

<b>Università</b>	Politecnico di TORINO
<b>Classe</b>	LM-29 - Ingegneria elettronica
<b>Nome del corso in italiano</b>	Ingegneria Quantistica <i>adeguamento di:</i> <i>Ingegneria Quantistica</i> ( <a href="#">1421547</a> )
<b>Nome del corso in inglese</b>	Quantum Engineering
<b>Lingua in cui si tiene il corso</b>	inglese
<b>Codice interno all'ateneo del corso</b>	32137
<b>Data di approvazione della struttura didattica</b>	07/02/2023
<b>Data di approvazione del senato accademico/consiglio di amministrazione</b>	09/02/2023
<b>Data della consultazione con le organizzazioni rappresentative a livello locale della produzione, servizi, professioni</b>	12/12/2022 -
<b>Data del parere favorevole del Comitato regionale di Coordinamento</b>	09/01/2023
<b>Modalità di svolgimento</b>	a. Corso di studio convenzionale
<b>Eventuale indirizzo internet del corso di laurea</b>	<a href="https://www.polito.it/corsi/32-137">https://www.polito.it/corsi/32-137</a>
<b>Dipartimento di riferimento ai fini amministrativi</b>	ELETTRONICA E TELECOMUNICAZIONI
<b>EX facoltà di riferimento ai fini amministrativi</b>	
<b>Massimo numero di crediti riconoscibili</b>	12 DM 16/3/2007 Art 4 <a href="#">Nota 1063 del 29/04/2011</a>
<b>Corsi della medesima classe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ingegneria elettronica</li> <li>• Nanotechnologies for ICTs (Nanotecnologie per le ICT)</li> </ul>

### **Obiettivi formativi qualificanti della classe: LM-29 Ingegneria elettronica**

I laureati nei corsi di laurea magistrale della classe devono:

- conoscere approfonditamente gli aspetti teorico-scientifici della matematica e delle altre scienze di base ed essere capaci di utilizzare tale conoscenza per interpretare e descrivere i problemi dell'ingegneria complessi o che richiedono un approccio interdisciplinare;
- conoscere approfonditamente gli aspetti teorico-scientifici dell'ingegneria, sia in generale sia in modo approfondito relativamente a quelli dell'ingegneria elettronica, nella quale sono capaci di identificare, formulare e risolvere, anche in modo innovativo, problemi complessi o che richiedono un approccio interdisciplinare;
- essere capaci di ideare, pianificare, progettare e gestire sistemi, processi e servizi complessi e/o innovativi;
- essere capaci di progettare e gestire esperimenti di elevata complessità;
- avere conoscenze nel campo dell'organizzazione aziendale (cultura d'impresa) e dell'etica professionale;
- essere dotati di conoscenze di contesto e di capacità trasversali;
- essere in grado di utilizzare fluentemente, in forma scritta e orale, almeno una lingua dell'Unione Europea oltre l'italiano, con riferimento anche ai lessici disciplinari.

L'ammissione ai corsi di laurea magistrale della classe richiede il possesso di requisiti curriculari che prevedano, comunque, un'adeguata padronanza di metodi e contenuti scientifici generali nelle discipline scientifiche di base e nelle discipline dell'ingegneria, propedeutiche a quelle caratterizzanti previste nell'ordinamento della presente classe di laurea magistrale.

I corsi di laurea magistrale della classe devono inoltre culminare in una importante attività di progettazione, che si concluda con un elaborato che dimostri la padronanza degli argomenti, la capacità di operare in modo autonomo e un buon livello di capacità di comunicazione.

I principali sbocchi occupazionali previsti dai corsi di laurea magistrale della classe sono quelli dell'innovazione e dello sviluppo della produzione, della progettazione avanzata, della pianificazione e della programmazione, della gestione di sistemi complessi, sia nella libera professione sia nelle imprese manifatturiere o di servizi che nelle amministrazioni pubbliche. I laureati magistrali potranno trovare occupazione presso imprese di progettazione e produzione di componenti, apparati e sistemi elettronici ed optoelettronici; industrie manifatturiere, settori delle amministrazioni pubbliche e imprese di servizi, che applicano tecnologie e infrastrutture elettroniche per il trattamento, la trasmissione e l'impegno di segnali in ambito civile, industriale e dell'informazione.

Gli atenei organizzano, in accordo con enti pubblici e privati, stages e tirocini.

### **Relazione del nucleo di valutazione per accreditamento**

#### **[Vedi allegato](#)**

### **Sintesi della consultazione con le organizzazioni rappresentative a livello locale della produzione, servizi, professioni**

Nel corso della preparazione del progetto di laurea magistrale è stata effettuata un'attività di consultazione con alcune imprese ed enti di ricerca interessati alla laurea proposta. A tutti loro è stato sottoposto un questionario con alcune domande sul progetto stesso, a loro precedentemente sottoposto. In particolare sono stati contattati aziende ed enti di ricerca, di levatura nazionale ed internazionale, che potrebbero rappresentare un naturale sbocco lavorativo per i neolaureati. Siccome la laurea magistrale è di tipo ingegneristico le aziende manifatturiere sono di grande importanza, ma i centri di ricerca sono naturalmente importanti per tutti coloro che vorrebbero continuare l'attività a livello di ricerca più che di sviluppo prodotto. Il questionario, nonché il resoconto di tutti gli incontri con le aziende, è riportato nell'allegato. Qui si riportano brevemente l'elenco delle imprese e dei centri di ricerca consultati e i principali risultati delle consultazioni. Le consultazioni hanno riguardato imprese ed enti di ricerca con cui il Politecnico ha per lo più già collaborazioni di ricerca, tramite progetti commerciali od europei o tramite ricerca libera. In particolare hanno risposto al questionario, in ordine alfabetico, Eltek, Fondazione Links, IBM, INRiM, Intesa

Sanpaolo, Quantinum, QTI, Telsi, TIM.

