OS
Osservatorio sulle tendenze
e le applicazioni del Supercalcolo

ICSC
Centro Nazionale di Ricerca in HPC,
Big Data and Quantum Computing

Le *Big Ideas* per la didattica dell'HPC

Dai bisogni esistenti nella formazione all'High-Performance Computing alle raccomandazioni per la progettazione didattica

Autori:
Eleonora Barelli
Michael Lodi

iFAB
INTERNATIONAL FOUNDATION
BIG DATA AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE
FOR HUMAN DEVELOPMENT

Executive Summary

Questo white paper presenta un'indagine approfondita sullo stato attuale e sulle prospettive future della didattica dell'High-Performance Computing (HPC), affrontando il divario critico tra la domanda crescente di professionisti con competenze in HPC e un'offerta educativa ancora insufficiente. Attraverso la consultazione di esperti, la revisione della letteratura, l'analisi dei programmi esistenti a livello italiano ed europeo, questo studio propone tre contributi chiave per far progredire l'educazione all'HPC a livello globale.

La ricerca evidenzia **lacune di competenze diffuse e persistenti in tutti i gruppi di stakeholder dell'ecosistema HPC**. Le carenze fondamentali riguardano l'assenza, nei curricula universitari di base, di concetti essenziali di programmazione parallela, come la gestione della concorrenza, i pattern di programmazione parallela, le tecniche di ottimizzazione delle prestazioni e la comprensione delle architetture dei sistemi HPC. Le lacune tecniche includono una formazione insufficiente sugli strumenti di ottimizzazione software, sui flussi di lavoro ad alta intensità di dati e sulle tecnologie emergenti come il calcolo eterogeneo e la containerizzazione. L'analisi individua esigenze formative specifiche: gli studenti di informatica raramente affrontano i fondamenti dell'HPC nei corsi di base, ricevono poca formazione sull'ottimizzazione sistematica e hanno scarsa esposizione a flussi di dati reali, mentre gli scienziati e i ricercatori nelle discipline di dominio mostrano un livello ridotto di alfabetizzazione computazionale, un'eccessiva dipendenza da strumenti specifici senza comprenderne i principi e un contatto tardivo con la risoluzione di problemi computazionali complessi. Le istituzioni accademiche devono fronteggiare curricula frammentati, competenze limitate del corpo docente, scarsa enfasi sulle pratiche di riproducibilità e un accesso inadeguato alle infrastrutture HPC per l'apprendimento pratico. Anche i professionisti impiegati in contesti privati incontrano ostacoli, come l'assenza di basi HPC nella formazione formale, percorsi di aggiornamento poco allineati, mancanza di certificazioni standardizzate e meccanismi di trasferimento di conoscenze insufficienti all'interno delle organizzazioni. A ciò si aggiungono lacune trasversali che colpiscono tutti i profili: scarsa attenzione alle tecnologie emergenti (come l'integrazione tra HPC e intelligenza artificiale o il calcolo quantistico), formazione insufficiente sulla gestione e la governance dei dati, limitata attenzione alla sostenibilità e all'impatto sociale, competenze carenti nella comunicazione interdisciplinare e metodi didattici che non riescono a coinvolgere efficacemente studenti con background diversi.

Attingendo ai quadri educativi in ambito scientifico e informatico, questo studio propone **dieci "Big Ideas[1]" fondamentali dell'HPC che dovrebbero guidare la progettazione dei curricula e la scelta degli approcci didattici.** Questi includono la comprensione del fatto che il calcolo ha limiti fisici e che possiamo spingerli oltre, il riconoscimento che il parallelismo è la chiave per la velocità e la scalabilità, la comprensione che le prestazioni derivano dall'abbinamento di problema, algoritmo e architettura, la consapevolezza che la scomposizione è fondamentale, la consapevolezza che la comunicazione può essere più costosa del calcolo, il riconoscimento che l'HPC richiede la collaborazione tra software e hardware, comprendere che la scoperta scientifica e l'innovazione ingegneristica dipendono dall'HPC, sapere che non tutti i problemi sono scalabili e alcuni non potranno mai esserlo, apprezzare che la riproducibilità e la precisione funzionino su larga scala e comprendere che le competenze HPC sono trasferibili e in evoluzione. Queste Big Ideas forniscono un quadro concettuale stabile che trascende le tecnologie in rapida evoluzione, consentendo agli educatori di progettare programmi di studio coerenti e aiutando gli studenti a comprendere l'HPC come una disciplina integrata piuttosto che come un insieme di strumenti scollegati.

Nella sezione finale, lo studio presenta **raccomandazioni per trasformare i programmi di istruzione e formazione in ambito HPC**. Le università dovrebbero incorporare i fondamenti dell'HPC nei corsi di laurea pertinenti piuttosto che trattarlo come un corso elettivo specializzato, garantendo un'esposizione precoce al pensiero parallelo e all'alfabetizzazione computazionale e adottando l'approccio delle "Big Ideas" per creare curricula strutturati e coerenti che enfatizzino principi duraturi rispetto alle tecnologie transitorie. Sviluppare capacità attraverso pratiche comuni per la formazione HPC, workshop di formazione per docenti e risorse didattiche condivise affronta la carenza critica di docenti e formatori qualificati, garantendo al contempo l'accesso ad ambienti HPC pratici attraverso piattaforme cloud, cluster educativi o partnership con centri HPC, fornisce un apprendimento esperienziale essenziale per comprendere la scalabilità, l'ottimizzazione delle prestazioni e la gestione dei sistemi. Le raccomandazioni sottolineano l'adattamento della formazione ai diversi profili degli studenti, incoraggiando al contempo la collaborazione interdisciplinare, riconoscendo che i computer scientist hanno bisogno di esposizione al dominio mentre gli scienziati del dominio hanno bisogno di basi computazionali. Il rafforzamento delle connessioni attraverso stage, progetti congiunti e il coinvolgimento di esperti del settore garantisce

[1] Una possibile traduzione in italiano del concetto di Big Ideas è "idee potenti". Nel white paper ci limiteremo però all'utilizzo del termine in lingua inglese.

che i curricula rimangano pertinenti alle esigenze in evoluzione del posto di lavoro e alle tecnologie emergenti. L'approccio integra la gestione dei dati, la governance dell'intelligenza artificiale, le considerazioni sulla sostenibilità e le tendenze tecnologiche emergenti come l'informatica quantistica e i gemelli digitali, per preparare i professionisti al panorama computazionale convergente, supportando al contempo iniziative inclusive, fornendo più punti di ingresso per gli studenti con background diversi e garantendo un accesso equo alle risorse e alle opportunità di formazione.

Questa ricerca getta le basi per la trasformazione sistematica della didattica dell'HPC, passando da approcci frammentati e ad hoc a una formazione coerente e basata su principi in grado di scalare per soddisfare le crescenti esigenze della forza lavoro, adattandosi al contempo all'evoluzione tecnologica. Il framework fornisce a educatori, decisori politici e leader del settore una guida pratica per lo sviluppo di programmi di formazione HPC efficaci, capaci di colmare l'attuale divario di competenze e preparare i professionisti alle sfide computazionali del futuro.

Autori
Eleonora Barelli, Head of Education and Foresight, Fondazione IFAB

Michael Lodi, Junior Assistant Professor nel Dipartimento di Informatica e Ingegneria, Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

Barelli, E., & Lodi, M. (2025). Le Big Ideas per la didattica dell'HPC: Dai bisogni esistenti nella formazione all'High-Performance Computing alle raccomandazioni per la progettazione educativa. Doi: 10.5281/zenodo.17107778

Funding Statement

Il lavoro di Eleonora Barelli è stato supportato dallo Spoke 0, "Supercomputing Cloud Infrastructure", del Centro Italiano di Ricerca sul Calcolo ad Alte Prestazioni, Big Data e Quantum Computing (ICSC), finanziato nell'ambito del MUR Missione 4 Componente 2 Investimento 1.4: Rafforzare le infrastrutture di ricerca e creare "campioni nazionali di ricerca e sviluppo" (M4C2-19) – Next Generation EU (NGEU).

Il lavoro di Michael Lodi è stato supportato dallo Spoke 1, "FutureHPC & BigData", del Centro Italiano di Ricerca sul Calcolo ad Alte Prestazioni, Big Data e Quantum Computing (ICSC), finanziato nell'ambito del MUR Missione 4 Componente 2 Investimento 1.4: Rafforzare le infrastrutture di ricerca e creare "campioni nazionali di ricerca e sviluppo" (M4C2-19) – Next Generation EU (NGEU).

Ringraziamenti

Desideriamo esprimere la nostra sincera gratitudine a tutti coloro che hanno contribuito a questa ricerca.

Grazie a tutti gli esperti che abbiamo intervistato per più di un anno per esplorare le basi dell'HPC in una prospettiva di ricostruzione didattica. Grazie in particolare a Marco Aldinucci (Università di Torino), Moreno Marzolla (Università di Bologna) ed Eric Pascolo (Cineca) che hanno condiviso con noi le loro intuizioni con straordinaria generosità intellettuale.

Grazie a tutti coloro che hanno risposto al questionario, sia in forma anonima che non. Si ringraziano in particolare Ludovic Capelli (CSIRO), Mary Chessey (Barcelona Supercomputing Center), Maksym Deliyergiyev (High-Performance Computing Center di Stoccarda), Ivan Gentile (Fondazione IFAB), Miriam Leeser (Northeastern University).

Un ringraziamento speciale va ai partecipanti di PIPSQUEAK, sia agli autori che al pubblico, nonché ai team di CASTIEL ed EUROCC per il loro inestimabile supporto e collaborazione. Grazie in particolare ad Aline Melinette (Barcelona Supercomputing Center) che ha promosso la nostra ricerca presso i membri dei network.

Riconosciamo il supporto e la guida dell'Advisory Board dell'Osservatorio ICSC che ha permesso alle nostre domande e ai nostri metodi di ricerca di essere costantemente allineati con le direzioni di ricerca e innovazione del Centro nazionale di supercalcolo ICSC. In particolare, ringraziamo Marco Aldinucci (Università di Torino), Renzo Giovanni Avesani (UnipolSai), Stefano Baroni (Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati), Sanzio Bassini (Cineca), Andrea Cavalli (Università di Bologna & Italian Institute of Technology), Carlo Cavazzoni (Leonardo), Paolo Cremonesi (Politecnico di Milano), Alessia D'Orazio (Fondazione ICSC),Giovanni Foresti (Intesa Sanpaolo), Serena Fumagalli (Intesa Sanpaolo), Silvio Gualdi (Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici), Giovanni Ginocchini (Fondazione Innovazione Urbana), Michael Lodi (Università di Bologna), Riccardo Malpica Grassi (Sapienza Università di Roma), Vito Morreale (Engineering), Marco Pistore (Fondazione Bruno Kessler), Antonino Rotolo (Università di Bologna), Davide Salomoni (Fondazione ICSC), Fabio Sciarrino (Sapienza Università di Roma), Luigi Terracciano (Humanitas), Matteo Zanaroli (Fondazione ICSC).

La revisione nella sezione Framework: Big Ideas si basa fortemente sul lavoro di M. Lodi con Marco Sbaraglia e Simone Martini, pubblicato nella tesi di dottorato di Sbaraglia (Sbaraglia, 2023, capitolo 4).

Sommario

Executive Summary 2
Ringraziamenti 5
Lo stato dell'arte della didattica dell'HPC 8
Competenze caratterizzanti e linee guida curriculari 8
Didattica dell'HPC nelle scuole secondarie 11
Didattica dell'HPC a livello universitario 13
Formazione all'HPC per professionisti 17
Iniziative esistenti in Italia e in Europa sulla didattica dell'HPC 21
Le iniziative dell'Osservatorio ICSC sulla didattica dell'HPC: Pipsqueak 27
Framework: le Big Ideas 30
Big Ideas nell'educazione scientifica 30
L'importanza delle Big Ideas 31
Come condensare le Big Ideas 33
Big Ideas dell'informatica 34
La ricerca 37
Domande di ricerca 37
Metodologia 37
Revisione della letteratura 37
Consultazione degli esperti 37
Stesura iterativa dei bisogni formativi e delle Big Ideas 38
Ricerca basata su questionario 38
Progettazione del questionario 38
Implementazione del questionario 40
Diffusione del questionario 40
Risultati 44
Esigenze emergenti e lacune formative nella didattica dell'HPC 44

Bisogni formativi per studenti e laureati in informatica 46
Bisogni formativi per studenti e ricercatori di dominio 47
Bisogni formativi in ambito accademico (docenti, studenti, ricercatori) 49
Bisogni formativi per professionisti e operatori dell'industria 50
Bisogni formativi trasversali 52
Le Big Ideas dell'HPC 55
Dai risultati alle raccomandazioni per la progettazione didattica 66
Conclusione 73
Bibliografia 74
Appendice – Analisi e risultati del questionario 78

Lo stato dell'arte della didattica dell'HPC

L'High-Performance Computing (HPC)[2] si riferisce a sistemi che corrispondono a ordini di grandezza più potenti dei sistemi standard come desktop o dispositivi mobili (Raj et al., 2020). Queste piattaforme possono risolvere in pochi minuti, o giorni, problemi che richiederebbero mesi o anni sui computer convenzionali, consentendo scoperte nella modellazione climatica, nella genomica, nella fisica, nell'ingegneria e nell'intelligenza artificiale. Sebbene l'HPC possa in linea di principio includere paradigmi come il calcolo quantistico, in questo documento ci concentriamo principalmente sull'HPC realizzato primariamente attraverso il calcolo parallelo e distribuito (PDC), che è alla base di quasi tutti gli attuali sistemi su larga scala (Raj et al., 2020).

Competenze caratterizzanti e linee guida curriculari

Un passo cruciale nella formazione HPC è la definizione dei concetti e delle competenze fondamentali che studenti e professionisti dovrebbero acquisire. Due importanti iniziative curricolari fungono da punti di riferimento globali.

L'iniziativa per il curriculum NSF/IEEE-TCPP

L'**Iniziativa per il curriculum NSF/IEEE-TCPP sul calcolo parallelo e distribuito** rappresenta uno sforzo globale di lunga data per incorporare il pensiero parallelo e distribuito nei corsi universitari di informatica e ingegneria. La sua **prima versione (2011-2012)** ha delineato un quadro sistematico per l'introduzione della concorrenza e del parallelismo nel curriculum universitario (Prasad et al., 2011).

Nel **2020**, l'iniziativa ha pubblicato un'importante rassegna (Prasad et al., 2020), che riflette la rapida evoluzione dell'hardware e delle applicazioni informatiche. Le linee guida aggiornate sottolineano che **tutti i laureati in informatica** dovrebbero acquisire una competenza di base nei concetti PDC, poiché questi permeano sia la progettazione esplicita del sistema, sia le applicazioni quotidiane che si basano su servizi distribuiti. Il curriculum rivisto organizza i contenuti in quattro livelli complementari:

[2] Sebbene a volte supercalcolo e HPC siano usati come sinonimi, tenderemo a parlare di HPC più in generale, di cui il supercalcolo è un sottoinsieme: https://www.ichec.ie/news/press-corner/about-high-performance-computing-hpc .

- **Concetti pervasivi** che attraversano il curriculum, tra cui **concorrenza, asincronia, località** e **prestazioni.** Questi vengono introdotti precocemente, spesso anche in Informatica 1 o Informatica 2, e rafforzati nei corsi su sistemi, architettura e algoritmi.
- **Aree principali di architettura, programmazione e algoritmi,** aggiornate per riflettere le piattaforme moderne. Ad esempio, la copertura dell'architettura ora si estende oltre le gerarchie di memoria per includere *meccanismi sottostanti* come la memorizzazione nella cache, l'atomicità e la coerenza; le linee guida di programmazione includono non solo modelli di memoria condivisa e distribuita, ma anche approcci ibridi e programmazione con acceleratori; gli argomenti relativi agli algoritmi enfatizzano la scalabilità, il calcolo data-intensive e i compromessi tra calcolo e comunicazione.
- **Aggiornamenti trasversali** che introducono priorità emergenti come **Big Data, efficienza energetica** e **calcolo distribuito.** Ad esempio, lo spostamento dei dati e la località sono inquadrati come colli di bottiglia centrali sia nella progettazione dell'algoritmo che del sistema; l'energia è trattata come una metrica delle prestazioni di primo ordine sia a livello di dispositivo che di sistema; e i concetti di calcolo distribuito sono introdotti in precedenza, riflettendo l'ubiquità del cloud e delle applicazioni collaborative.
- **Temi emergenti,** riservati principalmente a corsi avanzati o opzionali, che evidenziano aree in evoluzione come le architetture GPU/TPU, il cloud e l'edge computing e l'analisi dei dati su larga scala.

Una caratteristica distintiva dell'iniziativa TCPP è la sua **filosofia incentrata sull'integrazione:** invece di relegare il parallelismo a un corso di studi a sé stante, sostiene la distribuzione di *argomenti PDC in tutto il curriculum*. Ciò include l'insegnamento della concorrenza nella programmazione introduttiva, la discussione della coerenza della cache nei corsi sui sistemi e l'esplorazione del parallelismo negli algoritmi, unito alle loro controparti sequenziali.

