for High Performance Computing, Big Data and Quantum Computing (ICSC) – con lo spoke 10 dedicato al Quantum Computing – e l'Infrastruttura di Ricerca I-PHOQS hanno posto solide basi per nuove forme di collaborazione. Questi progetti hanno permesso di raggiungere elevati livelli di ricerca e sviluppo tecnologico, mettendo in rete in modo stabile università, Enti Pubblici di Ricerca (EPR), imprese e attori territoriali, creando così un'infrastruttura collaborativa senza precedenti.

Quanto già realizzato deve ora essere consolidato e ulteriormente sviluppato, valorizzando così il progresso raggiunto grazie all'ingente investimento del PNRR nel settore, e garantendo, con un approccio di lungo termine, la sostenibilità e la crescita futura delle TQ.

Come dimostra la mappatura condotta ai fini della stesura della Strategia nazionale, questo settore emergente richiede forti sinergie tra gli stakeholder con un duplice obiettivo:

- In primo luogo, coordinare le iniziative multilivello che coinvolgono la ricerca, l'industria ed il settore Difesa, partendo dal livello locale per arrivare fino a quello internazionale, e favorendo i meccanismi di trasferimento tecnologico. In secondo luogo, creare una forte collaborazione tra stakeholder per identificare le aree strategiche di finanziamento e coordinarle con un approccio basato sul technology foresight, al fine di rafforzare l'impatto degli investimenti pubblici e privati sull'ecosistema, massimizzandone i risultati e favorendo l'allineamento delle priorità strategiche.

Il coordinamento e la collaborazione rappresentano i presupposti fondamentali per garantire il coinvolgimento attivo di tutti gli attori interessati al processo decisionale. Al tempo stesso, questi presupposti consentono di strutturare l'attuazione dei progetti e programmi in modo coerente con le esigenze di tutti i partecipanti. Pertanto, incoraggiare la collaborazione tra istituti di ricerca, mondo accademico, industria ed enti governativi per favorire lo scambio di strategie, risorse e conoscenze sarà fondamentale per garantire il successo e la sostenibilità dell'ecosistema.

Principi

Quanto precede può essere tradotto nei seguenti principi guida per la costruzione di un ecosistema dell'innovazione sulle tecnologie quantistiche guidato da una governance condivisa:

- **Coinvolgimento completo degli stakeholder:** identificazione di tutti gli stakeholder e analisi approfondita dei loro ruoli, interessi, esigenze e responsabilità;
- **Integrazione della sicurezza nazionale e gestione proattiva del rischio:** armonizzazione dello sviluppo delle tecnologie quantistiche con gli aspetti di sicurezza nazionale, identificando e valutando i rischi connessi a potenziali usi impropri di tali tecnologie e adottando misure per la salvaguardia degli interessi nazionali;

- **Processo decisionale inclusivo:** equilibrio tra processi top-down e bottom-up per facilitare un processo decisionale inclusivo;
- **Meccanismi di finanziamento chiari:** pianificazione e differenziazione degli strumenti di finanziamento, rendendoli veloci e flessibili;
- **Struttura ottimale:** bilanciamento dei compiti assegnati alle strutture di governance a vari livelli;
- **Equilibrio di genere:** valorizzazione della parità di genere, garantendo una adeguata presenza femminile in tutti gli organi decisionali e comitati di selezione e l'elaborazione di misure che agevolino un ambiente favorevole alla valorizzazione del talento e al benessere di tutti e tutte.
- **Coordinamento interministeriale:** valorizzazione dell'inclusione di rappresentanti delle diverse amministrazioni coinvolte (Ministero dell'Università e della Ricerca, Ministero per le Imprese e Made in Italy, Ministero della Difesa, Dipartimento per la Transizione Digitale della Presidenza del Consiglio dei Ministri e Agenzia Nazionale per la Cybersicurezza) al fine di favorire sia un dialogo costruttivo tra le istituzioni e con gli stakeholder, sia l'individuazione di un centro unico di rappresentanza dei diversi interessi degli stakeholder italiani nei consessi europei;
- **Processi snelli e agilità decisionale:** bilanciamento del coinvolgimento degli stakeholder e dell'agilità decisionale ed attuativa. Le caratteristiche del settore e la rapida evoluzione tecnologica richiedono sistemi che non ingessino le procedure;
- **Valorizzazione delle strutture esistenti:** facilitare il più possibile la costruzione di un solido ecosistema che consenta di coordinare in modo integrato il perseguimento degli obiettivi fissati dalla Strategia. L'identificazione e il coinvolgimento di strutture esistenti con competenze specifiche nel settore appaiono di particolare importanza: le fondazioni già costituite e le organizzazioni coinvolte nelle attività PNRR in tema di scienze e tecnologie quantistiche possono, infatti, fornire un contributo prezioso per assicurare rilevanza nelle decisioni strategiche e nell'attuazione.

Raccomandazioni

Per raggiungere gli obiettivi fissati dalla Strategia, l'Italia deve dunque creare un ambiente condiviso per attingere alle competenze di tutti gli stakeholder, lungo l'intera catena del valore dell'innovazione: dai ricercatori alle aziende e agli utenti finali, passando per le amministrazioni pubbliche e i decisori politici.

In linea con quanto si sta delineando nel contesto internazionale, anche l'Italia deve dunque dotarsi di un luogo di confronto strategico che velocizzi i processi decisionali senza appesantirli, eviti le frammentazioni, mantenga nel lungo periodo una stabilità organizzativa propedeutica al monitoraggio del conseguimento degli obiettivi e sia in grado di assicurare il coordinamento multilivello tra gli stakeholders.