Le conclusioni delle consultazioni hanno rafforzato il convincimento che la laurea proposta risulterà di interesse per le aziende, in quanto le aziende hanno tutte espresso interesse verso l'assunzione di profili derivanti da questo percorso, naturalmente in modo differente in base al tipo di azienda (o di centro di ricerca). Dalle risposte emerge anche che tale interesse non potrà che crescere nel prossimo futuro.

Oltre alle attività di consultazione descritte in precedenza, dal 28 novembre al 12 dicembre 2022 si è svolta la Consulta di Ateneo, a cui sono stati invitati circa 60 rappresentanti di organizzazioni della produzione, dei servizi, delle professioni e della cultura; aziende di respiro locale, nazionale ma anche internazionale. Sono stati illustrati gli obiettivi formativi specifici e le modalità di accesso al corso di studio, la struttura e i contenuti del percorso formativo proposto, i profili professionali formati e i relativi sbocchi occupazionali. Sono emersi ampi consensi rispetto al progetto culturale e formativo del CdS e alle figure professionali che esso intende formare.

## **Vedi allegato**

### **Sintesi del parere del comitato regionale di coordinamento**

Il Corso di Laurea Magistrale in Quantum Engineering, interamente erogato in lingua inglese, in sintonia con gli obiettivi formativi che si è dato, è fortemente multidisciplinare per permettere alle laureate e ai laureati di utilizzare in modo innovativo e trasversale le tecnologie quantistiche nelle applicazioni ingegneristiche. L'esigenza di una formazione multidisciplinare non può però essere pienamente soddisfatta attraverso le classi di Laurea tradizionali più vicine agli obiettivi del percorso formativo (Elettronica, Informatica) che vincolano a pochi settori tra loro relativamente affini una buona parte dei crediti formativi. Per questo motivo si è fatto ricorso al DM 289 del 15/3/2021 e successiva integrazione DM 1154 del 14/10/2021 sull'innovazione didattica. In particolare, per la classe LM-29 (Elettronica) l'insieme degli SSD caratterizzanti è stato ampliato inserendo i settori di FIS/03, MAT/05, MAT/07 e ING-INF/05. In questo modo il percorso formativo potrà costruire competenze approfondite di Matematica, di Fisica, di Elettronica e di Informatica.

Il Co.Re.Co., preso atto della motivazione espressa per l'istituzione del corso di laurea, preso altresì atto della consultazione svolta con le imprese e gli enti di ricerca interessati, di levatura nazionale ed internazionale, come Eltek, Fondazione Links, IBM, INRiM, Intesa Sanpaolo, Quantinum, QTI, Telsi, TIM, esprime, all'unanimità, parere favorevole all'attivazione del Corso di Laurea Magistrale "Quantum Engineering" classe LM-29, a partire dall'a.a. 2023/2024.

## **Vedi allegato**

### **Obiettivi formativi specifici del corso e descrizione del percorso formativo**

La Laurea Magistrale in Quantum Engineering è interamente erogata in lingua inglese.

Il corso di Laurea Magistrale in Quantum Engineering, in sintonia con gli obiettivi formativi che si è dato, è fortemente multidisciplinare per permettere alle laureate e ai laureati di utilizzare in modo innovativo e trasversale le tecnologie quantistiche nelle applicazioni ingegneristiche.

Il nuovo Corso di Laurea Magistrale realizza così la sua principale finalità, ovvero quella di formare laureate e laureati con una preparazione multidisciplinare che comprenda le competenze matematiche, fisiche, elettroniche e informatiche necessarie per una efficace applicazione delle tecnologie quantistiche ai settori delle comunicazioni, dell'informatica e della sensoristica.

Il piano degli studi è articolato su 4 semestri ciascuno dei quali prevede attività didattiche che forniscono competenze trasversali nei settori caratterizzanti della LM con la presenza di insegnamenti integrati. La distribuzione di crediti tra i semestri è stata studiata in maniera bilanciata, contemplando 30 CFU/semestre (nel caso dell'ultimo semestre comprendendo in tale valore anche i crediti attribuiti all'attività di tesi).

Il primo semestre è organizzato in modo da fornire in modo trasversale gli strumenti che renderanno possibile nei semestri successivi lo studio delle discipline in grado di supportare le applicazioni più innovative delle tecnologie quantistiche come la computazione, le comunicazioni sicure e la sensoristica. In particolare, il primo semestre, oltre ad insegnamenti comuni, prevede due percorsi formativi paralleli, ciascuno basato su due insegnamenti presi da un paniere di quattro moduli formativi, che approfondiscono contenuti tecnologici, matematici, informatici e fisici, onde consentire agli studenti di seguire con profitto gli insegnamenti dei semestri successivi. I due insegnamenti verranno definiti per ciascuno studente in funzione della laurea triennale di provenienza.

La formazione relativa agli aspetti tecnologici, di calcolo e di comunicazione sarà integrata da specifiche attività di laboratorio che permetteranno agli studenti di acquisire un'adeguata sensibilità anche su aspetti pratici, a ulteriore consolidamento delle loro competenze ingegneristiche e specifiche professionalità. Sono infatti previsti, nel piano formativo, un consistente numero di crediti, all'interno di diversi insegnamenti, dedicati ad attività sperimentali e di laboratorio: laboratorio di micro e nano-fabbricazione in cleanroom, laboratorio di criogenia, laboratorio di misure di quantum photonics, laboratorio di misure elettriche su Qbit, laboratorio di programmazione in Python, ... Tali attività di laboratorio saranno accompagnate dalla predisposizione di opportune relazioni e/o progetti, sia in forma individuale che di gruppo, in modo da accrescere negli studenti diverse capacità fondamentali per la figura professionale dell'ingegnere: saper applicare in modo rigoroso un metodo scientifico, condurre un'adeguata analisi dei dati, saper comunicare efficacemente il proprio lavoro anche in inglese, imparare a gestire un adeguato grado di autonomia, imparare a operare in un team, consolidare la sensibilità individuale verso problematiche legate al rispetto di protocolli e norme di sicurezza.