Le raccomandazioni ACM 2023 sulla PDC

Il report **ACM Computing Curricula 2023 (CC2023)** si basa sull'iniziativa TCPP, rendendo il calcolo parallelo e distribuito un'area di conoscenza trasversale tra i programmi di calcolo (ACM, 2023). Il suo quadro identifica le competenze in diversi settori:

- **Nozioni fondamentali:** concorrenza, scomposizione delle attività, esecuzione parallela e scalabilità.
- **Modelli di programmazione:** thread, OpenMP, MPI, programmazione GPU e framework distribuiti come MapReduce o Spark.
- **Sistemi e architetture:** processori multicore/manycore, reti di interconnessione, sistemi cluster e cloud.
- **Progettazione e analisi:** algoritmi paralleli, modelli di performance e compromessi tra calcolo e comunicazione.
- **Ingegneria del software:** debugging, profilazione, analisi delle prestazioni e riproducibilità in HPC.
- **Applicazioni ed etica:** HPC per l'AI, la scienza dei dati e la scoperta scientifica, con attenzione alla sostenibilità e al calcolo responsabile.

Rispetto alle linee guida TCPP, il CC2023 pone maggiore enfasi sul calcolo eterogeneo e basato su acceleratori, nonché sui collegamenti ad aree emergenti come l'intelligenza artificiale e l'analisi dei dati. Incoraggia inoltre esplicitamente i programmi di studio modulari e basati sulle competenze e le microcredenziali.

Didattica dell'HPC nelle scuole secondarie

L'integrazione dei concetti HPC a livello di scuola secondaria superiore è agli inizi. Tradizionalmente, il supercalcolo e la programmazione parallela erano considerati troppo avanzati per i curricula primari/secondari. Tuttavia, con l'ubiquità dei dispositivi multicore e la crescente importanza dell'informatica nella nostra società, **docenti ed educatori stanno sperimentando modi per introdurre idee fondamentali di HPC e calcolo parallelo agli studenti più giovani**. Una domanda centrale è se gli studenti delle scuole secondarie siano in grado di comprendere i fondamenti della programmazione parallela e trovarli coinvolgenti. In modo incoraggiante, le ricerche iniziali indicano che ciò è possibile: uno studio condotto nelle scuole superiori croate, ad esempio, ha rilevato che gli studenti erano in grado di comprendere concetti come *race conditions* e di valutare programmi paralleli, giudicando i contenuti altrettanto interessanti e utili (seppur leggermente più impegnativi) rispetto ad altri argomenti di informatica (Brođanac et al., 2022). Ciò suggerisce che, **se insegnati in modo appropriato, anche i concetti HPC complessi possono essere introdotti ad adolescenti**.

La didattica dell'HPC per la scuola secondaria superiore assume spesso la forma di workshop extracurriculari, apprendimento basato su progetti o attività integrate STEM, piuttosto che corsi formali. Un approccio di successo è il "learning by doing!, che offre agli studenti un'esperienza concreta con configurazioni HPC semplificate. Ad esempio, l'Universidad de Buenos Aires ha riferito di aver organizzato laboratori scientifici in cui gli studenti delle scuole secondarie hanno costruito e sperimentato un mini-cluster HPC, promuovendo l'interesse attraverso la risoluzione attiva dei problemi e la collaborazione (Slezak et al., 2009). Negli Stati Uniti, alcuni programmi di scuola superiore e campi estivi hanno sfruttato cluster su piccola scala per insegnare le basi del calcolo parallelo. La disponibilità di hardware cluster portatile e conveniente è stata un punto di svolta. In particolare, gli educatori hanno implementato mini-cluster basati su Raspberry Pi come "supercomputer" accessibili per la classe. L'Holland Computing Center dell'Università del Nebraska ha sviluppato "Legion", un cluster Raspberry Pi, specifico per la scuola secondaria superiore; questo mini-supercomputer portatile ha consentito dimostrazioni interattive e sessioni di formazione che hanno introdotto gli studenti ai principi dell'HPC in modo tangibile (Bohn & Brown, 2020). Allo stesso modo, il progetto di lunga data LittleFe ha fornito un cluster portatile a 6 nodi (del peso di circa 22 kg e assemblato per poche migliaia di dollari) come "dispositivo educativo" per l'insegnamento del calcolo parallelo ovunque (Ludin et al., 2013). Più recentemente, i ricercatori austriaci hanno progettato il Cluster Coffer, un mini-cluster

basato su ARM a 16 nodi, per ridurre la barriera all'ingresso per la didattica dell'HPC; è economico, facile da trasportare ed è stato utilizzato sia in aula che in eventi di sensibilizzazione del pubblico (Gschwandtner et al., 2021). Questi cluster su piccola scala consentono agli studenti di sperimentare l'esecuzione di processi in parallelo, vedere accelerazioni in tempo reale e persino partecipare a versioni semplificate delle sfide di supercalcolo.

Un'altra strada per una prima formazione all'HPC è **incorporare il pensiero parallelo nei programmi di calcolo o scientifici esistenti senza richiedere l'accesso effettivo ai supercomputer**. Attività PDC "unplugged" (Matthews, 2020) – che insegnano concetti paralleli attraverso analogie o giochi. Ad esempio, gli insegnanti potrebbero illustrare l'elaborazione parallela facendo simulare a gruppi di studenti processori che lavorano su sotto attività di un problema più grande. Tali esercizi concettuali possono piantare i semi del pensiero parallelo anche quando l'hardware non è disponibile.

Gli strumenti di programmazione parallela basati su blocchi sono stati esplorati per trasmettere astrazioni di programmazione parallela, tra cui produttore-consumatore, capo-lavoratore e MapReduce (Feng et al., 2015).

Anche le competizioni e gli eventi motivano gli studenti: l'annuale Student Cluster Competition alle principali conferenze HPC ora presenta occasionalmente squadre di studenti delle scuole superiori che competono insieme a team universitari per costruire e ottimizzare un piccolo sistema di cluster in una sfida di quarantotto ore[3]. Tali esperienze non solo creano competenze tecniche, ma anche entusiasmo e consapevolezza riguardo alle carriere possibili nel campo dell'HPC.

Nonostante questi sforzi promettenti, **la scalabilità dell'istruzione HPC nelle scuole primarie e secondarie deve affrontare delle sfide**. Un problema è il già affollato curriculum delle scuole secondarie superiori: l'introduzione di argomenti HPC (che non fanno parte dei regimi di test standard) fa affidamento solo su insegnanti appassionati o programmi esterni. La preparazione degli insegnanti è un altro ostacolo: la maggior parte dei docenti di scuola secondaria ha poca o nessuna esperienza nel calcolo parallelo e le iniziative per formare gli insegnanti stessi (attraverso seminari di sviluppo professionale) sono quindi fondamentali (Saule et al., 2021). Anche la questione della progettazione appropriata del curriculum è cruciale: è infatti necessario identificare quali concetti HPC sono adatti all'età degli studenti e come contestualizzarli all'interno

[3] https://tacc.utexas.edu/research/tacc-research/student-cluster/

del corso. Il successo dello studio croato è stato in parte dovuto a un'attenta strutturazione, che ha collegato la programmazione parallela a concetti familiari (programmazione di rete e problemi che gli studenti avevano visto in precedenza) e ha limitato l'ambito ai principi fondamentali all'interno di un corso breve. Questo tipo di strategia pedagogica deve essere generalizzata e condivisa. Iniziative come il curriculum del gruppo di lavoro NSF/IEEE-TCPP riconoscono anche l'importanza dell'esposizione precoce: mentre il loro obiettivo principale è l'università, lo spirito delle loro raccomandazioni – che il parallelismo è ora una competenza fondamentale – supporta l'introduzione di idee chiave anche prima dell'università.

Didattica dell'HPC a livello universitario

Le università sono state la sede tradizionale dell'istruzione HPC, sia attraverso corsi specializzati in programmi di informatica, sia attraverso la formazione all'interno di curricula delle scienze di dominio. Nell'ultimo decennio, c'è stata una nuova spinta verso l'integrazione di argomenti del calcolo parallelo e distribuito nel curriculum universitario di base, riflettendo un cambiamento di paradigma nell'hardware di calcolo (la fine del ridimensionamento della frequenza e l'ascesa dei sistemi multicore e basati su GPU). Grazie alle iniziative curriculari di cui abbiamo parlato in precedenza, sempre più università a livello globale stanno introducendo le basi del parallelismo (ad esempio thread, programmazione multicore, GPU computing o paradigmi message-passing) sia nei corsi introduttivi, sia come elettivi da completare prima che gli studenti si laureino.

L'implementazione di HPC/PDC a livello universitario assume varie forme. Alcuni programmi **incorporano argomenti paralleli nei corsi esistenti** (ad esempio, la modifica di un corso su strutture dati o sistemi operativi per includere compiti multithreading), mentre altri creano **nuovi corsi incentrati su algoritmi paralleli**, sistemi distribuiti o calcolo ad alte prestazioni. Sono emersi anche un certo numero di **programmi interdisciplinari:** ad esempio, un progetto in un college di arti liberali ha descritto una sequenza di tre semestri in cui studenti di diversi ambiti hanno appreso in modo collaborativo la programmazione parallela applicata a vari domini (Morris & Frinkle, 2014). La letteratura suggerisce che l'**apprendimento attivo e gli approcci basati su progetti sono particolarmente efficaci nell'educazione HPC**. Gli studenti traggono vantaggio dal "learning by doing", lavorando su progetti che richiedono la scrittura e l'ottimizzazione del codice su un vero hardware parallelo. Una revisione sistematica (Mwasaga & Joy, 2020b) di 211 articoli educativi sull'HPC (1988-2018) ha rilevato che la maggior parte

degli interventi educativi ha sfruttato i cluster di Beowulf, e sistemi multi-nodo simili, come strumenti pedagogici, sottolineando l'importanza dell'accesso pratico alle risorse di calcolo parallelo. Molte università gestiscono un cluster HPC per i campus o sfruttano le allocazioni nazionali di supercomputing per l'uso in aula, offrendo agli studenti l'inestimabile esperienza di esecuzione e scalabilità dei loro programmi in ambienti HPC reali. Laddove non è disponibile hardware dedicato, i professori si sono rivolti al **cloud computing o ai simulatori per approssimare le condizioni HPC** (ad esempio, utilizzando macchine virtuali cloud per creare un cluster virtuale per un corso). L'uso di mini-cluster portatili (come i cluster LittleFe o Raspberry Pi menzionati in precedenza) è comune anche nei laboratori universitari o nei progetti capstone, portando l'esperienza di un supercomputer in classe. Un approccio recente, in linea con le tendenze "maker", consiste nel far costruire agli studenti un piccolo cluster come parte di un corso, non solo insegnando concetti di architettura HPC, ma infondendo anche competenze pratiche sui sistemi (Vargas-Pérez, 2022).

Per supportare i docenti, la **comunità educativa HPC ha condiviso attivamente materiali e strategie curriculari**. Workshop come EduPar (Education in Parallel and Distributed Computing, co-localizzato con IEEE IPDPS) e EduHPC (tenuto in concomitanza con le conferenze ACM/IEEE Supercomputing) agiscono come forum per gli educatori, dove questi possono presentare report sulle loro esperienze, nuovi strumenti e novità della ricerca pedagogica. Sono stati inoltre curati modelli di assegnazione e modelli pedagogici, come i "Peachy Parallel Assignments", che si basano su esercizi di programmazione parallela adottabili e sottoposti a revisione paritaria, per facilitarne l'adozione da parte dei docenti (Bücker et al., 2023). Questi sforzi della comunità affrontano una sfida fondamentale: **molti professori di informatica non hanno ricevuto una formazione formale in HPC o programmazione parallela, e quindi potrebbero sentirsi mal preparati a insegnarla**. Iniziative come il programma per gli early adopter NSF/TCPP e il Center for Parallel Computing Education (CDER) forniscono moduli pronti all'uso e workshop di formazione per insegnati, aiutando ad oltrepassare queste barriere. Tuttavia, le competenze dei formatori rimangono un problema; un paper di posizionamento di Saule et al. sostiene che senza una "forza d'attacco" della comunità per sviluppare e diffondere il courseware, l'adozione del PDC nei curricula continuerà più lentamente del necessario (Saule et al., 2021).

Oltre all'istruzione universitaria di base, l'HPC costituisce una componente significativa dei diplomi universitari e professionali. Molte università offrono master specializzati o focus sull'HPC, scienze computazionali o ingegneria del software parallelo.

Questi programmi in genere approfondiscono l'architettura del supercalcolo, gli algoritmi paralleli, l'ottimizzazione delle prestazioni e le applicazioni HPC nella scienza e nell'ingegneria. Oggi, decine di università in tutto il mondo hanno percorsi HPC formali: in Europa, un'iniziativa particolarmente degna di nota è l'EUMaster4HPC, descritta nel prossimo paragrafo. Il successo di tali programmi conferma la necessità di un modello per **coltivare le competenze HPC attraverso una formazione immersiva e multi-istituzionale,** che potrebbe essere replicato in altre regioni o a livello globale.

Le università si stanno adeguando tramite l'aggiornamento di più corsi – non solo quelli intitolati "HPC" – per riflettere il parallelismo. Ad esempio, un corso sui database potrebbe toccare l'elaborazione distribuita dei dati, o un corso sugli algoritmi potrebbe analizzare la complessità degli algoritmi paralleli. L'obiettivo generale è garantire che i laureati abbiano il background concettuale necessario per prosperare in un mondo in cui l'informatica è intrinsecamente parallela e distribuita. I corsi specifici per l'HPC per gli studenti che perseguono carriere ad alta intensità di informatica partono quindi da questa base.

L'istruzione HPC a livello universitario deve affrontare una serie di sfide. Un problema perenne è **mantenere i programmi di studio aggiornati con i rapidi cambiamenti tecnologici**. Gli ecosistemi hardware e software HPC si evolvono rapidamente (si consideri l'ascesa del GPU computing generico nell'ultimo decennio o l'attuale emergere di architetture eterogenee e ricche di acceleratori). Gli educatori sentono la necessità di aggiornare costantemente i contenuti dei corsi, aggiungendo argomenti come la programmazione CUDA o SYCL per GPU, l'utilizzo di moderne librerie parallele o l'HPC per l'analisi dei dati e i carichi di lavoro di intelligenza artificiale, il che può mettere a dura prova il tempo e le competenze dei docenti. **La necessità di hardware accessibile è un'altra sfida**: non tutte le istituzioni dispongono di un supercomputer locale per gli studenti e, anche quando succede, scalare i compiti a più dozzine di studenti può essere complicato. Le soluzioni basate sul cloud e le allocazioni didattiche condivise sui sistemi nazionali stanno mitigando questo problema, garantendo agli studenti account sui sistemi HPC per i corsi, **c'è infatti un crescente sostegno per le risorse educative aperte**. Materiali come le lezioni di HPC Carpentry (descritte nella sezione successiva) e gli archivi di compiti di programmazione parallela aiutano a ridurre lo sforzo di sviluppo per i formatori. Un'altra tendenza è l'uso di **progetti interdisciplinari per insegnare l'HPC**: ad esempio, studenti di informatica hanno collaborato con studenti di fisica o bioinformatica per ottimizzare un vero codice di simulazione. Questa collaborazione non solo rispecchia gli scenari reali dei team HPC, ma porta anche studenti da

domini applicativi diversi ad apprendere le competenze HPC rilevanti per i loro campi. Anche l'espansione dei programmi di data science ha avuto un buon effetto: **una parte della formazione all'HPC viene ora erogata sotto la bandiera di corsi "big data" o "infrastruttura AI",** che riflettono un'intersezione tra HPC, analisi dei dati ad alte prestazioni (HPDA) e apprendimento automatico.

Formazione all'HPC per professionisti

La formazione HPC non si esaurisce con l'istruzione formale: infatti, dato il ritmo dell'innovazione, lo sviluppo professionale continuo è essenziale per ricercatori, ingegneri e professionisti IT per utilizzare efficacemente le risorse informatiche avanzate. Questa categoria di formazione HPC comprende formazione sul posto di lavoro, corsi brevi, programmi di certificazione e workshop rivolti agli attuali professionisti (del mondo accademico, dell'industria o del governo) che cercano di migliorare o riqualificare le tecniche di calcolo ad alte prestazioni. Si presenta inoltre un aspetto critico per lo sviluppo della forza lavoro: **i governi e le industrie che investono nell'infrastruttura HPC vogliono garantire una pipeline di personale qualificato, in grado di sfruttare tali sistemi per ottenere vantaggi scientifici ed economici**.

Molti centri e laboratori HPC nazionali ospitano regolarmente eventi di formazione. Ad esempio, i laboratori del Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti organizzano tutorial e scuole estive aperte alla comunità: un'offerta di punta è l'Argonne Training Program on Extreme-Scale Computing (ATPESC), un programma residenziale intensivo di due settimane che ogni anno riunisce circa 70 ricercatori all'inizio della carriera per apprendere strumenti e metodi HPC all'avanguardia (dalla programmazione MPI/OpenMP all'ottimizzazione delle prestazioni su architetture di nuova generazione)[4]. In genere i partecipanti devono avere già una certa esperienza di programmazione parallela, in quanto il curriculum è progettato per portarli al livello successivo di competenza. Programmi come l'ATPESC esemplificano come la formazione professionale possa colmare le lacune tra ciò che l'istruzione formale fornisce e le competenze necessarie per sfruttare le macchine leadership-class. Allo stesso modo, in Europa, la Partnership for Advanced Computing in Europe (PRACE) organizza storicamente scuole e workshop stagionali nei suoi centri di supercalcolo membri, gratuitamente per i partecipanti, per diffondere le migliori pratiche HPC. Si va dai corsi introduttivi (ad esempio "HPC per principianti" che spiegano come accedere ed eseguire lavori su un cluster) ai workshop specializzati su argomenti come la programmazione GPU, l'ottimizzazione del codice o l'HPC per domini scientifici specifici. Durante il periodo 2020-2022**, la rete europea di centri di competenza HPC nazionali ha organizzato collettivamente un centinaio di eventi di formazione** (nonostante la pandemia), trattando competenze

[4] https://extremecomputingtraining.anl.gov/

chiave sia per i nuovi utenti HPC che per quelli avanzati, apportando un significativo aumento delle opportunità di formazione rivolte a ricercatori e professionisti.