Una efficiente struttura di governance dovrebbe avere la seguente missione:

- Coordinare le politiche pubbliche nel settore, anche alla luce delle iniziative europee, al fine di sviluppare le capacità tecnologiche nazionali attraverso il sostegno alla ricerca e all'innovazione;
- Assicurare il coordinamento con le strutture e le iniziative esistenti;
- Monitorare l'attuazione della strategia nazionale e predisporre un aggiornamento con cadenza almeno triennale;
- Assicurare che la ricerca e l'innovazione siano orientate anche a sostenere e rafforzare la sicurezza nazionale, contribuendo all'individuazione, valutazione e gestione dei rischi emergenti;
- Fornire una piattaforma per discussioni e negoziati su finanziamenti e investimenti per rafforzare le attività di ricerca, sviluppo e commercializzazione nel settore delle tecnologie quantistiche;
- Garantire una distribuzione equa, trasparente e celere dei finanziamenti pubblici, anche tenuto conto dell'importanza di interventi ed azioni rapidi ed efficaci, volti a ridurre velocemente il gap con i paesi pari.
- Promuovere la competitività industriale;
- Salvaguardare i diritti di proprietà intellettuale;
- Garantire una condotta responsabile e sicura della ricerca e dello sviluppo della scienza e della tecnologia quantistica;
- Garantire l'equilibrio di genere e sostenere le politiche a favore della diversità e della inclusione.
- Sostenere e promuovere la formazione e la mobilità di una forza lavoro diversificata e qualificata in Italia e nell'UE, per stimolare l'innovazione e la crescita, anche attraendo e trattenendo i talenti, nonché promuovendo l'istruzione e la formazione nella scienza e tecnologie quantistiche.

Al fine di consentire il rapido ed efficace avvio dell'attuazione della Strategia Nazionale sulle tecnologie quantistiche in un contesto tecnologico e geopolitico in rapida evoluzione, si suggerisce di procedere per fasi, come segue:

- a) **In una prima fase**, per bilanciare il coinvolgimento degli stakeholder con l'esigenza di agilità decisionale ed attuativa, si propone di istituire un “**Comitato permanente per le Tecnologie Quantistiche**”, con le seguenti caratteristiche:
 - **Composizione:** l'inclusione di rappresentanti di MIMIT, MUR, Ministero della Difesa, DTD e ACN potrebbe favorire un dialogo costruttivo tra le diverse istituzioni coinvolte. Inoltre, al fine di supportarne le decisioni strategiche, faranno parte del Comitato esperti espressione della comunità scientifica ed attori rilevanti sul piano imprenditoriale.
 - **Collocazione:** la collocazione del Comitato presso il MUR appare strategicamente opportuna in quanto il ministero, grazie al suo ruolo centrale nell'ecosistema della ricerca nazionale e al coordinamento di iniziative PNRR, può garantire la necessaria

continuità tra ricerca fondamentale e sviluppo tecnologico, pur assicurando il coinvolgimento degli altri ministeri.

Tale struttura bilancerebbe rapidità e semplicità procedurale con coordinamento efficace in fase di attuazione. Infine, il Comitato proposto sembra essere adatto a portare avanti la missione istituzionale per lo sviluppo delle TQ.

b) **In una seconda fase**, al fine di consolidare la struttura di governance e dare maggiore stabilità di lungo periodo al coordinamento tra gli stakeholders, si potrebbe istituire un modello di governance mutuato dal Polo Nazionale della dimensione Subacquea, concepito come un innovativo modello di "Sistema Paese", volto ad aggregare le eccellenze italiane - pubbliche e private - coinvolte nello sviluppo scientifico, nella formazione e nell'innovazione tecnologica nel settore e organizzato secondo un'articolazione multilivello che preveda:

- ▶ **Un comitato di livello politico:** responsabile per la definizione degli indirizzi strategici per l'attuazione della Strategia Nazionale.
- ▶ **Un Comitato di Direzione Strategica:** composto da rappresentanti istituzionali, accademici e industriali, per garantire la supervisione e la coerenza con gli obiettivi nazionali.
- ▶ **Una Struttura Operativa:** per la gestione amministrativa degli eventuali bandi, l'erogazione di eventuali finanziamenti e la realizzazione di attività di trasferimento tecnologico.

Il Polo Nazionale della Quantistica (PNQ), così composto, avrebbe l'obiettivo di favorire l'attrazione di un numero significativo di investimenti, valorizzare la ricerca e la formazione e creare nuove opportunità occupazionali, realizzando il potenziale della Strategia nazionale.

c) **In una terza fase o contemporaneamente alla seconda fase**, il modello di governance potrebbe essere integrato da una specifica **Fondazione Quantum – da individuarsi tra le fondazioni attualmente esistenti nel settore delle tecnologie, o di nuova costituzione** – avente quale missione istituzionale quella di facilitare la convergenza tra investimenti pubblici e investimenti privati, a rafforzamento dell'ecosistema istituito.

Il Sistema Paese è ad oggi presente in molti consessi internazionali, in primis a livello europeo ma non solo, in cui procede in maniera spedita nella definizione di politiche condivise e nella predisposizione di attività e investimenti congiunti a supporto sia della comunità scientifica che imprenditoriale in un'ottica di autonomia strategica e sovranità tecnologica. La predisposizione di una strategia nazionale per le tecnologie quantistiche, così come la definizione di una governance che permetta di coordinare in modo stabile e duraturo l'attività dei diversi stakeholder coinvolti permetterà all'Italia di agire in maniera ancora più forte e proattiva sia a livello bilaterale che multilaterale.