Il percorso si chiude con lo svolgimento di una Tesi di Laurea negli ambiti applicativi previsti dal percorso di studi e ne coprirà gli aspetti tecnologici, modellistici e di sistema. La rete di università e di centri di ricerca con i quali i docenti del corso abitualmente cooperano alimenterà rilevanti opportunità di tesi all'estero per consentire alle studentesse e agli studenti il completamento del percorso formativo con esperienze di alto profilo scientifico e di respiro internazionale.

In tale sede vale la pena sottolineare come, trattando discipline e relative applicazioni ingegneristiche all'apice dell'evoluzione scientifica e tecnologica, e quindi in continuo e rapido mutamento, verrà dedicata una particolare attenzione al costante monitoraggio del quadro internazionale e al conseguente adeguamento del piano formativo e dei contenuti degli insegnamenti erogati.

Il piano formativo delineato, ad integrazione degli sbocchi professionali in ambiti industriali, manifatturieri e nei servizi avanzati, offre inoltre l'opportunità di proseguire la formazione attraverso Master, Scuole di Specializzazione e Dottorati di Ricerca, sia in ambito nazionale che internazionale, grazie all'esperienza didattica totalmente in lingua inglese e l'opportunità di operare presso laboratori, centri di ricerca e aziende internazionali attraverso sia le attività di laboratorio che quella di tesi.

### **Descrizione sintetica delle attività affini e integrative**

Le attività affini ed integrative hanno il compito di completare la formazione richiesta ai laureati magistrali in Quantum Engineering, andando a rafforzare ed approfondire ambiti specifici. Sono coinvolti aspetti matematici, di fisica della materia, di ingegneria informatica e di ingegneria delle telecomunicazioni; in tutti i casi sono privilegiate le attività che consentano agli studenti di individuare gli strumenti più appropriati per le applicazioni di Quantum Engineering.

### **Risultati di apprendimento attesi, espressi tramite i Descrittori europei del titolo di studio (DM 16/03/2007, art. 3, comma 7).**

#### **Conoscenza e capacità di comprensione (knowledge and understanding)**

Il carattere multidisciplinare del corso di studio fornisce competenze matematiche, fisiche, elettroniche e informatiche finalizzate alla comprensione dei fenomeni quantistici che sono alla base delle applicazioni ingegneristiche. È infatti richiesta da un lato la conoscenza della teoria della meccanica

quantistica consolidata sia dal punto di vista matematico sia fisico, unitamente ad un approccio ingegneristico estremamente diversificato (tecnologico, dispositivo, sistemistico, informatico, ...) per poter coltivare le rivoluzionarie opportunità della Quantum Technology e consentire ad una nuova generazione di ingegneri di sfruttare i sistemi quantistici come risorsa tecnologica. Le laureate e i laureati in Quantum Engineering devono da una parte essere esperti della teoria dei quanti in modo da comprendere le leggi e i meccanismi fondamentali che governano il funzionamento delle macchine quantistiche e dall'altra avere una conoscenza dei sistemi elettronici, informatici e delle comunicazioni per permettere l'integrazione dei sistemi quantistici in applicazioni reali.

#### Modalità didattiche

L'organizzazione del corso di studio presenta insegnamenti che offrono una formazione approfondita finalizzata al progetto di sistemi in grado di supportare le applicazioni più innovative delle tecnologie quantistiche come la computazione, le comunicazioni, le comunicazioni sicure e la sensoristica. Per ciascuno dei tre ambiti (computazione, comunicazioni, sensoristica) la formazione relativa agli aspetti tecnologici, di calcolo e di comunicazione sarà integrata da specifiche attività di laboratorio. In tal modo le attività caratterizzanti e affini integrative previste daranno la possibilità di formare figure di alto profilo in grado di correlare gli aspetti teorici con quelli tecnologici sulla base di una sensibilità maturata in ambito sperimentale con specifiche competenze nei tre principali ambiti applicativi:

##### 1) Computazione Quantistica

Il percorso formativo prevede specifici insegnamenti che consentono agli studenti di saper progettare e utilizzare sistemi di calcolo ad altissime prestazioni. La conoscenza del comportamento di un bit quantistico o Qubit apre potenzialità di calcolo non raggiungibili con sistemi di elaborazione dell'informazione classici. Le soluzioni tecnologiche per la realizzazione dei Qubit e la loro modellizzazione dal punto di vista elettronico sono il punto di partenza per la definizione di architetture di calcolo a supporto della computazione quantistica. In particolare l'implementazione hardware di "quantum gates" e di array multi-qubit rappresenta il nucleo centrale di un quantum computer che d'altra parte richiede, per poter essere efficacemente utilizzato, di sofisticati circuiti di interfaccia e di strutture criogeniche. Gli studenti svolgono numerose attività sperimentali nelle quali l'ottimizzazione degli algoritmi di calcolo è basata sulla conoscenza delle risorse hardware in grado di supportare gli operatori quantistici.

##### 2) Comunicazione Quantistica

Il percorso formativo prevede specifici insegnamenti che portano gli studenti a saper analizzare e comprendere i sistemi di comunicazione intrinsecamente sicuri. La conoscenza dei principi dell'ottica quantistica utilizzati nei sistemi fotonici con sorgenti e rivelatori a singolo fotone consente l'ingegnerizzazione degli stati non classici della luce, che a loro volta sono alla base dei protocolli per le comunicazioni quantistiche. A partire da questi presupposti sono studiate la crittografia quantistica e i relativi algoritmi che sono ad oggi una delle principali applicazioni delle tecnologie quantistiche.