Una tendenza notevole nella formazione professionale HPC è l'adozione di approcci interattivi e incentrati sullo studente, simili a quelli utilizzati nei workshop di software Carpentry. Un esempio importante è l'HPC Carpentry (Reid et al., 2025), un programma di formazione community-driven che adatta i principi di The Carpentries[5] (un'organizzazione nota per i suoi efficaci workshop di programmazione di base e scienza dei dati) al contesto HPC. I workshop di HPC Carpentry durano in genere 1-2 giorni e sono progettati per i principianti che non hanno mai utilizzato un supercomputer: formatori e studenti lavorano insieme in sessioni di codifica dal vivo, digitando comandi nel terminale per esercitarsi in attività come la navigazione in un ambiente Linux, la gestione dei pianificatori di processi e l'esecuzione di semplici processi paralleli. La pedagogia enfatizza infatti la costruzione della "memoria muscolare" e la demistificazione degli errori: i formatori dimostrano intenzionalmente gli errori comuni e come risolverli, il che aiuta a ridurre la ritrosia dei partecipanti verso i sistemi HPC. I contenuti sono modulari, open-source e continuamente perfezionati da una comunità globale, garantendo l'aggiornamento e l'efficacia dei workshop. Fornendo un curriculum standardizzato e scalabile, HPC Carpentry mira a "democratizzare l'accesso all'HPC", consentendo ai ricercatori di settori HPC non tradizionali o di istituzioni più piccole di acquisire le competenze per utilizzare cluster moderni (Reid et al., 2024). Ciò risulta fondamentale in quanto l'HPC è rilevante non solo per gli scienziati computazionali, ma anche per discipline come la biologia, la medicina, la finanza e le arti, dove i professionisti potrebbero non aver avuto una formazione HPC.

L'ascesa della didattica online ha avuto un impatto significativo sulla formazione HPC. Molti centri HPC offrono ora webinar, serie di conferenze virtuali e tutorial registrati a cui i professionisti possono accedere on-demand. Ad esempio, nel periodo 2020-2021, numerosi eventi di formazione HPC in presenza si sono orientati verso formati virtuali, che in alcuni casi ne hanno aumentato la portata (geografica e di partecipazione). Sono stati sviluppati anche i MOOC (Massive Open Online Courses) HPC. Un primo esempio è stato il MOOC "HPC Parallel Programming" dell'Università di Edimburgo (attraverso PRACE e FutureLearn), che ha introdotto migliaia di studenti alle basi del supercalcolo e del calcolo parallelo. Un altro, "HPC for Computational Scientists" su edX, ha fornito ai ricercatori del settore competenze HPC. Sebbene i MOOC affrontino la

[5] https://carpentries.org/

tipica sfida della fidelizzazione, fungono da preziosi funnel introduttivi e riferimenti. Inoltre, i programmi di estensione universitaria e gli istituti tecnici stanno iniziando a offrire programmi di certificazione in HPC o programmazione parallela, spesso forniti online ai professionisti che lavorano. Questi in genere comportano una serie di corsi che culminano in un certificato che attesta la competenza HPC. Un esempio italiano è l'International Professional Programme in "HPC and quantum computing", un programma da 60 ECTS dell'Università di Bologna, frutto della collaborazione tra i Dipartimenti di Fisica e Informatica e Ingegneria.

Uno sviluppo recente nel panorama professionale dell'HPC è il movimento verso la formalizzazione delle competenze e della certificazione HPC. L'HPC Certification Forum, una comunità internazionale di formatori ed esperti di HPC, ha lavorato per definire un albero di competenze completo per i professionisti dell'HPC[6]. Il loro obiettivo è quello di classificare e standardizzare le aree di conoscenza (dall'utilizzo della shell e dalla pianificazione dei lavori all'ingegneria delle prestazioni e alle librerie matematiche) in competenze granulari e di **sviluppare esami che portino a una certificazione HPC riconosciuta a livello globale** (Kunkel et al., 2020). Entro il 2023, questo sforzo è progredito con i test degli esami di certificazione beta, con l'obiettivo di fornire ai datori di lavoro e alle organizzazioni un modo per valutare i livelli di competenza HPC e guidare gli studenti su quali competenze dovrebbero acquisire. Se adottata su larga scala, tale certificazione potrebbe diventare simile al modo in cui le certificazioni Cisco funzionano nel networking, creando una comprensione comune di cosa significhi essere un professionista "certificato HPC". Questo approccio basato sulle competenze è utile anche per la progettazione di programmi di studio e tabelle di marcia per la formazione: ad esempio, il nuovo progetto EVITA (European Virtual Training Academy) di EuroHPC cerca esplicitamente di stabilire un quadro europeo di competenze e qualifiche HPC[7]. EVITA prevede di fornire materiali didattici di riferimento e unità di apprendimento modulari mappate su competenze specifiche, supportando così standard di formazione coerenti per studenti, professionisti ed educatori in tutta Europa. Tali quadri garantiscono che un professionista che segue un corso HPC in un determinato paese apprenda contenuti in linea con ciò che viene insegnato altrove, **facilitando il riconoscimento delle competenze e la mobilità**.

[6] https://www.hpc-certification.org/
[7] https://www.eurohpc-ju.europa.eu/research-innovation/our-projects/evita_en

L'HPC è penetrato nei settori industriali (manifatturiero, farmaceutico, finanziario, ecc.), il che significa che le aziende cercano sempre più di formare la propria forza lavoro in HPC e analisi avanzate. La formazione HPC per l'industria spesso pone l'accento sull'applicazione pratica e sul ROI: ad esempio, **EuroCC Italia nel 2025 ha offerto un corso intitolato "High-Performance Computing for Digital Transformation"** specifico per i dirigenti aziendali e il personale di ricerca e sviluppo[8]. L'attenzione si è concentrata sulla comprensione di come l'HPC possa accelerare l'innovazione aziendale, con casi di studio reali sull'integrazione di HPC, intelligenza artificiale e simulazione nei processi industriali. Adattando i contenuti a un pubblico non accademico (meno teoria, più strategia ed esempi applicati), tali corsi aiutano a **demistificare l'HPC per dirigenti e manager, favorendo una più ampia adozione nelle piccole e medie imprese**. Un'altra forma di formazione HPC sul posto di lavoro è attraverso **corsi guidati dai fornitori**; i produttori di supercomputer o software (come NVIDIA per il calcolo GPU o gli sviluppatori di librerie MPI) spesso forniscono formazione ai loro utenti. Inoltre, i programmi di mentorship e il "gemellaggio" tra centri HPC esperti e organizzazioni nuove all'HPC si sono dimostrati efficaci. Il progetto CASTIEL in Europa, ad esempio, ha facilitato il mentoring e il gemellaggio tra paesi per condividere le competenze HPC, abbinando efficacemente i team meno esperti con i centri veterani per il trasferimento delle conoscenze[9], non solo formando gli individui, ma costruendo anche anche la capacità istituzionale.

Una sfida costante è rappresentata **dall'aggiornamento dei contenuti di formazione con lo stato dell'arte**. I professionisti HPC devono apprendere nuovi modelli di programmazione, strumenti e paradigmi man mano che emergono (ad esempio, il recente aumento della containerizzazione e della convergenza cloud-HPC o la necessità di apprendere acceleratori come i chip AI). I corsi di formazione devono aggiornare regolarmente i loro programmi, il che richiede una stretta collaborazione tra i formatori e i progetti HPC all'avanguardia. Un'altra sfida è **la valutazione dell'impatto:** a differenza dell'istruzione formale, i risultati della formazione professionale possono essere più difficili da misurare. Le organizzazioni spesso si affidano a sondaggi di feedback o monitorano se i tirocinanti continuano a utilizzare efficacemente le risorse HPC nel loro lavoro (ad esempio, aumento delle prestazioni del software o completamento di

[8] https://euroccitaly.it/en/news/high-performance-computing-for-digital-transformation-a-new-training-course-by-eurocc-italy/
[9] https://www.hlrs.de/news/detail/eurocc-national-competence-centers-hold-first-all-hands-conference

progetti con successo) come indicatori del successo della formazione. Anche la diversità del pubblico gioca un ruolo importante: il range degli studenti professionisti dell'HPC può variare da scienziati di settore con poca esperienza in informatica a specialisti IT che necessitano di competenze di ottimizzazione. Progettare una formazione in grado di soddisfare diversi prerequisiti non è banale; i contenuti modulari e basati sulle competenze, come quelli proposti da EVITA e dall'HPC Certification Forum, possono contribuire a consentire percorsi di apprendimento su misura.

Conferenze come SC e ISC presentano regolarmente workshop come "Best Practices in HPC Training" e sessioni Birds-of-a-Feather in cui i formatori discutono di ciò che funziona (e ciò che non funziona) nella formazione HPC per adulti[10]. L'opinione generale è che l'apprendimento interattivo e pratico, sia attraverso workshop in stile HPC Carpentry, hackathon o sessioni guidate di risoluzione dei problemi, sia molto più efficace dei tradizionali metodi formati di sole lezioni per l'acquisizione delle competenze.

Iniziative esistenti in Italia e in Europa sulla didattica dell'HPC

Negli ultimi anni l'Europa ha avviato uno sforzo globale e a più livelli per rafforzare la formazione in materia di HPC nell'ambito della sua più ampia strategia di supercalcolo. Riconoscendo che l'infrastruttura HPC di livello mondiale per poter essere sfruttata deve essere abbinata a una forza lavoro qualificata, l'Unione Europea e i governi nazionali hanno investito in programmi che variano tra il mondo accademico, la formazione industriale e la creazione di reti tra i centri HPC. In questa sezione si evidenziano diverse iniziative chiave europee, comprese quelle che coinvolgono l'Italia, che illustrano un approccio coordinato allo sviluppo delle competenze HPC. Tra questi figurano i **progetti educativi dell'EuroHPC Joint Undertaking**, la rete dei centri di competenza nazionali EuroCC e il suo braccio di coordinamento CASTIEL, il pionieristico programma di master paneuropeo (EUMaster4HPC) e nuovi progetti volti a unificare i materiali di formazione in tutto il continente. Insieme, questi sforzi fanno dell'Europa un caso di studio su come il sostegno guidato dalle politiche possa elevare la didattica dell'HPC su larga scala.

[10] https://sighpceducation.acm.org/events/bphte25cfp/

L'ecosistema HPC europeo investe da tempo nella formazione e nello sviluppo della forza lavoro. Il **Partenariato per l'informatica avanzata in Europa (PRACE)** gestiva una rete di 14 centri di formazione PRACE, che offrivano un programma di studi all'avanguardia di corsi brevi e workshop in HPC e scienze computazionali in tutta l'UE[11]. Questi includono moduli sulla programmazione MPI/OpenMP, sulla programmazione GPU, sull'ottimizzazione del codice e sulle tecniche HPC specifiche del dominio, forniti a migliaia di ricercatori e studenti.

Nel 2020, nell'ambito dell'EuroHPC Joint Undertaking, **EuroCC ha istituito centri di competenza HPC in 33 paesi** (membri e partner dell'UE) per fungere da hub nazionali per le competenze HPC[12]. Ogni Centro di Competenza Nazionale – National competence Center (NCC) aveva il compito di valutare le competenze e le risorse locali in materia di HPC, identificando le lacune e fungendo da punto focale per la formazione, la sensibilizzazione dell'industria e il supporto all'interno del proprio paese. Parallelamente, è **stato finanziato il progetto CASTIEL (Coordination and Support Action)** per promuovere l'interazione e lo scambio tra questi NCC a livello europeo[13]. CASTIEL ha posto l'accento su aree come la formazione, l'impegno industriale e la condivisione delle best practices, garantendo essenzialmente che nessun centro del paese operi in isolamento. Attraverso il coordinamento di CASTIEL, la rete NCC ha implementato standard comuni e attività collaborative, aumentando la qualità complessiva della formazione e dei servizi HPC in tutta Europa[14]. Alla fine della prima fase (2020-22), l'impatto è stato significativo: come già accennato, nonostante sfide come la pandemia, gli NCC hanno organizzato collettivamente almeno 95 corsi di formazione e 60 workshop su temi prioritari dell'HPC, raggiungendo diverse comunità di utenti. CASTIEL ha anche creato una mappa delle competenze HPC a livello europeo e il portale web EuroCC Access (ora portale HPC), dove chiunque (dal mondo accademico, dall'industria o dal settore pubblico) può trovare informazioni sulle offerte di formazione HPC e sulle competenze disponibili in ogni paese[15].

L'Italia ha partecipato attivamente a EuroCC e CASTIEL. Il Centro di Competenza Nazionale (EuroCC Italy) è coordinato dal CINECA (il più grande consorzio italiano di supercalcolo) insieme a Fondazione IFAB, BI-REX, Dompè e Leonardo Company.

[11] https://prace-ri.eu/prace-association/
[12] https://www.eurohpc-ju.europa.eu/research-innovation/our-projects/eurocc_en
[13] https://www.eurohpc-ju.europa.eu/research-innovation/our-projects/castiel_en
[14](https://www.hpcwire.com/off-the-wire/eurocc-and-castiel-begin-2nd-funding-phase
[15] https://hpc-portal.eu/

EuroCC Italy fornisce corsi di formazione gratuiti in HPC, analisi dei dati ad alte prestazioni (HPDA) e intelligenza artificiale, rivolti sia ai ricercatori accademici che agli utenti del settore[16]. Un esempio recente, come detto, è il corso sull'HPC per la Digital Transformation rivolto alle aziende, che riflette la strategia dell'Italia di estendere il know-how HPC nella propria base industriale. Inoltre, il CINECA è stato direttamente coinvolto nel consorzio CASTIEL, il che significa che gli esperti italiani hanno contribuito allo scambio di metodologie di formazione a livello europeo. Le istituzioni italiane si sono anche impegnate in progetti di gemellaggio nell'ambito di CASTIEL per fare da mentore o imparare da altri paesi in specifiche aree di competenza, promuovendo un trasferimento di conoscenze bidirezionale.

Sulla base del successo iniziale, nel 2023 sono stati avviati EuroCC 2 e CASTIEL 2 come seconda fase, grazie a nuovi finanziamenti dal programma Europa digitale dell'UE[17]. Questi progetti continuano a lavorare sulla missione per altri tre anni, ampliando l'offerta formativa e approfondendo la cooperazione. CASTIEL 2 pone particolare attenzione alle collaborazioni di formazione avanzata (come corsi sviluppati congiuntamente), alle certificazioni e all'integrazione di argomenti emergenti come l'informatica quantistica ed edge nella rete di competenze (sebbene l'educazione quantistica rimanga distinta, l'HPC e il quantum sono talvolta affrontati fianco a fianco nell'ambito di EuroHPC), con un budget di circa 3 milioni di euro, questo programma è destinato ad armonizzare ulteriormente la formazione HPC in tutta Europa, continuando inoltre a incoraggiare il "gemellaggio" e le mentorship: a metà del 2023 si erano formate task force nell'ambito di CASTIEL 2 per condividere competenze su settori specifici e coordinare lo sviluppo di nuovi contenuti.

L'impegno dell'Europa per rafforzare le competenze in materia di HPC ha riguardato anche l'istruzione formale. L'iniziativa accademica di punta è stata **EUMaster4HPC, il primo programma di Master paneuropeo in HPC** lanciato alla fine del 2022. Coordinato dall'Università del Lussemburgo e finanziato da EuroHPC JU, EUMaster4HPC ha riunito un consorzio di università leader (tra cui Politecnico di Milano, Sorbonne Université, Universitat Politècnica de Catalunya e altre), istituti di ricerca e partner industriali[18]. Un obiettivo primario è quello di progettare un curriculum di riferimento comune per l'HPC che possa essere adottato in tutta Europa (Bouvry et al., 2025). Il programma è

[16] https://euroccitaly.it/en/
[17] https://www.eurohpc-ju.europa.eu/eurocc-2-and-castiel-2-promoting-hpc-boost-digital-skills-jobs-and-industrial-competitiveness-europe-2023-02-03_en
[18] https://eumaster4hpc.uni.lu/

stato progettato con una filosofia di "mobilità ed eccellenza": gli studenti studieranno in due paesi (conseguendo diplomi da due istituzioni) e seguiranno un curriculum sviluppato congiuntamente che riflette le esigenze dei futuri sistemi e applicazioni HPC[19]. Nell'arco di due anni (120 crediti ECTS), il curriculum ha riguardato l'architettura HPC avanzata, i modelli di programmazione parallela, gli algoritmi, la matematica per l'HPC e gli elettivi basati su casi d'uso (come l'HPC per le scienze della vita o la modellazione del clima). Fondamentalmente, EUMaster4HPC aveva forti componenti pratiche: ogni coorte ha frequentato le scuole estive HPC europee, ha partecipato a competizioni internazionali (ad esempio, le competizioni di cluster studenteschi ISC/SC o gli hackathon) e ha intrapreso un tirocinio di tesi presso un centro di supercalcolo o un laboratorio di ricerca e sviluppo industriale. Questa miscela di rigore accademico ed esperienza nel mondo reale mirava a produrre professionisti "a forma di T": una profonda competenza tecnica HPC combinata con competenze trasversali più ampie e un'esposizione al dominio. Il programma ha anche fornito generose borse di studio ed esenzioni dalle tasse, sostenute da finanziamenti dell'UE, per attrarre talenti da tutta Europa e oltre. Il Politecnico di Milano è stato un nodo accademico chiave in questo programma, offrendo un percorso di ingegneria HPC nell'ambito di EUMaster4HPC e ospitando gli studenti per il loro primo anno prima di trasferirsi in un'università partner nel secondo anno. A questo scopo il Polimi ha stabilito accordi di doppia laurea e ha contribuito con la sua forte prospettiva ingegneristica al curriculum. Il progetto si concluderà nel 2025, ma mira a integrare il curriculum HPC paneuropeo nell'offerta universitaria esistente, continuando la collaborazione transfrontaliera nell'ambito di un diverso schema di finanziamento o come rete di programmi di master.

Il successo di EUMaster4HPC ha già ispirato delle diramazioni. Ad esempio, è in fase di lancio l'idea di microcredenziali europee per l'HPC, in cui gli studenti iscritti a qualsiasi università potrebbero seguire un modulo HPC certificato (magari online) riconosciuto da tutte le istituzioni, un concetto in linea con la spinta dell'UE per percorsi di apprendimento flessibili. Inoltre, elementi del programma di studi EUMaster4HPC confluiscono nel già citato **progetto EVITA (EuroHPC Virtual Academy).** Con EVITA[20], l'Europa vuole creare e un archivio di moduli didattici HPC di alta qualità, che possono essere riuniti in corsi o programmi completi da qualsiasi università o ente di formazione. Ciò include la definizione di standard di qualifica in modo che, ad esempio, uno studente che ottiene un "certificato di fondamenti HPC" in un determinato paese abbia in

[19] https://eumaster4hpc.eu/
[20] https://www.evitahpc.eu/

modo dimostrabile le stesse competenze di un altro paese. EVITA si rivolge inoltre esplicitamente a un pubblico eterogeneo, dagli studenti universitari e laureati ai professionisti del settore e persino ai formatori stessi. Tale allineamento garantisce che la formazione professionale (attraverso i NCC) e la formazione accademica (attraverso le università) non siano compartimentate, ma complementari e si rafforzino a vicenda.

In Italia, il **Consorzio Interuniversitario Nazionale per l'Informatica (CINI)** ha istituito un laboratorio di tecnologie chiave HPC. Tra le sue numerose attività, organizza ogni anno una HPC Summer School che riunisce studenti, giovani ricercatori e professionisti. Ad esempio, la terza CINI International Summer School su High-Performance Computing (giugno 2025, Napoli) ha offerto un programma intensivo che copre l'intero stack hardware e software dell'HPC, dalle architetture innovative ai più recenti modelli di programmazione parallela e agli strumenti per piattaforme eterogenee[21]. Tali scuole non solo insegnano tecnologie HPC all'avanguardia, ma promuovono anche il mentoring, il networking e la formazione di una comunità HPC tra il mondo accademico e l'industria.

L'Italia, come parte dell'ecosistema EuroHPC, ha visto un aumento delle attività educative sull'HPC. Oltre al coinvolgimento del Politecnico di Milano in EUMaster4HPC, altre università italiane hanno forti gruppi HPC (ad esempio, l'International School for Advanced Studies di Trieste offre una specializzazione in HPC e data science). La struttura nazionale HPC italiana, CINECA, conduce regolarmente seminari di formazione sull'utilizzo dei sistemi Tier-0/Tier-1 (come il supercomputer Leonardo), coprendo argomenti che vanno dall'introduzione a Linux e alla programmazione, all'ottimizzazione avanzata del codice e all'integrazione dell'intelligenza artificiale. Attraverso EuroCC Italy, queste sessioni di formazione sono state rese più accessibili all'industria e agli istituti di ricerca più piccoli che potrebbero non aver partecipato prima. Inoltre, esperti italiani di HPC stanno contribuendo allo sviluppo di contenuti formativi europei (ad esempio, il personale del CINECA è stato coautore delle lezioni del progetto HPC Carpentry e contribuisce allo sviluppo del materiale formativo PRACE). L'investimento del governo italiano nell'HPC (come dimostra l'hosting di un computer pre-esascale Leonardo e dei prossimi computer quantistici) è accompagnato da investimenti in capitale umano, come il finanziamento di programmi di dottorato HPC e IA.

A partire dal 2025, l'ecosistema di formazione HPC è stato riunito attorno alle **AI Factories europee**. Le AI Factory sono ecosistemi dinamici che favoriscono l'innovazione,

[21] https://www.hpcsummerschool.it/

la collaborazione e lo sviluppo nel campo dell'intelligenza artificiale. Combinano potenza di calcolo, dati e talento per creare modelli e applicazioni di intelligenza artificiale all'avanguardia. Promuovono la collaborazione in tutta Europa, collegando centri HPC, università, piccole e medie imprese (PMI), industria e attori finanziari. Le AI Factories fungono da hub che guidano i progressi nelle applicazioni di intelligenza artificiale in vari settori come la salute, la produzione, il clima, la finanza, lo spazio e altro ancora.

L'Italia ospita una delle maggiori AI Factories, denominata **IT4LIA**[22]. In questa iniziativa strategica, pensata per trasformare il panorama dell'IA nazionale ed europeo attraverso un'infrastruttura HPC all'avanguardia e una suite completa di servizi, la formazione è una parte essenziale. I servizi di formazione offrono percorsi di apprendimento su misura progettati per fornire agli utenti le competenze necessarie per sviluppare e implementare efficacemente soluzioni di intelligenza artificiale sull'infrastruttura HPC. L'offerta formativa comprende moduli di base e avanzati e può essere personalizzata per soddisfare le esigenze specifiche di ciascun caso d'uso, coprendo argomenti come la gestione dei dati, lo sviluppo di modelli di intelligenza artificiale, la conformità normativa e le applicazioni specifiche del dominio.

In risposta alla riconosciuta carenza di talenti (in effetti, ~70% delle aziende dell'UE cita la mancanza di competenze digitali e HPC come un ostacolo agli investimenti[23]), le molteplici iniziative di formazione HPC in Europa, dal coordinamento dei centri nazionali (EuroCC) e dalla promozione dello scambio (CASTIEL), all'innovazione dei curricula accademici (EUMaster4HPC) e alla costruzione di quadri di formazione comuni (EVITA, mappe delle competenze), alle AI Factorie, rappresentano uno degli approcci più strutturati a livello globale. Le sfide rimangono (ad esempio, sostenere i finanziamenti per i programmi educativi, garantire che programmi come EUMaster4HPC diventino permanenti e aggiornare continuamente i contenuti), ma il caso europeo fornisce lezioni preziose. Altre regioni, come gli Stati Uniti e l'Asia, stanno osservando questo modello; ad esempio, negli Stati Uniti si stanno discutendo sforzi analoghi per coordinare la formazione HPC tra le istituzioni sotto la bandiera dei programmi Advanced Cyber Infrastructure della NSF.

[22] https://it4lia-aifactory.eu/
[23] https://ea.consulting/5-reasons-europe-urgently-needs-cloud-hpc-education/

Le iniziative dell'Osservatorio ICSC sulla didattica dell'HPC: Pipsqueak

Durante la conferenza PDP 2025[24] - la trentatreesima conferenza internazionale Euromicro sull'elaborazione parallela, distribuita e basata su rete - gli autori di questo documento hanno organizzato e presieduto una sessione speciale sull'educazione HPC[25]. Organizzata nell'ambito delle attività dell'Osservatorio ICSC sulle tendenze e le applicazioni del Supercomputing, la **sessione speciale** PIPSQUEAK (Papers In Parallel/distributed computing, Supercomputing, and QUantum computing Education for Advancing students, professionals and citizens Knowledge)[26] ha invitato contributi che esplorano strategie educative, programmi di formazione professionale e iniziative di sensibilizzazione volte ad ampliare l'accesso alle conoscenze dell'HPC e dell'informatica quantistica.

Questa sessione speciale è stata organizzata per fornire a **educatori, ricercatori e professionisti una piattaforma per discutere le sfide e le innovazioni nell'insegnamento dell'HPC e dell'informatica quantistica**. L'invito era particolarmente aperto a contributi incentrati su approcci interdisciplinari, sull'integrazione dell'HPC e dell'informatica quantistica nei programmi di studio esistenti e sullo sviluppo di risorse per l'apprendimento permanente. Inoltre, la sessione ha esplorato come la formazione professionale per scienziati e professionisti senza competenze tecniche specifiche possa essere migliorata per includere conoscenze fondamentali dell'HPC e dell'informatica quantistica, consentendo loro di applicare queste tecnologie in modo efficace nei loro campi.

Gli argomenti di interesse sono stati:

- Sviluppo di programmi di studio e strategie pedagogiche per la didattica dell'HPC e all'informatica quantistica;
- Programmi di formazione professionale rivolti a non specialisti, tra cui scienziati, ingegneri e professionisti del settore;
- Integrazione dei concetti di HPC e calcolo quantistico nella scuola secondaria superiore e nella formazione universitaria;

[24] https://pdp2025.org/
[25] https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10974788
[26] https://www.pipsqueak.it/

- Strumenti educativi, risorse e infrastrutture per l'insegnamento dell'HPC, dell'informatica quantistica e dei campi correlati;
- Strategie per affrontare la diversità e l'inclusione nell'educazione all'HPC e all'informatica quantistica;
- Iniziative di sensibilizzazione per aumentare la consapevolezza e la comprensione del pubblico sull'HPC e l'informatica quantistica;
- Casi di studio e best practice nell'insegnamento e nella formazione in HPC e calcolo quantistico.

La sessione speciale ha ricevuto 11 candidature e 4 articoli sono stati accettati per far parte della conferenza, mostrando una varietà di approcci innovativi all'insegnamento del calcolo parallelo e ad alte prestazioni.

Moreno Marzolla (2025) ha introdotto il concetto di *Parallel Etudes*, una raccolta di piccoli compiti di programmazione autonomi progettati come strumenti didattici accessibili per gli studenti universitari. Queste mini-applicazioni sono tratte da domini come il rendering 3D, l'elaborazione di immagini e semplici simulazioni, consentendo agli studenti senza background matematici avanzati di impegnarsi con la memoria condivisa, la memoria distribuita e la programmazione GPU. Questo articolo ha ricevuto il "PIPSQUEAK Special Session Best Paper Award".

Giorgio Delzanno, Giovanna Guerrini e Daniele Traversaro (2025) hanno presentato un approccio interdisciplinare che impiega *Sonic Pi*, un linguaggio di programmazione musicale, per introdurre concetti di concorrenza. I loro esperimenti didattici esplorano le idee sbagliate degli studenti sulla concorrenza attraverso compiti di comprensione e composizione del codice, evidenziando parallelismi con le difficoltà incontrate nei linguaggi di programmazione più tradizionali.

Giuliano Laccetti, Marco Lapegna e Ilaria Merciai (2025) hanno descritto la progettazione e l'implementazione di un *Massive Open Online Course (MOOC)* sul calcolo parallelo e ad alte prestazioni, sviluppato per la piattaforma Federica Web Learning dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. Questa iniziativa mira a rendere i contenuti HPC all'avanguardia più ampiamente accessibili a un pubblico diversificato attraverso l'apprendimento online flessibile.

Infine, Marco Danelutto (2025) ha discusso di come progettare programmi di master HPC allineati al settore, sfruttando il passaggio di Pisa da "Computer Science and Networking" a "High Performance Computing and Infrastructures" e le lezioni di EUMaster4HPC, per fondere l'informatica con il networking avanzato, espandere laboratori

pratici, stage e tesi co-supervisionate e formare profili che abbracciano l'architettura del sistema, gli strumenti software e le operazioni.

I documenti presentati in questa sessione hanno evidenziato uno sforzo comune per ampliare l'accesso alla formazione HPC a diversi livelli e contesti. Sottolineano l'importanza di progettare materiali e metodologie didattiche che siano coinvolgenti e inclusivi, sia attraverso mini-applicazioni semplificate, strumenti interdisciplinari come la programmazione basata sulla musica, corsi online su larga scala o programmi di master avanzati. Nel complesso, la sessione speciale ha fornito una preziosa **panoramica delle iniziative italiane nell'ambito della formazione HPC a livello universitario**, offrendo spunti di riflessione su come le diverse istituzioni stiano lavorando per rafforzare la formazione delle future generazioni nel calcolo parallelo e ad alte prestazioni.

Framework: le Big Ideas

Big Ideas nell'educazione scientifica

Secondo Harlen e colleghi (2015), le Big Ideas sono

> *"le idee chiave che gli studenti dovrebbero incontrare nella loro formazione scientifica per consentire loro di comprendere, godere e meravigliarsi del mondo naturale".* (Traduzione a cura degli autori)

Ci sono almeno due quadri principali per le Big Ideas nell'educazione scientifica.

Quello di Chalmers e colleghi (2017) si colloca nel contesto dell'educazione STEM e mira ad affrontare le sfide interdisciplinari che l'integrazione STEM presenta. In risposta alla lotta per produrre un apprendimento approfondito (che si trova in letteratura), propongono di utilizzare un quadro di riferimento per strutturare lo sviluppo da parte degli insegnanti di unità curricolari STEM integrate. Il framework si basa su tre tipi di Big Ideas:

> *"Big Ideas all'interno della disciplina che hanno applicazione in altre discipline STEM, Big Ideas interdisciplinari e che comprendono Big Ideas" (Chalmers et al., 2017).* (Traduzione a cura degli autori)

L'altro framework nasce nell'educazione scientifica in risposta alla percezione diffusa tra gli studenti che i programmi scientifici, spesso sovraffollati e frammentati, siano poco più di una serie di fatti scollegati con una rilevanza minima per le loro vite. Secondo Harlen e colleghi (2010), un gruppo di esperti in educazione scientifica,

> *"Parte della soluzione a questo problema è stato quello di concepire gli obiettivi dell'educazione scientifica, non in termini di conoscenza di un insieme di fatti e teorie, ma come una progressione verso la comprensione di idee chiave – 'Big Ideas' – di rilevanza per la vita degli studenti".* (Traduzione a cura degli autori)

L'importanza delle Big Ideas

Harlen e colleghi (2015, p. 1) spiegano che

> *Per prosperare in questa moderna era di innovazione è necessaria la capacità di cogliere gli elementi essenziali di diversi problemi, di riconoscere modelli significativi, di recuperare e applicare le conoscenze pertinenti. [. . .] L'educazione scientifica [...] deve tenere conto dei cambiamenti sul posto di lavoro che richiedono la capacità di collegare la scienza con l'ingegneria, la tecnologia e la matematica (STEM), l'urgente necessità di prestare attenzione alle principali questioni globali come gli impatti negativi del cambiamento climatico, le influenze positive e negative della valutazione degli studenti e il crescente contributo delle neuroscienze alla comprensione dell'apprendimento. Tutto ciò si aggiunge alle ragioni per lo sviluppo di Big Ideas per fornire un quadro di riferimento per le decisioni sull'educazione scientifica.* (Traduzione a cura degli autori)

Gli autori evidenziano diverse ragioni convincenti per cui stabilire oggi un quadro per lo sviluppo delle Big Ideas della scienza. **In primo luogo, un tale quadro può aiutare a contrastare la tendenza degli studenti a vedere la scienza come una raccolta disconnessa di fatti e teorie con poca rilevanza personale. Offre anche una struttura per la progettazione di attività scolastiche che incoraggiano gli studenti a dare un senso ai fenomeni che trovano significativi. Inoltre, funge da strumento pratico per navigare nella vasta gamma di possibili contenuti curriculari, guidando la selezione di cosa includere.** Il quadro supporta l'organizzazione dei curricula scientifici attorno allo sviluppo graduale di concetti generali, promuovendo una progressione coerente nel processo di apprendimento. Inoltre, il quadro è ben allineato con la crescente enfasi sugli approcci didattici basati sull'indagine nell'educazione scientifica.

La realizzazione del quadro incoraggia anche il riconoscimento dei modi in cui le materie STEM si relazionano ai diversi contesti del mondo reale, aumentandone il valore percepito. In definitiva, il quadro facilita la costruzione di sistemi di conoscenza interconnessi, consentendo agli studenti di acquisire una comprensione più profonda e un'interpretazione più sfumata delle loro esperienze. Questo approccio è supportato anche da recenti scoperte nel campo delle neuroscienze, che indicano che le idee apprese in modo connesso sono più facilmente trasferibili a nuove situazioni.