##### 3) Sensoristica Quantistica

Il percorso formativo consentirà agli studenti di saper progettare e utilizzare sistemi di misurazione basati su sensori quantistici. Questi sensori possono essere realizzati con sistemi fotonici o sistemi a stato solido e sono in grado di superare ampiamente le prestazioni di strutture classiche in numerose applicazioni tecnologiche. In particolare lo studio delle possibili implementazioni dei Qubit offre competenze abilitanti per il progetto e l'utilizzo di sensori. Più in generale, il "quantum sensing" visto come ambito applicativo è un settore in rapidissimo sviluppo, nel quale le studentesse e gli studenti della nuova Laurea saranno in grado di operare efficacemente. A supporto della formazione impartita attraverso lezioni frontali, e allo scopo di alimentare la sensibilità verso le problematiche del manufacturing, gli studenti svolgeranno attività sperimentali di micro e nano fabbricazione in cleanroom. In sintesi i tre profili identificati permetteranno alle laureate e ai laureati di operare attivamente nella ricerca e nell'innovazione, ma allo stesso tempo, le ampie competenze acquisite nell'ambito tecnologico, informatico ed elettronico potranno essere utilmente spese in contesti più tradizionali dell'ingegneria dell'informazione.

#### Modalità di accertamento

L'accertamento delle conoscenze avviene ricorrendo ad esami scritti e orali che privilegiano:

- la verifica degli aspetti multidisciplinari acquisiti dagli studenti nelle attività sperimentali e di progetto;
- la capacità di valutare in modo autonomo e critico le soluzioni che consentano di applicare le tecnologie quantistiche nella soluzione di problemi ingegneristici.

L'articolazione delle attività formative prevede un frequente ricorso a esercitazioni in laboratorio sia di carattere sperimentale sia simulativo per le quali sono richieste relazioni generalmente redatte da gruppi di studenti. Il lavoro in gruppo viene incoraggiato nelle attività di progetto che sono parte integrante degli insegnamenti abilitanti all'applicazione delle tecnologie quantistiche nei campi dell'ingegneria elettronica, informatica e delle telecomunicazioni.

### **Capacità di applicare conoscenza e comprensione (applying knowledge and understanding)**

Di conseguenza il laureato nella LM Quantum Engineering avrà la possibilità di utilizzare le seguenti competenze specifiche:

- utilizzare gli aspetti metodologici-operativi della matematica e della fisica quantistica ed essere capaci di utilizzare tali conoscenze per interpretare, affrontare e risolvere i problemi dell'ingegneria quantistica;
- modellizzare la conduzione elettrica in mezzi disordinati di scala nanometrica;
- stimare la produzione di entropia e flussi di calore in sistemi a scala nanometrica;
- modellizzare il trasporto di materia in ambienti fortemente confinati;
- stimare la risposta alle perturbazioni di sistemi quantistici, a partire da loro stati stazionari di equilibrio o disequilibrio
- progettare, disegnare e simulare un dispositivo quantistico a stato solido (ad es. sensore);
- progettare e ottimizzare un flusso di processo tecnologico alla micro e nano-scala per la realizzazione di dispositivi quantistici a stato solido;
- progettare e integrare in un circuito ibrido dispositivi quantistici e dispositivi classici;
- modellizzare in modo realistico le differenti implementazioni tecnologiche dei Qubit;
- progettare strutture di calcolo e di comunicazione basate su Qubit;
- progettare circuiti di interfaccia e di condizionamento dei segnali per i Qubit;
- progettare e realizzare quantum gate basati su Qubit e multi-Qubit array;
- utilizzare i principali sistemi di calcolo tradizionale, calcolatori paralleli e distribuiti e GPU per programmare soluzioni a problemi reali;
- utilizzare e progettare algoritmi di machine learning su calcolatori tradizionali;
- utilizzare i principali tipi di computer quantistico, siano essi di tipo quantum annealer oppure general quantum gate array;
- utilizzare i principali algoritmi quantistici al fine di risolvere problemi reali;
- comprendere le principali problematiche di sicurezza informatica, sicurezza informatica legata ai calcolatori quantistici e sicurezza post-quantistica e progettare applicazioni per diversi ambiti commerciali e manifatturieri.

### **Autonomia di giudizio (making judgements)**

Gli studenti saranno guidati nello sviluppare autonomia di giudizio attraverso lo studio, il progetto e realizzazione di codici e strumentazione riguardanti la computazione, la comunicazione e la sensoristica quantistiche, secondo il loro proprio percorso specifico. Nell'analizzare e interpretare informazioni di contesto e di dati, come pure nel prendere dimestichezza con risultati teorici e modelli matematici, anche in presenza di un tutor accademico, sarà stimolata l'attitudine al discernimento. Per esempio, in ambito computazionale, gli studenti svolgeranno attività quali l'ottimizzazione degli algoritmi di calcolo che, basata sulla conoscenza delle risorse hardware in grado di supportare gli operatori quantistici, indurranno riflessioni su come le conoscenze acquisite potranno poi essere utilizzate anche in tecnologie convenzionali. L'autonomia di giudizio dovrà essere esercitata in questo e casi analoghi, per evidenziare le possibilità di integrazione fra diverse tecnologie. In particolare, nella preparazione della dissertazione finale, gli studenti impareranno a valutare scenari diversi e fare delle scelte autonomamente, anche in presenza di informazioni limitate o incomplete. La possibilità di svolgere in parte o in toto tale lavoro presso prestigiose istituzioni internazionali ulteriormente contribuirà allo sviluppo delle loro capacità di giudizio, dando loro modo di confrontarsi con ambienti e abitudini diverse. Essendo uno dei caposaldi della formazione degli studenti l'autonomia nell'ampliare e approfondire le proprie conoscenze, anche tramite la ricerca personale e lo studio di testi diversi e di pubblicazioni scientifiche specialistiche, agli studenti saranno date molte opportunità di crescere, durante tutto il biennio, nell'esercizio di giudizio autonomo.