Con grande rilevanza per questo documento, gli autori riconoscono l **'importanza delle Big Ideas per la formazione degli insegnanti**. Gli insegnanti devono considerare come gli obiettivi delle singole lezioni si inseriscano in un quadro più ampio di idee forti che possono aiutare gli studenti a dare un senso a una vasta gamma di fenomeni ed eventi correlati. Questa direzione generale di sviluppo è necessaria per la selezione dei contenuti e la costruzione di percorsi di apprendimento, chiarendo in particolare ciò che gli insegnanti devono osservare e cercare nelle azioni degli studenti, informando le loro decisioni sui feedback e aiutandoli a regolare le valutazioni. Questo è particolarmente impegnativo per i formatori che insegnano materie scientifiche senza avere l'opportunità di studiarle in profondità. Spesso, l'educazione scientifica ricevuta dagli insegnanti non ha permesso loro di sviluppare Big Ideas; invece, gli educatori dovrebbero anche avere l'opportunità di aiutare gli studenti a comprenderle.

I concetti fondamentali, accuratamente derivati dalla conoscenza scientifica per la loro ampia rilevanza e potere esplicativo, consentono agli studenti di cogliere gli aspetti cruciali dei fenomeni senza la necessità di conoscere e comprenderne i dettagli. Impegnarsi con tali idee può favorire un senso di coerenza nella comprensione del mondo, nell'identificazione di modelli in contesti diversi e nel riconoscimento di come i vari fenomeni siano interconnessi. Questo processo chiarisce anche gli obiettivi dell'indagine scientifica e il suo significato nella vita quotidiana, aumentando potenzialmente la motivazione degli studenti sia all'interno che all'esterno della classe.

Inoltre, **una comprensione più profonda della scienza supporta un processo decisionale informato**, soprattutto in aree legate alla salute, all'ambiente e ai percorsi di carriera, rafforzando così il ruolo dell'individuo come cittadino attivo e responsabile. Queste decisioni personali, tuttavia, si estendono al dominio collettivo, in quanto influenzano cumulativamente il benessere ambientale e sociale nel tempo. Riconoscere le conseguenze positive e negative dell'applicazione delle conoscenze scientifiche è fondamentale per apprezzare il ruolo della scienza, coltivare un senso di responsabilità e di azione nell'affrontare le sfide globali e promuovere l'equità sociale.

Come condensare le Big Ideas

Gli studiosi hanno elencato le caratteristiche delle Big Ideas. Queste dovrebbero:

- "**avere potere esplicativo** in relazione a un gran numero di oggetti, eventi e fenomeni che vengono incontrati dagli studenti nella loro vita durante e dopo gli anni scolastici" (Harlen et al., 2015, p. 14)
- "**fornire una base per comprendere problemi**, come l'uso dell'energia, **presenti nel prendere decisioni** che influenzano la salute e il benessere degli studenti e degli altri e l'ambiente" (Harlen et al., 2015, p. 14)
- "**portare al piacere e alla soddisfazione** di essere in grado di rispondere o trovare risposte al tipo di domande che le persone si pongono su sé stesse e sul mondo naturale" (Harlen et al., 2015, p. 14)
- "**avere un significato culturale** – ad esempio nell'influenzare le visioni della condizione umana – riflettendo i risultati della storia della scienza, ispirandosi allo studio della natura e agli impatti dell'attività umana sull'ambiente" (Harlen et al., 2015, p. 14)
- **essere stabili nel tempo** e abbastanza generali (ampia applicabilità) per osservare le loro manifestazioni in molteplici fenomeni della realtà (Harlen et al., 2015; Schwill, 1994; Bell et al., 2018)
- **avere senso – a diversi livelli di dettaglio/astrazione – per gli studenti a vari livelli** e nel corso della loro carriera (Schwill, 1994; Bell et al., 2018)

Per condensare le "Big Ideas dell'informatica per la didattica nella scuola secondaria", di cui si discuterà di più nella sottosezione seguente, Bell e colleghi (2018) hanno utilizzato un processo collaborativo che ha coinvolto esperti di didattica dell'informatica, progettisti di programmi di studio e informatici in tutto il mondo.

Questi hanno sviluppato la prima lista di possibili Big Ideas partendo da discussioni approfondite con diversi ricercatori (universitari e di scuola secondaria) di didattica dell'informatica. Altre bozze sono state create mostrando ad altri colleghi ricercatori le Big Ideas della scienza e chiedendo loro cosa dovrebbe includere un elenco analogo per l'informatica. I suggerimenti ricevuti e la loro lista iniziale sono stati esaminati per le ripetizioni e sintetizzati in un'unica lista. L'elenco è stato condiviso con insegnanti ragionevolmente inesperti per garantire che le Big Ideas fossero chiare e significative per tutti gli educatori e i progettisti. Le Big Ideas proposte sono il risultato di diverse iterazioni del processo. L'elenco non deve essere considerato definitivo ed è aperto a feedback e contributi da parte dell'intera comunità della ricerca e dell'istruzione.

Big Ideas dell'informatica

La tendenza riscontrata tra gli insegnanti di informatica a concentrarsi sui dettagli, perdendo di vista il quadro più ampio, ha spinto Bell e colleghi (2018) a formulare le "Big Ideas di informatica per la didattica nella scuola superiore".

Il lato tecnologico dell'informatica sta accelerando, dando l'impressione che i nuovi contenuti debbano essere sempre inseguiti. In questo scenario, la tendenza a concentrarsi su aspetti marginali e tecnologici è acuita dalla mancanza di una preparazione specifica di un'ampia percentuale di professori chiamati a insegnare informatica senza averla studiata.

Riferendosi esplicitamente al quadro di Harlem, Bell e colleghi sottolineano che

> L'informatica è piena di paradossi e sorprese che offrono agli studenti l'opportunità di capire, divertirsi e meravigliarsi del mondo digitale, e siamo particolarmente interessati a garantire che questi vengano catturati in modo che le idee siano in linea con l'intenzione delle "Big Ideas dell'educazione scientifica". (Bell et al.,2018, sez. 1) (Traduzione a cura degli autori)

Le Big Ideas dell'informatica non sono intese come principi generali, aree disciplinari o persino argomenti di curriculum, ma come **idee potenti e generali che catturano l'essenza dell'informatica.** Le Big Ideas sono quelle che i giovani studenti dovrebbero conservare, indipendentemente dal fatto che si specializzino in informatica o applichino le sue conoscenze di base per esercitare il loro diritto di cittadinanza; l'attenzione si concentra su concetti che sono fondamentali in Computer Science ma non immediatamente evidenti ai non addetti ai lavori.

Le Big Ideas dell'informatica sono formulate in modo che gli insegnanti possano usarle con gli studenti per **collegare i vari argomenti all'interno del contesto più ampio di una disciplina di lunga data**. Per fare ciò, non si concentrano su tecnologie specifiche, consentendo loro di non variare nonostante i progressi tecnologici. Quello che segue è un esempio che lo stesso Bell fornisce riguardo al concetto fondamentale di programmazione rispetto ai suoi aspetti tecnologici, in particolare i linguaggi di programmazione.

Qualcuno potrebbe obiettare che gli studenti dovrebbero usare un linguaggio usato nell'industria, come ad esempio

> Java o C#, ma se ci concentriamo sulle Big Ideas nella programmazione, scrivere programmi significa far sì che un dispositivo computazionale segua i passaggi di un algoritmo, e sappiamo che qualsiasi algoritmo può essere programmato utilizzando solo sei elementi chiave: input, output, memorizzazione, istruzioni sequenziate, iterazione (loop) e condizionali (istruzioni if e case). Questi sei elementi rendono un sistema di calcolo *Turing Complete* [...] pienamente in grado di calcolare qualsiasi cosa che un computer convenzionale potrebbe calcolare [. . .]. Se gli studenti imparano a conoscere tutti e sei questi elementi e come combinarli per ottenere il risultato desiderato, allora sono stati esposti alla piena potenza di calcolo [. . .]. (Bell e Duncan, 2018, sez. 10.7) (Traduzione a cura degli autori)

Conoscere e comprendere i punti di riferimento significativi dell'Informatica può aiutare a vedere il suo quadro più ampio. In particolare, le Big Ideas mirano a informare la progettazione del curriculum e, cosa più importante, a consentire agli insegnanti (in particolare non specializzati) di comprendere l'informatica nei suoi fondamenti.

In effetti, senza una prospettiva generale, gli insegnanti potrebbero percepire l'informatica come un'imposizione sul loro tempo limitato in classe e quelli non specializzati potrebbero sentirsi sopraffatti da una serie di argomenti estranei e complicati.

Inoltre, gli insegnanti possono utilizzare Big Ideas per distinguere le conoscenze di base dalle competenze.

> *"Ad esempio, la programmazione è solo una delle nostre dieci Big Ideas, ma in molti curricula si dedica molto tempo a questo, in parte perché è un'abilità che può richiedere un po' di tempo per essere acquisita. Al contrario, ci saranno altri argomenti sull'apprendimento dell'uso o della configurazione dei computer che compaiono nei curricula, ma non le Big Ideas perché gli studenti devono imparare a fare queste cose, anche se non sono necessariamente un concetto fondamentale dell'informatica" (Bell et al., 2018, sez. 1).*

Le competenze, come la programmazione, si acquisiscono nel tempo, mentre le conoscenze di base consentono agli studenti di possedere un'ampia comprensione dell'informatica, utile per supportare l'apprendimento degli argomenti proposti.

Per quanto riguarda la progettazione del curriculum, **le Big Ideas hanno lo scopo di aiutare i progettisti del curriculum a concentrarsi sulle conoscenze e sugli argomenti di base, consentendo agli insegnanti di riconoscere il valore a lungo termine dell'informatica in questi curricula**. Fare riferimento a Big Ideas stabili e non dipendenti dalla tecnologia aiuta a costruire curricula composti da argomenti pertinenti che non diventeranno presto obsoleti, piuttosto che curricula che devono essere aggiornati ogni volta che viene sviluppata una nuova tecnologia. Inoltre, un quadro generale aiuta a garantire che i curricula non siano costruiti attorno ad argomenti non così rilevanti scelti semplicemente perché le loro risorse didattiche sono disponibili nei libri di testo o online.

La ricerca

Domande di ricerca

Questo studio è guidato da due domande di ricerca:

1. Quali esigenze concettuali vengono percepite a livello accademico e industriale quando si affronta il calcolo ad alte prestazioni (HPC)?
2. Quali sono le "Big Ideas" dell'HPC, i principi fondamentali che dovrebbero ispirare la progettazione e la formazione educativa?

Metodologia

Per rispondere a queste domande, è stata adottata una metodologia qualitativa mista e ispirata a precedenti lavori sui framework delle Big Ideas nell'educazione scientifica e informatica (Bell et al., 2018; Harlen et al., 2015). La ricerca è stata concepita come un processo iterativo, che coinvolge la comunità e che combina revisioni della letteratura, consultazione di esperti e raccolta di dati basata su sondaggi.

Revisione della letteratura

Abbiamo iniziato con un'ampia revisione della letteratura esistente sulla formazione HPC, concentrandoci sia sulle esigenze curriculari nel mondo accademico che sui requisiti di competenza nell'industria. Parallelamente, abbiamo esaminato il corpus di lavori sulle "Big Ideas" nell'educazione scientifica e informatica per stabilire un quadro concettuale adattabile all'HPC.

Consultazione degli esperti

Durante tutto il processo si sono svolti colloqui individuali e focus group con educatori, ricercatori e professionisti aziendali, garantendo un feedback iterativo sulle esigenze e le idee emergenti dei candidati. I primi risultati sono stati condivisi e discussi durante la *sessione speciale PIPSQUEAK* alla conferenza PDP 2025, promuovendo lo scambio e la convalida interdisciplinari.

Stesura iterativa dei bisogni formativi e delle Big Ideas

Le esigenze educative preliminari e i concetti dei candidati per formulare Big Ideas sono stati redatti attraverso consultazioni di esperti e l'analisi di libri di testo, programmi di corso e curricula in HPC a livello universitario e post-laurea. Queste bozze sono state perfezionate attraverso sessioni di brainstorming con esperti e discussioni continue all'interno dell'Advisory Board dell'Osservatorio ICSC.

Il processo è stato infatti intenzionalmente iterativo e aperto. L'elenco delle esigenze educative e delle Big Ideas HPC presentate in questo documento non deve essere visto come definitivo, ma piuttosto come un **primo passo verso un quadro condiviso,** soggetto a ulteriori conferme da parte di educatori, responsabili politici e della più ampia comunità HPC. Le iterazioni future amplieranno la base di indagine e incorporeranno cicli di feedback strutturati per perfezionare e consolidare il quadro.

Ricerca basata su questionario

Dopo aver condotto alcune interviste esplorative iniziali con esperti per indagare sulla nostra domanda di ricerca, abbiamo deciso di optare per una metodologia basata su questionari. Questo approccio è stato scelto per diversi motivi. In primo luogo, il questionario ci ha permesso di raccogliere sistematicamente informazioni da un gruppo eterogeneo di professionisti HPC, tra cui ricercatori, educatori, manager, data scientist e specialisti tecnici. Inoltre, la natura strutturata del questionario ha garantito la coerenza nel modo in cui le domande sono state presentate a tutti i partecipanti, riducendo la variabilità che potrebbe altrimenti derivare da diversi stili di intervista o formulazioni. Il formato digitale del questionario ci ha inoltre permesso di raggiungere una comunità geograficamente dispersa di esperti HPC, massimizzando così la diversità delle risposte e garantendo la rappresentanza di diversi settori e livelli di esperienza all'interno del campo. L'analisi delle risposte raccolte è disponibile nell'Appendice – .

Progettazione del questionario

Il design del questionario si è basato sulla teoria educativa riguardante le "Big Ideas" come proposto nella letteratura sull'educazione informatica e presentato nelle sezioni precedenti. L'intero questionario è ancora disponibile per la compilazione a https://forms.office.com/e/sej2Zpy8ma.

Il questionario è iniziato con un'ampia spiegazione di ciò che costituisce una "Big Idea", inclusi esempi positivi e negativi tratti dall'informatica. Questa inquadratura era essenziale per garantire che i partecipanti comprendessero il livello di astrazione e generalità richiesto. In particolare, abbiamo affermato che le Big Ideas dovrebbero essere "messaggi o concetti chiave, potenti, fondamentali, ma non ovvi per un profano" che svolgono molteplici funzioni pedagogiche: i) Guidare i formatori nella progettazione dei curricula senza perdere la direzione concettuale; ii) Consentire agli studenti di percepire la disciplina come coerente piuttosto che frammentata; iii) Fornire una conoscenza duratura che trascenda i dettagli tecnologici in rapida evoluzione; iv) Favorire l'immaginazione sulle applicazioni anche senza competenze tecniche.

Il questionario è stato strutturato in quattro sezioni principali. Le domande sono passate dal concreto (informazioni demografiche) all'astratto (identificazione di Big Ideas) all'applicato (implicazioni educative), consentendo ai partecipanti di costruire il contesto prima di affrontare la domanda principale. Nello specifico, le quattro sezioni sono state:

- Contesto demografico e professionale (domande 1-7). Queste domande hanno stabilito la credibilità e il contesto dei partecipanti, tra cui: ruolo professionale nell'HPC; anni di esperienza; esperienza di insegnamento; settori applicativi; tecnologie e strumenti di uso frequente. Queste informazioni sono state fondamentali per comprendere la prospettiva da cui i partecipanti avrebbero identificato le Big Ideas e per l'analisi dei potenziali sottogruppi.
- Identificazione delle Big Ideas fondamentali (Domande 8-9). Le domande centrali hanno affrontato direttamente la domanda di ricerca. La domanda 8 chiedeva un'unica Grande Idea ben formulata. La domanda 9 ha sollecitato ulteriori Big Ideas. Queste domande aperte sono state deliberatamente posizionate dopo le domande demografiche per garantire che i partecipanti avessero considerato la loro esperienza e il contesto prima di rispondere. Includendo sia le domande primarie (domanda 8) che quelle supplementari (domanda 9) sulle Big Ideas, abbiamo riconosciuto che gli esperti potrebbero identificare più concetti fondamentali e abbiamo fornito flessibilità nella profondità delle risposte.
- Implicazioni educative (Domande 10-11). Queste domande hanno esplorato il modo in cui le Big Ideas identificate dovrebbero influenzare la formazione HPC

in contesti accademici rispetto a quelli industriali, fornendo una convalida pratica dell'importanza dei concetti.

- Direzioni future (domande 12-14) - Le domande finali hanno affrontato le implicazioni educative più ampie, tra cui la formazione pre-universitaria e le opportunità di colloqui di follow-up.

Implementazione del questionario

Il questionario è stato implementato utilizzando Microsoft Forms, fornendo un'interfaccia user-friendly e garantendo al contempo la sicurezza dei dati e la conformità al GDPR. Il questionario includeva procedure complete di consenso informato con accordi separati per il trattamento dei dati a fini di ricerca e la partecipazione allo studio. Entrambi i moduli di consenso facevano riferimento a politiche dettagliate sulla privacy, garantendo il rispetto etico degli standard di ricerca.

Diffusione del questionario

La strategia di diffusione del questionario è stata progettata per raggiungere sistematicamente professionisti e ricercatori esperti all'interno della comunità dell'High Performance Computing attraverso più reti e sedi professionali. L'obiettivo principale era quello di **raccogliere prospettive informate da individui con una notevole esperienza nella ricerca, nella formazione e nelle applicazioni industriali dell'HPC, piuttosto che cercare un'ampia partecipazione generale**.

Il questionario è stato divulgato strategicamente attraverso diversi canali chiave che hanno fornito accesso diretto agli esperti HPC. Il questionario è stata presentata in occasione di tutte le riunioni dell'Advisory Board dell'osservatorio ICSC (Centro Italiano di Ricerca sul Calcolo ad Alte Prestazioni, Big Data e Quantum Computing),[27] garantendo la partecipazione di ricercatori senior e leader istituzionali che forniscono indicazioni strategiche per le iniziative nazionali di HPC. Queste presentazioni del comitato consultivo hanno consentito un coinvolgimento diretto con i partecipanti che potevano fornire un feedback contestuale e garantire la pertinenza del questionario con le attuali priorità educative e di ricerca sull'HPC.

[27] https://osservatorio.supercomputing-icsc.it/chi-siamo/

Le conferenze di ricerca sono state uno dei contesti più cruciali in cui il questionario è stata divulgato. La prima è stata la conferenza SIF (Società Italiana di Fisica) tenutasi a Bologna nel 2024[28]; durante il Symposium on Supercomputing "Emerging data and computing technologies for frontier physics" gli autori del white paper hanno partecipato con un intervento sulle Big Ideas per l'educazione all'HPC, presentando il sondaggio e chiedendo ai partecipanti di compilarlo. Durante la conferenza PDP (Parallel, Distributed and network-based Processing), tenutasi a Torino nel 2025[29], il questionario è stato attivamente divulgato attraverso la sessione speciale PIPSQUEAK organizzata appositamente per questa iniziativa di ricerca.

Il questionario è stato presentato anche durante le sessioni di lavoro della Divisione Formazione EuroCC, raggiungendo professionisti specificamente focalizzati sulle iniziative di formazione all'HPC nei centri di competenza nazionali europei. Questi gruppi di lavoro hanno incluso educatori, coordinatori della formazione e sviluppatori di programmi di studio che possedevano sia conoscenze tecniche HPC che esperienza pratica nella progettazione e nell'implementazione di programmi educativi.

Inoltre, il questionario è stato diramato attraverso i gruppi di lavoro CASTIEL[30], fornendone l'accesso a esperti coinvolti nelle applicazioni di scienza computazionale e ingegneria dell'HPC. Questo canale ha garantito la rappresentanza di professionisti capaci di colmare il divario tra lo sviluppo della tecnologia HPC e le applicazioni scientifiche specifiche del dominio.

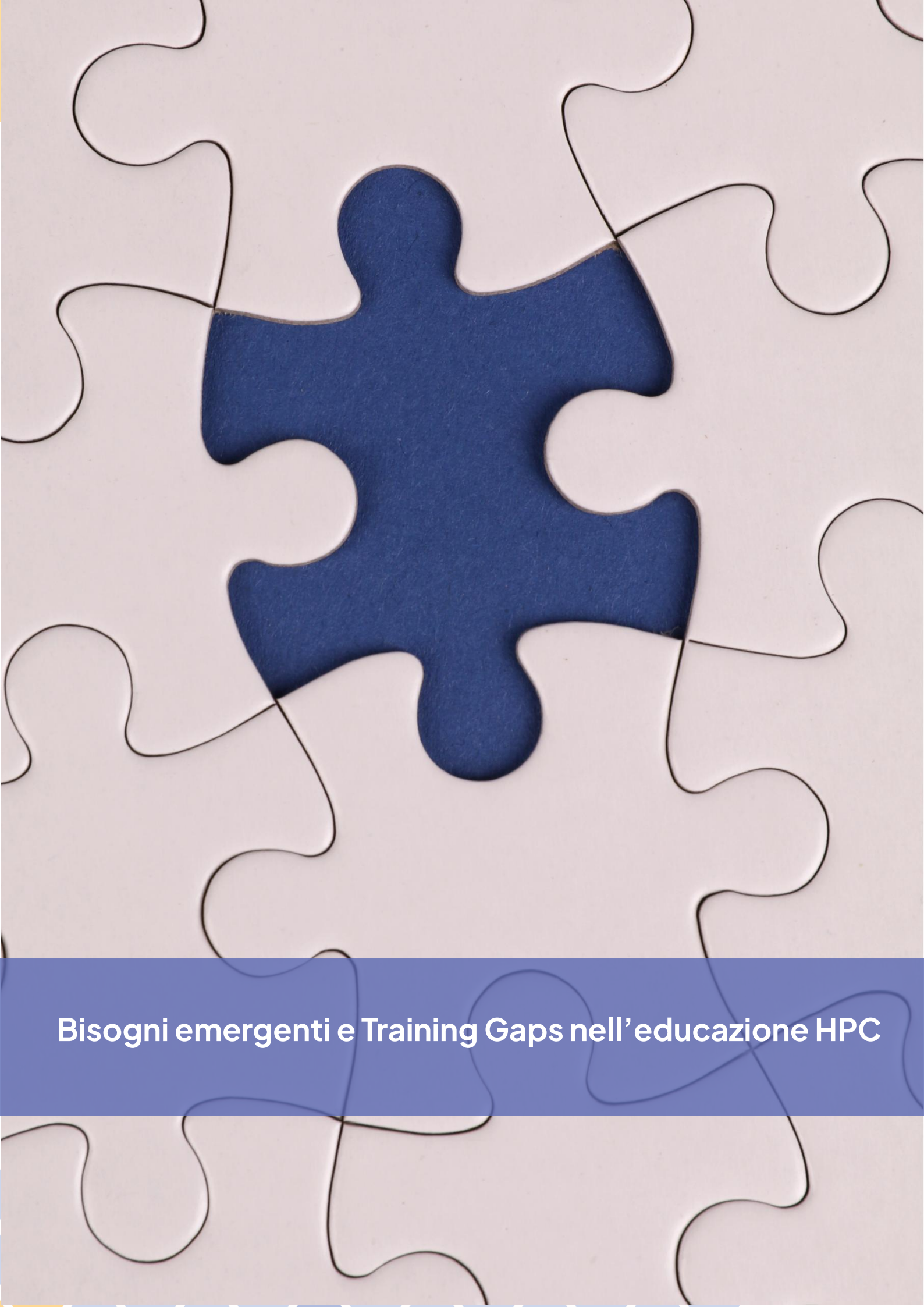
La newsletter del CINI (Consorzio Interuniversitario Nazionale per l'Informatica) è servita come canale di diffusione più ampio, raggiungendo la comunità informatica accademica italiana e fornendo opportunità di partecipazione da parte di ricercatori ed educatori che potrebbero non essere stati raggiunti attraverso le sedi più specializzate sopra descritte. Anche la mailing list dell'ACM SIGHPC Education Chapter è stata utilizzata come canale di diffusione, raggiungendo un'ampia gamma di studiosi e professionisti internazionali interessati all'HPC Education.

Questo approccio multi-canale ha fatto sì che il questionario raggiungesse esperti in diversi aspetti dell'ecosistema HPC, tra cui ricerca, formazione, applicazioni industriali

[28] https://www.sif.it/attivita/congresso/110
[29] https://pdp2025.org/
[30] https://www.eurohpc-ju.europa.eu/research-innovation/our-projects/castiel_en

e policy makers, mantenendo l'attenzione su individui con una notevole esperienza professionale piuttosto che cercare un'ampia partecipazione pubblica.

Gli sforzi di divulgazione hanno portato a tredici risposte complete da parte di esperti HPC. Sebbene questo numero possa sembrare modesto rispetto alle ampie attività di divulgazione intraprese, riflette la natura intrinsecamente specializzata della comunità professionale HPC e la natura impegnativa della partecipazione di esperti agli studi di ricerca. Il campo dell'HPC rappresenta un dominio professionale relativamente ristretto e altamente specializzato, in cui i professionisti con la profondità di competenza necessaria per questo studio costituiscono una popolazione limitata. Inoltre, la natura qualitativa di questa ricerca dà priorità alla profondità e alla qualità delle intuizioni degli esperti, rispetto alla rappresentatività statistica. Le risposte ottenute dimostrano alti livelli di fiducia, in quanto i partecipanti possedevano una notevole esperienza professionale e hanno fornito contributi ponderati e dettagliati, che riflettono una profonda comprensione dei principi dell'HPC e delle sfide educative. Questo studio deve essere inteso come un'indagine qualitativa che impiega la metodologia della grounded theory (Glaser & Strauss, 1967) per catturare e analizzare le prospettive degli esperti e per generare intuizioni teoriche sull'educazione HPC, piuttosto che uno studio volto a produrre risultati statisticamente generalizzabili in popolazioni più ampie.



Bisogni emergenti e Training Gaps nell’educazione HPC

Risultati

Esigenze emergenti e lacune formative nella didattica dell'HPC

Il calcolo ad alte prestazioni è fondamentale per affrontare le principali sfide scientifiche e sociali, ma le attuali offerte educative rivelano persistenti **lacune concettuali e di competenze**.

Competenze HPC di base mancanti nei curricula

Una lacuna centrale nella formazione HPC è l'assenza di competenze di base in molti programmi universitari. La programmazione parallela con MPI o OpenMP, la concorrenza, l'ottimizzazione delle prestazioni e i principi dell'architettura di sistema HPC sono spesso trattati come argomenti avanzati o elettivi piuttosto che fondamentali. Di conseguenza, i laureati in informatica spesso completano i loro studi senza essere esposti ad algoritmi paralleli scalabili o alle realtà pratiche del lavoro con sistemi multicore e distribuiti. Parallelamente, gli studenti delle discipline scientifiche e ingegneristiche possono fare affidamento su applicazioni basate su HPC senza sviluppare l'alfabetizzazione computazionale per comprendere la scalabilità, le gerarchie di memoria o i costi di comunicazione. Ciò lascia entrambi i gruppi impreparati a progettare, implementare o valutare criticamente le soluzioni HPC.

Lacune nell'ottimizzazione del software

Un altro punto debole significativo risiede nella formazione sull'ottimizzazione del software. Gli studenti e i professionisti sono in genere esperti nell'utilizzo di strumenti di alto livello come MATLAB, R o Python, che rimangono la lingua franca della ricerca e dell'industria, ma raramente ottimizzati per gli ambienti HPC. Al contrario, pochi studenti si sentono a proprio agio con linguaggi critici per le prestazioni come C e C++ o con la programmazione GPU di basso livello tramite CUDA o HIP. Anche quando questi linguaggi vengono insegnati, l'esposizione sistematica agli strumenti di profilatura, debug e ottimizzazione delle prestazioni è rara. Senza queste competenze, gli studenti potrebbero essere in grado di eseguire applicazioni su un supercomputer, ma faticando a identificare i colli di bottiglia, adattare il codice per architetture eterogenee o sfruttare appieno la capacità dell'hardware. Questo divario mantiene una cultura di utilizzo inefficiente dell'HPC, in cui vengono consumate risorse di elaborazione significative senza un ritorno scientifico o industriale proporzionale.

Deficit di calcolo data-intensive

L'HPC moderno è sempre più dominato da flussi di lavoro ad alta intensità di dati, ma la formazione spesso è in ritardo nell'insegnare come gestire ed elaborare dati su larga scala. Pochi programmi di studio coprono in modo approfondito l'I/O parallelo, le strategie di localizzazione dei dati o le gerarchie di archiviazione. Allo stesso modo, le pratiche di orchestrazione, riproducibilità e verifica del flusso di lavoro sono raramente introdotte in modo sistematico, nonostante siano fondamentali per una scienza computazionale credibile. Gli studenti possono imparare come eseguire simulazioni, ma non come gestire i terabyte di dati risultanti, documentare i loro processi o garantire la riproducibilità tra sistemi e team. Questo divario formativo mina l'affidabilità della ricerca abilitata dall'HPC e limita la capacità dei laureati di partecipare a domini emergenti basati sui dati, in cui l'integrazione dell'informatica e della governance dei dati è fondamentale.

Incomprensione concettuale degli ambienti HPC

Un problema ricorrente per i nuovi utenti HPC, in particolare per quelli provenienti da contesti non informatici, è un fraintendimento fondamentale su cosa siano i sistemi HPC e come funzionino. Molti percepiscono un cluster semplicemente come un "laptop più grande", avvicinandosi ad esso con aspettative modellate dagli ambienti di personal computing. Senza formazione sulle interfacce della riga di comando, sugli scheduler delle risorse come Slurm o PBS, sui concetti di memoria distribuita o sugli ambienti software modulari tipici dell'HPC, gli utenti spesso sperimentano frustrazione e inefficienza. Questo divario concettuale crea barriere all'adozione efficace, in quanto gli studenti possono essere in grado di eseguire compiti semplici ma non hanno l'orientamento per utilizzare i sistemi HPC in modo produttivo, responsabile e su larga scala.

Integrazione di intelligenza artificiale e analisi dei dati

La convergenza dell'HPC con l'intelligenza artificiale e l'analisi dei big data (spesso raggruppati sotto l'High-Performance Data Analytics, o HPDA) sta rimodellando le competenze richieste ai professionisti, ma i programmi di formazione hanno raggiunto solo in parte. Pochi programmi di studio affrontano esplicitamente l'addestramento di modelli distribuiti, l'uso di risorse GPU su larga scala per i carichi di lavoro di intelligenza artificiale o la progettazione di flussi di lavoro ibridi HPC/IA in cui la simulazione, l'analisi dei dati e l'apprendimento automatico interagiscono senza soluzione di continuità. Ciò lascia i laureati con competenze frammentate: informatici che comprendono la simulazione ma non l'intelligenza artificiale su larga scala, o data scientist esperti

nell'apprendimento automatico ma senza familiarità con le infrastrutture HPC. Colmare questo divario è fondamentale poiché l'HPC è sempre più alla base della ricerca e dell'adozione industriale dell'intelligenza artificiale, richiedendo professionisti esperti in entrambi i paradigmi.

Tecnologie emergenti sottorappresentate

Infine, i programmi educativi spesso trascurano l'ecosistema in rapida evoluzione delle tecnologie HPC emergenti. L'addestramento sull'elaborazione eterogenea, ovvero la programmazione per GPU, FPGA e altri acceleratori, rimane incoerente, nonostante la loro ubiquità nei moderni sistemi HPC. Allo stesso modo, le tecnologie HPC e di containerizzazione basate su cloud (come Docker, Singularity o Podman), che sono ora fondamentali per la riproducibilità e la portabilità, sono raramente incorporate nei curricula standard. Anche aree più lungimiranti, come l'integrazione degli acceleratori quantistici con l'HPC classica, sono in gran parte assenti. Questa mancanza di esposizione significa che i laureati possono essere competenti nei paradigmi HPC tradizionali, ma impreparati per le infrastrutture eterogenee, ibride e inter-tecnologiche che definiscono la prossima generazione di calcolo ad alte prestazioni.

Bisogni formativi per studenti e laureati in informatica

Mancanza di integrazione HPC di base: una prima lacuna per studenti e laureati in informatica risiede nella limitata integrazione dei fondamenti dell'HPC nel curriculum di base. I concetti di calcolo parallelo e distribuito come MPI, OpenMP e la programmazione GPU sono spesso offerti solo come elettivi avanzati o limitati a percorsi specializzati. Ciò lascia molti studenti che completano una laurea in informatica senza una comprensione sistematica del parallelismo, della concorrenza o della scalabilità. Di conseguenza, si laureano con forti competenze di programmazione sequenziale, ma non hanno la capacità di progettare algoritmi e software in grado di sfruttare in modo efficiente le moderne architetture multicore e distribuite.

Capacità di ottimizzazione insufficienti: un altro punto debole critico riguarda le capacità di ottimizzazione. Anche quando gli studenti imparano a scrivere codice parallelo, raramente vengono addestrati ad analizzare le prestazioni, profilare le applicazioni o ottimizzare sistematicamente il software per sfruttare sistemi su larga scala. La capacità di scalare un programma da un desktop a centinaia o migliaia di core richiede non solo la codifica, ma anche le pratiche di ingegneria delle prestazioni, ovvero l'utilizzo di strumenti per identificare i colli di bottiglia, comprendere le gerarchie di memoria e applicare ottimizzazioni algoritmiche. L'assenza di tale formazione significa che i

laureati spesso conoscono la sintassi della programmazione parallela ma non la metodologia per raggiungere l'efficienza sulle infrastrutture HPC.

Scarsa esposizione ai flussi di lavoro dei dati: un'ulteriore lacuna riguarda la gestione dei flussi di lavoro dei dati. L'HPC oggi non si limita al calcolo, ma coinvolge sempre più pipeline di dati complesse, dall'I/O parallelo all'orchestrazione del flusso di lavoro e alle pratiche di riproducibilità; tuttavia, questi aspetti sono raramente enfatizzati nell'educazione informatica. Gli studenti possono essere introdotti ad algoritmi e sistemi, ma ricevono poche indicazioni su come gestire grandi volumi di dati di simulazione, progettare flussi di lavoro portatili o garantire la riproducibilità in ambienti eterogenei. Questa omissione è problematica, dal momento che le solide pratiche di gestione dei dati sono ora centrali per il calcolo scientifico quanto la correttezza del codice.