### **Abilità comunicative (communication skills)**

Il corso di laurea magistrale sarà erogato in inglese, in quanto lingua della comunicazione, delle normative, della modulistica e della documentazione tecnologiche e scientifiche moderne, pertanto necessaria per lavorare non solo in ambito internazionale, ma anche nazionale. Agli studenti verrà richiesto di esprimere correttamente in questa lingua i propri ragionamenti e le loro conclusioni in modo chiaro e consapevole, sui temi del corso di laurea, in forma sia scritta che orale utilizzando con competenza i lessici disciplinari, utilizzando all'occorrenza gli strumenti informatici necessari per le loro presentazioni, anche attraverso diagrammi e schemi. Frequentando le lezioni, che inviteranno al dialogo e studiando ed elaborando progetti sia singolarmente che in gruppi, gli studenti impareranno ad argomentare in particolare su temi di meccanica quantistica e sulle sue applicazioni relative al calcolo, alla comunicazione e alla sensoristica. Attività seminariali seguite da discussione saranno organizzate periodicamente con esperti e con imprese chiave nei vari settori. I progressi nell'ambito delle abilità comunicative verranno principalmente monitorati attraverso compiti scritti, richiesti da alcuni corsi di base, prove orali, esercitazioni di laboratorio e conseguenti relazioni. La produzione ed esposizione di tesine, oltre che l'elaborazione della tesi di laurea saranno pure in lingua inglese e daranno ulteriori opportunità di sviluppare e valutare le abilità comunicative acquisite. Particolare attenzione sarà dedicata allo sviluppo di capacità comunicative rivolte all'esterno del mondo scientifico e tecnologico, a scopo sia divulgativo che di interazione con enti esterni, pubblici e privati. Al termine di questo percorso, i laureati saranno ben equipaggiati per comunicare con competenza e chiarezza il frutto del loro lavoro in qualunque ambiente scientifico e tecnologico.

### **Capacità di apprendimento (learning skills)**

Frequentando le lezioni, partecipando alle attività sperimentali e allo studio individuale e di gruppo, gli studenti svilupperanno una forte capacità di apprendimento, acquisendo anche strumenti e strategie nuove, atti all'ampliamento delle proprie conoscenze. Lo studio di libri di testo sarà affiancato dalla richiesta di svolgere ricerche bibliografiche in autonomia, al fine di allargare l'orizzonte e la profondità delle proprie conoscenze. L'interazione con i docenti coinvolti in attività di ricerca scientifica di livello internazionale nel campo della scienza e della tecnologia quantistiche, come pure il contatto con aziende operanti nel settore, fornirà un ampio spettro di esempi e metodi di apprendimento, che spazieranno dalle nozioni teoriche alle applicazioni concrete e commerciali. La verifica dell'apprendimento seguirà le modalità tradizionali, basate su esercizi ed esposizioni scritte, oppure su sessioni orali, nelle quali gli studenti illustreranno le proprie conoscenze. Presentazioni e discussioni di casi di interesse, attività di laboratorio o progetti specifici condurranno a valutazioni intermedie, durante lo svolgimento dei corsi. La tesi di laurea magistrale, la sua presentazione orale e il dibattito conseguente saranno in inglese e consentiranno di completare la valutazione degli studenti. Al termine del percorso, questi saranno in grado di accedere tanto a carriere nel mondo della ricerca, quanto al lavoro in aziende dedite allo sviluppo di tecnologie avanzate.

### **Conoscenze richieste per l'accesso (DM 270/04, art 6, comma 1 e 2)**

Costituiscono requisiti curriculari il titolo di laurea o di un diploma universitario di durata triennale ovvero di altro titolo di studio conseguito all'estero, riconosciuto idoneo, e le competenze e conoscenze che lo studente deve aver acquisito nel percorso formativo pregresso, espresse sotto forma di crediti riferiti a specifici settori scientifico-disciplinari o a gruppi di essi. In particolare, lo studente deve aver acquisito un minimo di 40 cfu sui seguenti settori scientifico-disciplinari di base CHIM/07, FIS/01, FIS/02, FIS/03, FIS/04, ING-INF/05, INF/01, MAT/02, MAT/03, MAT/05 e 60 cfu sui seguenti settori scientifico-disciplinari CHIM/07, FIS/01, FIS/02, FIS/03, FIS/04, INF/01, MAT/02, MAT/03, MAT/05, MAT/06, MAT/07, MAT/08, MAT/09, SECS-S/02, ING-IND/16, ING-IND/22, ING-IND/31, ING-IND/33, ING-INF/01, ING-INF/03, ING-INF/04, ING-INF/05, ING-INF/07.

In termini di conoscenze richieste per l'accesso, data l'elevata multidisciplinarietà della LM in Quantum Engineering, è richiesto un congruo bagaglio di conoscenze nel novero del seguente elenco:

- Elementi di fisica (meccanica, termodinamica, ottica, elettromagnetismo)
- Elementi di struttura della materia
- Elementi di fisica moderna
- Elementi di elettronica e di dispositivi elettronici
- Elementi di chimica e di scienza dei materiali
- Conoscenza delle tecniche di caratterizzazione alla micro e nano-scala (SEM, TEM, AFM, Raman, XRD, XPS, profilometria, ...)

Tali conoscenze saranno oggetto della verifica della personale preparazione dello studente, secondo le modalità riportate nel regolamento didattico del corso di studio.

Inoltre, lo studente deve essere in possesso di un'adeguata preparazione personale e della conoscenza certificata della Lingua inglese almeno di livello B2, come definito dal Quadro comune europeo di riferimento per la conoscenza delle lingue (QCER).

Le modalità di verifica dell'adeguatezza della preparazione personale, i criteri per il riconoscimento della conoscenza certificata della lingua inglese sono riportati nel regolamento didattico del corso di studio.

### **Caratteristiche della prova finale (DM 270/04, art 11, comma 3-d)**

La prova finale ha un valore di 18 crediti.

La tesi ha come oggetto un'analisi, un progetto o un'applicazione a carattere innovativo, relativi ad argomenti coerenti con gli obiettivi formativi del corso di studi, e lo sviluppo di un elaborato scritto conclusivo (Tesi di Laurea Magistrale). E' ammesso alla prova finale lo studente che ha completato il restante percorso formativo.

La tesi di Laurea Magistrale rappresenta una verifica complessiva della padronanza di contenuti tecnici e delle capacità di organizzazione, di comunicazione, e di lavoro individuali, relativamente allo sviluppo di analisi o di progetti complessi. Le attività previste nella prova finale richiedono normalmente l'applicazione di quanto appreso in più insegnamenti, l'integrazione con elementi aggiuntivi e la capacità di proporre spunti innovativi. L'argomento e le attività relative alla prova finale sono concordati con un docente del Politecnico (relatore di tesi). Le attività possono essere condotte anche presso altri enti o aziende, in Italia o all'estero, sotto la supervisione di un docente relatore del Politecnico e di un tutore dell'ente esterno. Le attività relative alla preparazione della Tesi di Laurea ed i relativi risultati devono essere presentati e discussi pubblicamente, in presenza di una commissione di docenti che esprime una valutazione del lavoro svolto e della presentazione. La tesi di Laurea Magistrale e la presentazione devono essere in lingua inglese.

Modalità di assegnazione e dettagli sullo svolgimento della prova finale sono precisati nel regolamento didattico del Corso di Studi.

### **Motivi dell'istituzione di più corsi nella classe**

Il Collegio di Ingegneria Elettronica, delle Telecomunicazioni e Fisica del Politecnico di Torino annovera attualmente due corsi di Laurea Magistrale nella stessa classe di Ingegneria elettronica (LM-29) denominati 'Ingegneria Elettronica' e 'Nanotechnologies for ICTs'.

Si può affermare che il corso di Laurea Magistrale in Ingegneria elettronica è caratterizzato da una impostazione ad ampio spettro, e offre competenze che spaziano dalle tecnologie alla progettazione di circuiti e sistemi e agli aspetti algoritmici e applicativi, ed una solida formazione nei diversi settori di interesse specifico dell'elettronica, integrati da approfondimenti nell'ambito delle misure, dei campi elettromagnetici, e dell'elaborazione digitale dell'informazione.

Il corso di Laurea Magistrale in Nanotechnologies for ICTs pone l'enfasi sulla cultura ingegneristica in particolare nell'ambito delle tecnologie ICT (ovvero tecnologie dell'informazione e della comunicazione) e sulla preparazione nelle aree della Fisica della materia rivolte alle micro/nanotecnologie, dei materiali e dei processi necessari allo sviluppo di micro/nanodispositivi destinati a occupare una frazione sempre crescente del mercato globale. Il corso di

studi associa quindi ad una solida preparazione in ambiti culturali propri dell'Ingegneria elettronica avanzata un insieme coerente di competenze specifiche in Fisica della materia finalizzate allo sviluppo dei materiali e processi per la progettazione di ogni tipo di micro/nanodispositivo.

Il Politecnico di Torino ha deliberato l'istituzione di un nuovo corso di studio in classe LM-29 denominato Quantum Engineering: si tratta di un corso di studio fortemente multidisciplinare tale da permettere alle laureate e ai laureati di utilizzare in modo innovativo e trasversale le tecnologie quantistiche nelle applicazioni ingegneristiche. L'esigenza di una formazione multidisciplinare non può però essere pienamente soddisfatta attraverso le classi di Laurea tradizionali più vicine agli obiettivi del percorso formativo (Elettronica, Informatica) che vincolano a pochi settori tra loro relativamente affini una buona parte dei crediti formativi. Per questo motivo si è fatto ricorso al DM 289 del 25/3/2021 e successiva integrazione DM 1154 del 14/10/2021 sulla flessibilità. In particolare, per la classe LM-29 (Elettronica) l'insieme degli SSD caratterizzanti è stato ampliato inserendo i settori di FIS/03, MAT/05, MAT/07, ING-INF/03 e ING-INF/05. In questo modo il percorso formativo potrà costruire competenze approfondite di Matematica, di Fisica, di Elettronica e di Informatica. Il nuovo Corso di Laurea Magistrale realizza così la sua principale finalità, ovvero quella di formare laureate e laureati con una preparazione multidisciplinare che comprenda le competenze matematiche, fisiche, elettroniche e informatiche necessarie per una efficace applicazione delle tecnologie quantistiche ai settori delle comunicazioni, dell'informatica e della sensoristica.