Focus ristretto: infine, la formazione in informatica spesso mantiene un focus ristretto sulla conoscenza teorica a scapito dell'esposizione pratica. I corsi tendono a enfatizzare la complessità algoritmica, i concetti di architettura o i modelli formali senza incorporare sufficientemente le opportunità di interagire con ambienti HPC reali o problemi scientifici applicati. Di conseguenza, i laureati possono essere teoricamente ben preparati ma inesperti nell'implementazione e nel test di applicazioni su piattaforme HPC reali. Ciò crea uno scollamento tra la preparazione accademica e le esigenze dei centri di ricerca o dell'industria, dove la competenza nella navigazione negli ambienti HPC e nell'applicazione dell'HPC alle sfide del mondo reale è indispensabile.

Bisogni formativi per studenti e ricercatori di dominio

Bassa alfabetizzazione computazionale: una lacuna formativa centrale per gli studenti e i ricercatori del settore è la bassa alfabetizzazione computazionale. Molti studenti in discipline come la fisica, la biologia o l'ingegneria non hanno competenze di base nella programmazione, negli ambienti Unix o nell'uso di pianificatori di lavoro e modelli di calcolo parallelo. Quando questi studenti incontrano le risorse HPC, spesso si avvicinano ad esse con la mentalità del desktop computing, senza comprendere i principi della concorrenza, della memoria distribuita o dell'allocazione delle risorse. Ciò crea barriere significative all'ingresso e impedisce loro di utilizzare i sistemi HPC in modo efficace, anche quando tali risorse sono essenziali per la loro ricerca.

Eccessiva dipendenza dagli strumenti di dominio: un'altra debolezza deriva da un'eccessiva dipendenza da pacchetti software specifici per il dominio. I ricercatori

imparano spesso a utilizzare strumenti specializzati come GROMACS in chimica o Abaqus in ingegneria, sempre come utenti finali piuttosto che come sviluppatori. Sebbene questi pacchetti consentano loro di eseguire simulazioni su sistemi HPC, non li dotano delle competenze per adattare, estendere o ottimizzare il software per nuovi problemi o scale più ampie. Questa dipendenza limita la loro autonomia e li rende dipendenti da un piccolo pool di esperti computazionali, rallentando l'innovazione e riducendo la flessibilità nell'applicazione dell'HPC alle sfide emergenti della ricerca.

Colmare il divario: un divario di collegamento persistente colpisce anche questo gruppo. Molti curricula STEM presuppongono che le competenze informatiche esulino dal loro ambito disciplinare, lasciando gli studenti senza una formazione di base in programmazione, strutture dati o concetti di scalabilità. L'assenza di corsi introduttivi di informatica su misura per un pubblico di non informatici significa che gli studenti di discipline di dominio devono acquisire competenze essenziali in modo informale, spesso durante gli studi di dottorato o quando incontrano per la prima volta l'HPC nella pratica. Questo inizio tardivo rende la curva di apprendimento più ripida e riduce il potenziale di innovazione interdisciplinare che potrebbe emergere se il pensiero dei fondamenti dell'informatica fosse incorporato prima nella loro formazione.

Formazione contestuale mancante: gli studenti del settore devono anche affrontare una mancanza di opportunità di formazione contestualizzate. Anche quando vengono introdotti i concetti di HPC, questi vengono spesso presentati in termini astratti o tecnici piuttosto che in relazione al campo di studio dello studente. Ad esempio, gli ingegneri traggono i maggiori vantaggi dall'applicazione dell'HPC alle simulazioni di Digital Twin dei processi industriali, mentre i biologi si impegnano in modo più efficace quando la formazione include pipeline genomiche o dinamiche molecolari. Senza tale rilevanza contestuale, l'educazione HPC rimane scollegata dal dominio dei problemi che interessa agli studenti, riducendo la motivazione e ostacolando il trasferimento delle conoscenze.

Divario di consapevolezza: infine, c'è un pronunciato divario di consapevolezza riguardo alla convergenza dell'HPC con l'intelligenza artificiale, i big data e le tecnologie emergenti come l'informatica quantistica. Molti ricercatori del settore non hanno familiarità con il modo in cui l'analisi dei dati su larga scala o i flussi di lavoro di apprendimento automatico possono essere accelerati e scalati sui sistemi HPC. Allo stesso modo, non sono esposti a paradigmi lungimiranti come l'integrazione quantistica-HPC, che probabilmente influenzeranno i loro campi nei prossimi decenni. Senza una formazione strutturata in queste aree, gli studenti e i ricercatori del settore rischiano di

essere esclusi dagli sviluppi all'avanguardia, perpetuando un divario tra competenze disciplinari e innovazione computazionale.

Bisogni formativi in ambito accademico (docenti, studenti, ricercatori)

Frammentazione dei curricula: una lacuna persistente nel mondo accademico è la frammentazione dei curricula. I temi dell'HPC non sono sistematicamente inclusi in tutte le discipline e rimangono integrati in modo incoerente tra le istituzioni. Mentre alcune università offrono moduli dedicati al calcolo parallelo, molte altre trattano l'HPC come una materia di nicchia, relegata a corsi opzionali o corsi di laurea specializzati. Questa mancanza di coerenza significa che l'esposizione degli studenti all'HPC dipende fortemente dal luogo in cui studiano, portando a una preparazione disuguale in tutto il panorama accademico.

Divario nella preparazione degli educatori: un'altra grande sfida è la preparazione limitata degli educatori. Solo una piccola parte dei docenti possiede una profonda esperienza nel calcolo parallelo e distribuito, e ancora meno hanno una formazione formale in pedagogia specifica per l'HPC. Molti corsi sono tenuti da ricercatori o personale tecnico esperti nel loro campo ma che non hanno familiarità con strategie di insegnamento efficaci per materiale così complesso e astratto. Questa carenza di formatori qualificati e ben preparati riduce la qualità e la scalabilità della formazione all'HPC, lasciando le istituzioni dipendenti da un piccolo pool di specialisti.

Riproducibilità sottovalutata: anche la riproducibilità e le pratiche di scienza aperta sono sottovalutate nella formazione accademica HPC. Sebbene la riproducibilità sia fondamentale per la credibilità scientifica, agli studenti viene raramente insegnato a documentare i flussi di lavoro, gestire ambienti computazionali o verificare i risultati su piattaforme eterogenee. Senza istruzioni esplicite su queste pratiche, i futuri ricercatori rischiano di perpetuare lavori non riproducibili, minando il valore scientifico della ricerca basata sull'HPC. L'uso di software proprietario aggrava il problema. Incorporare la riproducibilità nei programmi di studio è essenziale per allineare l'educazione HPC con movimenti più ampi verso la trasparenza e la scienza aperta.

Esposizione tardiva: i concetti di HPC tendono anche a essere introdotti troppo tardi nella traiettoria accademica. La concorrenza, la scalabilità e il pensiero parallelo sono spesso riservati agli studi di master o dottorato, quando gli studenti potrebbero aver già sviluppato abitudini di programmazione sequenziale difficili da disimparare.

L'introduzione di questi concetti all'inizio della formazione universitaria normalizzerebbe il pensiero parallelo e garantirebbe che gli studenti si avvicinino all'informatica tenendo presente la scalabilità fin dall'inizio. L'attuale esposizione tardiva rappresenta un'opportunità mancata per coltivare l'alfabetizzazione computazionale come competenza fondamentale.

Limiti di accesso all'infrastruttura: infine, molti studenti soffrono di un accesso limitato all'infrastruttura HPC durante i loro studi. Sebbene sia disponibile la formazione teorica, l'esperienza pratica con cluster reali o supercomputer è spesso assente. In alcune istituzioni, gli studenti possono sperimentare solo simulazioni su piccola scala su laptop personali, senza imparare a interagire con schedulatori, code o grandi sistemi distribuiti. Questa mancanza di esposizione pratica crea una disconnessione tra la formazione accademica e gli ambienti che i laureati incontreranno nei centri di ricerca o nell'industria, dove la familiarità con i sistemi HPC reali è un requisito di base.

Bisogni formativi per professionisti e operatori dell'industria

Fondamenta mancati: una lacuna cruciale per i professionisti del settore è l'assenza di basi HPC nella loro educazione formale. Molti ingegneri, analisti e personale tecnico non hanno mai incontrato i concetti HPC durante gli studi universitari, il che significa che arrivano sul posto di lavoro con una forte esperienza nel settore ma nessuna comprensione della programmazione parallela, del calcolo distribuito o della scalabilità delle prestazioni. Questo crea una forte barriera all'ingresso: i professionisti devono apprendere le basi dell'HPC e contemporaneamente applicarlo ai problemi del mondo reale, un processo che rallenta l'adozione e riduce l'efficienza nei contesti industriali.

Adozione di standard aperti: un altro problema urgente è l'adozione limitata di standard aperti. Le aziende spesso si affidano a strumenti proprietari e soluzioni specifiche del fornitore che risolvono le esigenze immediate, ma limitano la flessibilità a lungo termine. La formazione sulle librerie open source e sugli standard di interoperabilità come MPI, OpenMP, OpenACC e sulle pratiche di containerizzazione è essenziale per creare software e flussi di lavoro portabili tra le piattaforme ed evitare costosi vincoli al fornitore. Senza tale formazione, le organizzazioni rischiano di isolare le proprie capacità HPC e di perdere competitività con l'evoluzione delle tecnologie.

Disallineamento dei formati formativi: anche l'allineamento delle opportunità formative con le effettive esigenze professionali è problematico. Molti workshop disponibili sono troppo basilari, ripetono concetti che i partecipanti già conoscono, o troppo avanzati, richiedendo conoscenze preliminari che molti non hanno. I moduli di livello intermedio che si concentrano sul colmare le lacune sono scarsi. I professionisti richiedono anche formati di apprendimento brevi e flessibili (micro-corsi, workshop modulari o formazione online) che possono essere integrati in orari di lavoro impegnativi. L'attuale discrepanza riduce l'accessibilità e l'impatto della formazione per il personale del settore.

Necessità di aggiornamento continuo: l'aggiornamento continuo rappresenta un'altra sfida critica. Il panorama HPC si evolve rapidamente, con nuove architetture GPU, acceleratori specializzati e flussi di lavoro ibridi che combinano tecnologie HPC, AI e cloud. I professionisti dell'industria devono riqualificarsi continuamente per stare al passo con questi cambiamenti, ma le opportunità strutturate di formazione continua sono limitate. Senza percorsi sistematici per l'aggiornamento delle competenze, le aziende faticano a mantenere team in grado di sfruttare le risorse HPC all'avanguardia.

Divario di certificazione: la certificazione è un'altra area di bisogni insoddisfatti. Sia i professionisti che i datori di lavoro apprezzano le credenziali riconosciute per confrontare le competenze HPC e per convalidare che i risultati della formazione si traducano in competenze sul posto di lavoro. Tuttavia, i quadri di certificazione standardizzati stanno ancora emergendo e molti degli attuali sforzi di formazione non forniscono alcun riconoscimento formale. L'assenza di certificazioni ampiamente accettate riduce l'incentivo per le persone a seguire la formazione e limita la capacità dei datori di lavoro di valutare la preparazione della forza lavoro.

Debolezza nel trasferimento delle conoscenze: anche il trasferimento delle conoscenze all'interno delle aziende è debole. L'esperienza nell'HPC è spesso concentrata in una manciata di specialisti che portano gran parte del know-how organizzativo. Questo crea colli di bottiglia e rischi: se questi esperti lasciano o cambiano ruolo, le competenze critiche vengono perse. Raramente sono in atto pratiche di formazione, mentoring e documentazione strutturata a livello di team più ampie, il che significa che la conoscenza HPC non si diffonde in modo efficace tra i team di progettazione o ricerca e sviluppo.

Sfide di accesso: infine, l'accesso alle infrastrutture rappresenta un ostacolo significativo, soprattutto per le piccole e medie imprese (PMI). A differenza delle grandi

aziende o dei centri di ricerca, le PMI in genere non dispongono di risorse HPC dedicate. Mentre i centri HPC nazionali ed europei, così come i fornitori di cloud, offrono l'opportunità di accedere alla potenza HPC, molte aziende non dispongono della formazione necessaria per navigare in questi sistemi, preparare applicazioni o gestire i dati in modo sicuro su larga scala. Questa mancanza di sviluppo delle capacità significa che le PMI, nonostante il loro potenziale di beneficiare dell'HPC, rimangono sottorappresentate nella sua adozione.

Bisogni formativi trasversali

Tecnologie emergenti sottorappresentate: una delle lacune trasversali più importanti nella formazione HPC è la limitata attenzione data alle tecnologie emergenti. I programmi di formazione raramente incorporano contenuti sui gemelli digitali, sull'integrazione AI-HPC su larga scala o sui principi dell'informatica quantistica. Poiché questi campi plasmano sempre più il futuro delle scienze computazionali e dell'innovazione industriale, l'assenza di una formazione strutturata lascia studenti e professionisti impreparati a lavorare con i sistemi ibridi ed eterogenei che stanno già diventando standard. Senza l'esposizione a queste tendenze, gli studenti rischiano di laurearsi con competenze che sono rapidamente obsolete.

Gestione e governance dei dati: la gestione e la governance dei dati rappresentano un altro grave deficit. Sebbene l'elaborazione sia al centro dell'HPC, la capacità di gestire i dati in modo efficiente su larga scala è altrettanto fondamentale. Tuttavia, pochi programmi di studio forniscono una copertura sistematica di I/O paralleli, gerarchie di archiviazione o strategie per la localizzazione dei dati. Ancora meno enfasi è posta sulla garanzia della riproducibilità, sulla documentazione dei flussi di lavoro o sull'integrazione di pratiche di intelligenza artificiale e dati responsabili nelle pipeline HPC. La mancanza di tale formazione non solo mina il rigore scientifico, ma impedisce anche ai professionisti di soddisfare gli standard del settore per la conformità, la verificabilità e l'uso affidabile dei dati.

Sostenibilità e impatto sociale: un ulteriore divario riguarda la sostenibilità e l'impatto sociale. L'HPC richiede molta energia, ma i programmi di formazione raramente affrontano i costi ambientali del calcolo su larga scala o le strategie per mitigarli. Allo stesso modo, viene dato poco spazio alle più ampie implicazioni etiche e sociali dell'HPC, come il suo ruolo nella modellizzazione del clima, nell'assistenza sanitaria o nella sicurezza nazionale. Incorporare la sostenibilità e l'etica nella formazione HPC è

essenziale per preparare professionisti in grado di bilanciare gli obiettivi di performance con la responsabilità sociale.

Collaborazione interdisciplinare: un altro problema condiviso da tutti i profili è la mancanza di formazione in comunicazione interdisciplinare. I progetti HPC richiedono quasi sempre la collaborazione tra scienziati del dominio, informatici e ingegneri, ma i programmi continuano a formare questi gruppi in modo isolato. Pochi corsi offrono l'opportunità di sviluppare capacità di lavoro di squadra, dialogo interdisciplinare o risoluzione congiunta dei problemi. Ciò perpetua i silos che rallentano l'innovazione e limitano l'efficacia dell'HPC nell'affrontare sfide complesse e reali.

Metodi pedagogici: infine, i metodi pedagogici stessi contribuiscono al divario. Sebbene studenti e professionisti esprimano costantemente una preferenza per l'apprendimento pratico e basato su progetti, molti corsi HPC rimangono ricchi di lezioni, eccessivamente teorici e inaccessibili ai principianti. Gli studenti entry-level, in particolare, trovano spesso scoraggiante l'HPC quando viene introdotto attraverso modelli astratti piuttosto che da esercizi pratici. Sono quindi necessari approcci pedagogici più coinvolgenti e inclusivi, come laboratori interattivi, progetti collaborativi ed esercizi su scaffolding, per abbassare la barriera di ingresso e garantire il mantenimento a lungo termine delle competenze HPC.

Le Big Ideas dell'High-Performance Computing

Le Big Ideas dell'HPC

1 Il calcolo ha limiti fisici — e l'HPC può aiutare a superarli

I computer sono dispositivi fisici. La loro velocità e capacità dipendono dai **vincoli del mondo reale**: energia, spazio, calore e tempo. L'HPC esiste perché vogliamo risolvere problemi che superano le capacità dei sistemi ordinari. Dalle previsioni meteorologiche al ripiegamento delle proteine, l'HPC ci aiuta a superare i limiti di ciò che il calcolo può ottenere.

Scavando più a fondo:

- I limiti fisici (ad esempio, calore, potenza, densità dei transistor) hanno posto fine all'era dei guadagni automatici delle prestazioni attraverso velocità di clock più elevate.
- L'HPC aumenta la scalabilità: usa molte unità di elaborazione che lavorano insieme.
- Questo ci permette di eseguire simulazioni, analisi ed esperimenti che non sono fattibili sui computer convenzionali.
- I vincoli ci ricordano che l'informatica comporta sempre dei compromessi: energia, denaro e tempo.
- Le nuove tecnologie, come l'informatica quantistica, mirano a superare gli attuali limiti fisici; tuttavia, l'HPC rimane il paradigma dominante per risolvere i problemi più significativi e complessi di oggi.
- **L'efficienza energetica** è diventata un obiettivo di progettazione di prim'ordine nei sistemi HPC. La spinta verso l'exascale computing ha reso metriche come *i FLOPS per watt* importanti quanto la velocità grezza. Questa attenzione all'energia è in linea con gli obiettivi più ampi del **green computing**, riflettendo la necessità della società di ridurre l'impatto ambientale delle infrastrutture computazionali su larga scala.