<b>Sbocchi occupazionali e professionali previsti per i laureati</b>
<b>Esperto in Quantum Computing</b>
<p><b>funzione in un contesto di lavoro:</b></p> <p>Il profilo professionale di esperto in Quantum Computing svolgerà le funzioni di:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- sviluppatore di applicazioni basate su calcolatore quantistico</li> <li>- sviluppatore di applicazioni ibride, in parte su calcolatore classico e in parte su calcolatore quantistico</li> <li>- sviluppatore di nuovi calcolatori quantistici, sia a livello di base (qubit), sia a livello elevato (architetturale), sia a livello di sistema (compilazione del codice)</li> <li>- ricerca e scouting di nuove opzioni, nuove applicazioni e nuovi mercati per il calcolo quantistico</li> <li>- benchmarking di soluzioni di calcolo quantistico rispetto a implementazioni classiche</li> <li>- analisi di maturità dei mercati e delle tecnologie per l'introduzione di sistemi di calcolo quantistico</li> </ul>
<p><b>competenze associate alla funzione:</b></p> <p>Il percorso formativo consentirà agli studenti di saper utilizzare e (parzialmente) progettare i computer quantistici. L'utilizzo è sicuramente la componente più importante tra le competenze, in quanto si suppone sarà la competenza che si diffonderà maggiormente, così come è avvenuto con i calcolatori elettronici classici.</p> <p>Principali competenze associate alla funzione specifica: analisi di algoritmi quantistici, modifica e realizzazione di nuovi algoritmi quantistici, conoscenza delle principali librerie software esistenti a livello commerciale per la simulazione e l'utilizzo di calcolatori quantistici, sia in modo indipendente dalla tecnologia, sia in modo dipendente dalla tecnologia, conoscenza dei principali domini di utilizzo (ad es. ambito finanziario); analisi delle tecnologie esistenti a livello di qubit, capacità di progettazione di nuove tecnologie per la realizzazione di qubit, analisi delle prestazioni dei computer quantistici, anche relativamente alle prestazioni in termini di rumore e decoerenza.</p> <p>Competenze trasversali: buona capacità di comunicazione (scritta e orale, anche in inglese), di analisi e di sintesi, di rigorosa implementazione metodologica e di interfacciamento in un contesto multidisciplinare.</p>
<p><b>sbocchi occupazionali:</b></p> <p>Lo sbocco più naturale al momento è costituito da aziende che producono hardware e software per i calcolatori quantistici. Il numero di queste aziende è al momento limitato nel mondo, in quanto trattasi di tecnologie altamente sofisticate, tuttavia il numero complessivo di addetti è importante, visto anche il calibro delle multinazionali in oggetto.</p> <p>Si sta sviluppando invece il mercato secondario, che per i calcolatori tradizionali è quello principale, costituito da tutte le aziende che utilizzano i computer quantistici per risolvere problemi applicativi. Al momento, tra questi, il mercato finanziario è molto promettente, soprattutto per l'analisi del rischio. Il mercato secondario si svilupperà nel medio-lungo termine.</p> <p>Oltre alle aziende è molto importante il ruolo svolto dagli enti di ricerca, italiani e internazionali, che hanno bisogno di ricercatori con una valida preparazione di base. Questo mercato è già attivo adesso e si rafforzerà nel medio-lungo termine.</p>
<b>Esperto in Quantum Communication</b>
<p><b>funzione in un contesto di lavoro:</b></p> <p>Il profilo professionale di esperto in Quantum Communication svolgerà le funzioni di:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- sviluppatore di applicazioni e soluzioni tecnologiche basate su effetti e tecnologie quantistiche per la comunicazione quantistica</li> <li>- sviluppatore di setup e banchi prova per la QKD</li> <li>- ricerca e scouting di nuove opzioni, nuove applicazioni e nuovi mercati per l'implementazione di sistemi di comunicazione quantistica</li> <li>- benchmarking di soluzioni di comunicazione quantistica rispetto a implementazioni classiche</li> <li>- analisi di maturità dei mercati e delle tecnologie per l'introduzione di nuovi sistemi di comunicazione quantistica</li> </ul>
<p><b>competenze associate alla funzione:</b></p> <p>Tutte le funzioni elencate richiedono conoscenze e competenze fondamentali nell'ambito delle tecnologie quantistiche, soprattutto a livello fisico e matematico. Specifiche competenze sono poi richieste a livello sistema e applicazione per le funzioni di progettista e sviluppatore. Il percorso formativo prevede specifici insegnamenti che porteranno gli studenti a saper progettare e utilizzare sistemi di comunicazione intrinsecamente sicuri. Le competenze che l'implementazione di comunicazioni quantistiche richiedono vertono sull'utilizzo dei fotoni per trasmettere lo stato di qubit posizionati in siti remoti. La conoscenza di sistemi fotonici con sorgenti e rivelatori a singolo fotone rendono possibile la generazione e l'ingegnerizzazione degli stati non classici della luce. L'utilizzo dei fotoni garantisce un'alta immunità dalle perturbazioni e si propagano con bassa attenuazione. Le comunicazioni quantistiche sono utilizzate per connettere computer quantistici e per garantire altissimi livelli di sicurezza. La crittografia quantistica utilizza le leggi della meccanica quantistica per garantire una trasmissione intrinsecamente sicura dei dati. Il saper progettare sistemi di trasmissione basati sullo scambio di singoli qubit fotonici per i quali far sì che un qualsiasi tentativo di intercettazione corrisponda ad una misura dello stato che alterandolo lo renda facilmente individuabile a livello di protocollo. La definizione di protocolli sicuri quali quelli basati su QKD (Quantum Key Distribution) sfrutta le competenze maturate nello studio dei sistemi di comunicazione quantistica e trova applicazione in settori strategici per le ICT. Le competenze di maggior rilievo correlate alla funzione specifica riguardano la capacità di implementare algoritmi di Quantum Cryptography, capacità di ideare sistemi per la correzione d'errore per Quantum Key, la capacità di ideare reti di comunicazioni quantistiche basate su dispositivi fotonici in grado di realizzare quantum repeater e quantum switch.</p> <p>Competenze aggiuntive sono poi richieste nei settori dell'elettronica classica, delle misure e del software, al fine di integrare e interfacciare gli apparati e sottosistemi quantistici nel sistema complessivo. Infine, come in tutti gli ambiti ingegneristici, sono fondamentali le competenze trasversali e le soft skills, che permettono agli esperti del settore tecnologico specifico di estendere la propria visione sull'applicazione complessiva, valutarne tutti gli aspetti, compresi quelli non strettamente tecnologici, comunicare e dialogare con figure e esperti di ambiti diversi.</p> <p>Competenze trasversali: buona capacità di comunicazione (scritta e orale, anche in inglese), di analisi e di sintesi, di rigorosa implementazione metodologica e di interfacciamento in un contesto multidisciplinare.</p>
<p><b>sbocchi occupazionali:</b></p> <p>I principali sbocchi professionali sono aziende operanti nel campo delle telecomunicazioni, delle reti di telecomunicazione e della sicurezza. In particolare l'ambito della sicurezza nelle reti di comunicazione ha raggiunto un livello di maturità tale da garantire l'assorbimento sia a livello nazionale sia internazionale di un buon numero di esperti nelle comunicazioni quantistiche e nella crittografia quantistica. I laureati opereranno sia nelle divisioni R&amp;D di tali aziende, sia nelle divisioni più operative e di servizio. Infine, la formazione del laureato in Quantum Engineering ne consente un naturale inserimento nella ricerca applicata per l'innovazione degli apparati di telecomunicazioni.</p>
<b>Esperto in Quantum Sensing</b>
<p><b>funzione in un contesto di lavoro:</b></p> <p>Il profilo professionale di esperto in Quantum Sensing svolgerà le funzioni di:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- sviluppatore di applicazioni e soluzioni tecnologiche basate su effetti e tecnologie quantistiche per diversi settori applicativi;</li> <li>- sviluppatore di setup e banchi prova per dispositivi di sensing quantistico e relativo interfacciamento per la caratterizzazione e la valutazione di performance, anche mediante sviluppo di algoritmi e sistemi per l'ottimizzazione;</li> <li>- ricerca e scouting di nuove opzioni, nuove applicazioni e nuovi mercati per l'implementazione di sistemi di sensing quantistico;</li> <li>- benchmarking di soluzioni di sensing quantistico rispetto a implementazioni classiche;</li> <li>- analisi di maturità dei mercati e delle tecnologie per l'introduzione di nuovi sistemi di sensing quantistico.</li> </ul>

**competenze associate alla funzione:**

Il percorso formativo consentirà agli studenti di saper progettare e utilizzare sistemi di misurazione basati su sensori quantistici per settori applicativi estremamente differenziati. Questi sensori potranno essere implementati con sistemi fotonici o sistemi a stato solido e saranno in grado di superare ampiamente le prestazioni di strutture classiche in numerose applicazioni tecnologiche. Principali competenze associate alla funzione specifica: analisi dei requisiti multidisciplinari per un innovativo sistema di sensing basato su principi quantistici, utilizzo del formalismo teorico della meccanica quantistica, compresi gli aspetti più prettamente matematici, per il design, la modellizzazione e simulazione del sensore in condizioni analoghe a quelle operative, progettazione e integrazione in un circuito ibrido di dispositivi quantistici e dispositivi classici, capacità di progettare un flusso tecnologico di fabbricazione del sensore, anche in un'ottica di scaling-up pre-industriale, selezione delle migliori tecnologie/materiali per esigenze particolari quali la miniaturizzazione, attraverso l'impiego di micro e nanotecnologie, o il packaging, competenze dell'ingegneria elettronica e dell'informazione per l'interfacciamento del sensore, il pilotaggio, l'implementazione di banchi di misura e caratterizzazione, la realizzazione di algoritmi di ottimizzazione e l'analisi dei dati. Competenze trasversali: buona capacità di comunicazione (scritta e orale, anche in inglese), di analisi e di sintesi, di rigorosa implementazione metodologica e di interfacciamento in un contesto multidisciplinare.

**sbocchi occupazionali:**

Il target principale per gli sbocchi professionali sono aziende high-tech a diversa dimensionalità (eventualmente operanti anche a livello globale grazie all'utilizzo esclusivo della lingua inglese per gli insegnamenti) che operano in settori tipicamente strategici, quali microelettronica, difesa, aerospazio, energia e ambiente, biomedicale, ... Nel breve termine si prevede che il principale bacino di accoglienza dei laureati saranno le Divisioni R&D di tali aziende, mentre nel medio-lungo termine è ragionevole ipotizzare un allargamento sia dei settori produttivi che dei ruoli aziendali. Ulteriori sbocchi occupazionali potranno essere trovati nell'ambito della ricerca di base e applicata e nella metrologia.

**Il corso prepara alla professione di (codifiche ISTAT)**

- Ingegneri elettronici - (2.2.1.4.1)
- Ricercatori e tecnici laureati nelle scienze ingegneristiche industriali e dell'informazione - (2.6.2.3.2)

**Il corso consente di conseguire l'abilitazione alle seguenti professioni regolamentate:**

- ingegnere dell'informazione

**Il rettore dichiara che nella stesura dei regolamenti didattici dei corsi di studio il presente corso ed i suoi eventuali curricula differiranno di almeno 30 crediti dagli altri corsi e curriculum della medesima classe, ai sensi del DM 16/3/2007, art. 1 c.2.**

**Attività caratterizzanti**

ambito disciplinare	settore	CFU		minimo da D.M. per l'ambito
		min	max	
Ingegneria elettronica	ING-INF/01 Elettronica FIS/03 Fisica della materia ING-INF/03 Telecomunicazioni ING-INF/05 Sistemi di elaborazione delle informazioni MAT/05 Analisi matematica MAT/07 Fisica matematica	45 [23]	78 [35]	-
<b>Minimo di crediti riservati dall'ateneo minimo da D.M. 45:</b>		45		

**Totale Attività Caratterizzanti**

45 - 78

**Attività affini**

ambito disciplinare	CFU		minimo da D.M. per l'ambito
	min	max	
Attività formative affini o integrative	12	24	12

**Totale Attività Affini**

12 - 24

### Altre attività

<b>ambito disciplinare</b>		<b>CFU min</b>	<b>CFU max</b>
A scelta dello studente		8	16
Per la prova finale		18	18
Ulteriori attività formative (art. 10, comma 5, lettera d)	Ulteriori conoscenze linguistiche	0	6
	Abilità informatiche e telematiche	-	-
	Tirocini formativi e di orientamento	0	6
	Altre conoscenze utili per l'inserimento nel mondo del lavoro	0	6
Minimo di crediti riservati dall'ateneo alle Attività art. 10, comma 5 lett. d		2	
Per stages e tirocini presso imprese, enti pubblici o privati, ordini professionali		0	6
<b>Totale Altre Attività</b>		28 - 58	

### Riepilogo CFU

<b>CFU totali per il conseguimento del titolo</b>	<b>120</b>
<b>Range CFU totali del corso</b>	85 - 160
Crediti riservati in base al DM 987 art.8	23 - 35

### Motivazioni dell'inserimento nelle attività affini di settori previsti dalla classe o Note attività affini

#### Note relative alle altre attività

#### Note relative alle attività caratterizzanti

RAD chiuso il 21/02/2023