2 Il parallelismo sblocca la velocità e la scala

La chiave della moderna potenza di calcolo è il **parallelismo:** fare molte cose contemporaneamente. Invece di risolvere un problema passo dopo passo, lo dividiamo in parti che possono essere eseguite contemporaneamente. Il parallelismo non è solo un trucco tecnico: è un principio fondamentale che ci consente di pensare più in grande, risolvere più velocemente e andare oltre.

Scavando più a fondo:

- Il parallelismo si verifica a tutti i livelli: all'interno dei processori (SIMD), tra i core (MIMD) e tra i sistemi (memoria distribuita).
- Per utilizzare il parallelismo, un problema deve essere scomposto in attività indipendenti o semi-indipendenti.
- **Parallelismo dei dati:** applicazione della stessa operazione a parti diverse di un set di dati.
- **Parallelismo delle attività:** esecuzione simultanea di diverse attività.
- I programmi paralleli richiedono coordinamento: comunicazione, sincronizzazione e bilanciamento del carico.
- **I modelli di progettazione parallela** sono strategie comuni per l'organizzazione di calcoli paralleli. Forniscono strutture riutilizzabili per risolvere classi di problemi in modo efficiente. Esempi di modelli includono *master/worker* (coordinamento centrale con il lavoro distribuito), *pipeline* (fasi di elaborazione), *SPMD* (tutti i processori eseguono lo stesso programma su dati diversi) e *embarrassingly parallel* (attività eseguite in modo indipendente senza necessità di comunicazione).

3 La performance nasce dall'accordo tra algoritmo e architettura

Non esiste un algoritmo universalmente "migliore". Le prestazioni dipendono da quanto un algoritmo si adatta bene all'hardware sottostante. Nell'HPC, ottimizziamo il software, le strutture di dati e le strategie parallele in modo che corrispondano ad architetture specifiche.

Scavando più a fondo:

- Le gerarchie di memoria e la topologia del processore influenzano l'efficienza dell'algoritmo.
- La comunicazione è spesso più costosa del calcolo: ridurre al minimo lo spostamento dei dati è importante.
- Gli algoritmi paralleli spesso differiscono fondamentalmente da quelli seriali; Un parallelismo efficace può richiedere un ripensamento dell'algoritmo.

La scomposizione è fondamentale

Il calcolo scalabile richiede **la scomposizione:** dividere un problema in parti che possono essere risolte contemporaneamente. Il modo in cui un problema viene scomposto spesso determina se può essere risolto in parallelo.

Scavando più a fondo:

- **La scomposizione dei dati** assegna parti diverse di un set di dati a diversi elementi di elaborazione.
- **La scomposizione delle attività** assegna calcoli diversi a elementi diversi.
- La scomposizione deve bilanciare il carico di lavoro e ridurre al minimo la comunicazione tra le attività.
- Una scomposizione efficace non è sempre ovvia; Può richiedere una profonda esperienza nel settore, una conoscenza specifica del problema o l'uso di strumenti automatizzati per identificare la struttura parallela.

5 La comunicazione può essere più dispendiosa della computazione

Nei sistemi paralleli, lo spostamento dei dati è spesso il principale collo di bottiglia. Man mano che i sistemi crescono, il costo della comunicazione (in tempo ed energia) può dominare il costo del calcolo.

Scavando più a fondo:

- **La latenza** è il ritardo con cui avviare la comunicazione; **La larghezza di banda** è la quantità di dati trasferiti per unità di tempo.
- La comunicazione introduce ritardi, sovraccarichi di sincronizzazione e potenziali conflitti.
- Ridurre al minimo la comunicazione è un obiettivo primario di progettazione negli algoritmi paralleli.
- Il costo della comunicazione non è solo un collo di bottiglia, ma un fattore importante nel consumo di energia
- Le strategie includono le celle fantasma (dati edge duplicati per ridurre la comunicazione), il blocco (organizzazione dei dati in blocchi che si adattano alla cache o riducono il trasferimento), il calcolo e la comunicazione sovrapposti (lavorando durante il trasferimento dei dati in background) e **gli algoritmi che evitano la comunicazione** (progetti che riducono al minimo la necessità di scambiare dati tra le unità di elaborazione).

L'HPC vuole cordinazione tra hardware e software

L'HPC è una sfida di co-progettazione: software e hardware devono lavorare insieme. Sapere come funziona l'hardware consente un software migliore; Un buon software sblocca il potenziale dell'hardware.

Scavando più a fondo:

- La scelta del layout dei **dati, del modello di memoria e della struttura parallela** spesso determina se un programma può sfruttare efficacemente l'hardware moderno.
- Le architetture HPC sono sempre più **eterogenee** e combinano CPU, GPU e acceleratori specializzati, richiedendo ai programmatori di comprendere diversi modelli di esecuzione e memoria.
- **La co-progettazione** (lo sviluppo congiunto di hardware e software con consapevolezza reciproca) sta diventando un approccio standard nella progettazione di sistemi HPC, garantendo che i sistemi e le applicazioni si evolvano insieme per prestazioni ed efficienza ottimali.
- Le unità SIMD/vettoriali consentono operazioni ad alto rendimento su array di dati.
- Il coordinamento comprende la modellazione delle prestazioni, i test di scalabilità e la comprensione di funzionalità architetturali come NUMA o topologia di interconnessione.
- La portabilità delle prestazioni, ovvero la scrittura di codice che viene eseguito in modo efficiente su molte piattaforme, rimane una grande sfida.

7 Le scoperte scientifiche e l'innovazione dipendono dall'HPC

L'HPC abilita la scienza su larga scala. Dalla simulazione delle galassie alla progettazione di nuovi materiali, cambia ciò che possiamo modellare, esplorare e scoprire.

Scavando più a fondo:

- Campi come la scienza del clima, la genomica, la fisica e la medicina si basano sulle simulazioni HPC.
- L'HPC viene utilizzato anche nell'industria, dove ottimizza le catene di approvvigionamento, modella il rischio finanziario e addestra i modelli di intelligenza artificiale.
- Molte scoperte sono guidate da simulazioni che sarebbero impossibili senza il calcolo parallelo.
- L'HPC non si limita a velocizzare le cose vecchie, ma consente di porre *nuovi* tipi di domande.
- Siamo nell'era della **scienza basata sui dati.** L'HPC consente l'archiviazione, l'elaborazione e l'analisi di petabyte di dati scientifici, consentendo non solo simulazioni, ma anche data mining, inferenza statistica e apprendimento automatico.
- L'HPC è fondamentale per l **'addestramento dell'IA su larga scala** (ad esempio, LLM)
- L'ascesa della convergenza tra **intelligenza artificiale e HPC** consente agli scienziati di combinare le simulazioni con sistemi di apprendimento che adattano, accelerano o addirittura sostituiscono i modelli tradizionali

Non tutti i problemi sono scalabili — alcuni non lo saranno mai

Alcuni calcoli resistono alla parallelizzazione. Altri scalano male a causa del coordinamento o dei limiti hardware. La comprensione della scalabilità è fondamentale per l'HPC.

Scavando più a fondo:

- **Legge di Amdahl:** anche una piccola frazione seriale può limitare l'accelerazione.
- **Legge di Gustafson:** l'aumento delle dimensioni del problema può mantenere l'efficienza.
- **Scalabilità avanzata:** risoluzione più rapida di un problema di dimensioni fisse utilizzando più processori.
- **Scalabilità debole:** risolve problemi più grandi nello stesso tempo aumentando proporzionalmente il numero di processori.
- La scalabilità è limitata dalle sezioni seriali, dal sovraccarico di comunicazione e dalla struttura dell'algoritmo.

La riproducipilità e la precisione sono importanti

Su scala HPC, piccoli errori numerici possono diventare problemi significativi. Il calcolo scientifico deve essere accurato, stabile e riproducibile, anche in parallelo.

Scavando più a fondo:

- Le operazioni a virgola mobile non sono associative. Ordini di operazioni diversi possono produrre risultati diversi.
- Le riduzioni parallele (operazioni che combinano valori tra più processori, come la somma di una matrice in parallelo) possono essere **non deterministiche** a meno che non siano controllate in modo esplicito.
- La riproducibilità scientifica dipende anche dal tracciamento delle versioni, dagli input e dagli ambienti di calcolo.
- Strumenti open source, basi di codice controllate dalla versione e pipeline ben documentate sono essenziali per garantire che i risultati possano essere replicati e verificati da altri.

10 Il pensiero HPC è un'abilità trasferibile

Le competenze sviluppate nell'HPC (ragionamento parallelo, modellazione delle prestazioni, scomposizione) sono sempre più rilevanti in tutti i settori, dall'intelligenza artificiale al cloud computing ai sistemi embedded.

Scavando più a fondo:

- Il **Quarto Paradigma** della scienza (dopo la teoria, l'esperimento e la simulazione) enfatizza la **scoperta ad alta intensità di dati**. Le competenze HPC, ovvero la gestione delle pipeline di dati, l'ottimizzazione delle prestazioni, la scalabilità dell'analisi, sono fondamentali per questo approccio.
- La comprensione dei **principi dell'HPC** prepara gli studenti non solo al supercomputing, ma a qualsiasi dominio in cui le prestazioni, la scalabilità e la complessità contano, tra cui **l'intelligenza artificiale, la robotica, l'edge computing e i sistemi ibridi quantistici-classici.**
- Gli stessi concetti si applicano all'addestramento dei modelli di intelligenza artificiale, all'analisi in tempo reale e al mobile computing.
- Pensare in termini di coordinamento, scalabilità e prestazioni è funzionale anche al di fuori dell'HPC.
- La didattica nell'HPC coltiva una mentalità che implica l'analisi dei problemi, la comprensione dei compromessi e il ragionamento sui sistemi su larga scala.
- L'informatica sostenibile è un campo di competenza emergente. Il pensiero HPC promuove la consapevolezza dell'**efficienza delle risorse**, che è fondamentale non solo per le prestazioni, ma anche per la progettazione **di tecnologie più ecologiche e responsabili**.

Raccomandazioni per la progettazione didattica

Dai risultati alle raccomandazioni per la progettazione didattica

L'analisi delle esigenze e delle sfide attuali nell'educazione HPC può essere tradotta in raccomandazioni concrete per la progettazione di programmi didattici più efficaci. Alla luce dei nostri risultati, tra cui le "Big Ideas" identificate dagli esperti e le lacune nelle competenze sia per il mondo accademico che per l'industria, proponiamo diverse strategie per migliorare la formazione sull'HPC.

Integrare i fondamenti di HPC nei curricula

Le università dovrebbero incorporare concetti di base di calcolo parallelo, distribuito e ad alte prestazioni nei corsi di laurea pertinenti (non solo nei percorsi specializzati). Ciò significa introdurre gli studenti alla programmazione parallela, alla scalabilità algoritmica e alle considerazioni sulle prestazioni come parte dei corsi di informatica o scienza dei dati, piuttosto che trattare l'HPC come una nicchia isolata. Dato che la maggior parte degli attuali programmi di calcolo non copre affatto gli argomenti HPC (Chen, Ghafoor e Impagliazzo, 2022), è necessaria una riforma curricolare per garantire che i laureati acquisiscano almeno le conoscenze e le competenze HPC di base. L'esposizione precoce ai concetti fondamentali dell'HPC preparerà meglio gli studenti alle esigenze computazionali della scienza e dell'ingegneria moderne.

Adottare il framework delle "Big Ideas" per la progettazione dei curricula

Per dare struttura e coerenza alla formazione HPC, i formatori dovrebbero identificare una serie di Big Ideas generali (principi fondamentali) e organizzare i corsi intorno ad esse. La nostra ricerca indica che l'insegnamento dell'HPC è stato spesso ad hoc e incoerente, un problema che un approccio basato su Big Ideas può mitigare. Centrando il curriculum su concetti duraturi – ad esempio, "il parallelismo produce prestazioni (e i suoi limiti)", "scalabilità", "costi di località e spostamento dei dati", ecc. – gli educatori possono garantire che gli studenti comprendano i principi di alto livello che rimarranno rilevanti anche con l'evoluzione di specifiche tecnologie hardware e software. Questo approccio aiuta anche a creare terminologia e definizioni condivise in un campo in cui attualmente coesistono più notazioni e punti di vista (Raj et al., 2020). In breve, un

curriculum incentrato sui principi (piuttosto che sugli strumenti) rende l'apprendimento HPC più accessibile e duraturo, il che è particolarmente importante per i nuovi arrivati.

Costruire una comunità per i formatori

L'espansione della formazione all'HPC richiederà di investire in coloro che la insegnano. Le istituzioni e i responsabili politici dovrebbero incoraggiare la formazione di una comunità di pratica per l'educazione all'HPC, in cui ricercatori e professionisti esperti di HPC contribuiscano all'insegnamento e allo sviluppo del curriculum (Raj et al., 2020). Portare in aula esperti HPC attivi può aiutare a mantenere aggiornati i contenuti dei corsi con la tecnologia in rapida evoluzione. Allo stesso tempo, i docenti attuali hanno bisogno di supporto per acquisire competenze pedagogiche HPC. Fornire seminari di formazione per i docneti, insieme a materiali didattici condivisi apertamente (appunti delle lezioni, tutorial, compiti), è fondamentale in modo che i singoli insegnanti non debbano reinventare la ruota. Oggi solo un piccolo numero di docenti ha le competenze per insegnare l'HPC in modo approfondito (Raj et al., 2020), quindi sfruttare le collaborazioni (ad esempio, il co-insegnamento tra università o corsi virtuali) può ridurre l'onere per ogni singolo insegnante. Creando una comunità professionale per gli educatori HPC, possiamo accelerare il trasferimento delle conoscenze e diffondere le migliori pratiche nell'insegnamento del calcolo parallelo.

Integrare fondamenti di Data Management e AI Governance nei curricula HPC

Poiché i dati sono il motore centrale della scoperta scientifica e dell'innovazione, la formazione HPC deve fornire agli studenti non solo competenze computazionali, ma anche la capacità di gestire e governare responsabilmente i processi ad alta intensità di dati. La formazione dovrebbe riguardare i fondamenti tecnici della gestione dei dati su larga scala (I/O parallelo, gerarchie di archiviazione, località dei dati, riproducibilità dei flussi di lavoro), nonché i principi dell'AI responsabile, tra cui la trasparenza, la mitigazione delle distorsioni e la verificabilità dei modelli addestrati su larga scala su sistemi HPC. Gli studenti dovrebbero anche essere introdotti alle dimensioni normative e sociali dei dati, come la privacy, la sovranità dei dati e la conformità agli standard internazionali. Dal punto di vista pedagogico, questi argomenti possono essere integrati in progetti interdisciplinari in cui convergono l'informatica, la scienza dei dati e le

conoscenze specifiche del dominio, ad esempio casi di studio nella modellazione del clima, nella sanità o nella finanza che evidenziano sia le prestazioni tecniche che l'uso responsabile dei dati. Integrando queste prospettive, la formazione HPC preparerà professionisti che non sono solo tecnicamente competenti, ma anche in grado di guidare l'innovazione basata sui dati in modi etici, sostenibili e allineati con le esigenze della società.

Assicurare l'accesso agli ambienti HPC agli studenti

Una formazione efficace all'HPC deve essere esperienziale. Gli studenti hanno bisogno di opportunità per eseguire codice su sistemi multicore e distribuiti, sperimentare carichi di lavoro paralleli reali e osservare il comportamento delle prestazioni su larga scala. Si consiglia ai programmi di fornire piattaforme o simulatori HPC accessibili come parte dei corsi. Ciò potrebbe comportare l'utilizzo di cluster basati su cloud, supercomputer di formazione on-premise o persino piccoli laboratori di "mini-supercomputer". La chiave è lasciare che gli studenti vadano oltre gli esempi di giocattoli: dovrebbero affrontare problemi di sincronizzazione, latenza di comunicazione, bilanciamento del carico e gestione delle risorse in un ambiente realistico. I laboratori di calcolo generici non sono sufficienti per questo scopo (Raj et al., 2020). Le università e i consorzi potrebbero collaborare con i centri HPC nazionali per concedere agli studenti account su sistemi più grandi o utilizzare ambienti HPC containerizzati per l'insegnamento. Inoltre, i compiti dovrebbero includere studi di scalabilità (ad esempio, misurare come il runtime cambia da 2 a 32 processori) e l'uso di strumenti di analisi delle prestazioni, in modo che i laureati si sentano a proprio agio con gli strumenti e le tecniche di ottimizzazione HPC. Incontrando i vincoli pratici (sistemi di code, limiti di memoria, ecc.), gli studenti apprendono anche competenze preziose per l'utilizzo dell'HPC nel mondo reale. L'allocazione di risorse per l'accesso all'HPC educativo, possibilmente attraverso iniziative come la piattaforma di formazione HPC europea e le AI Factories, migliorerà significativamente i risultati didattici.

Proporre una formazione personalizzata per differenti profili d'apprendimento con approccio interdisciplinare

L'educazione all'HPC non dovrebbe adottare un approccio "taglia unica", poiché le esigenze degli informatici e degli scienziati di dominio (così come degli ingegneri industriali rispetto agli accademici) possono differire. Per gli studenti delle discipline scientifiche senza una formazione in informatica, i curricula dovrebbero enfatizzare i concetti essenziali di calcolo necessari per utilizzare l'HPC in modo efficace – ad esempio, la comprensione delle basi dell'elaborazione parallela (processi, thread, sincronizzazione), l'I/O parallelo e la gestione dei dati, nonché le nozioni di scalabilità e dei limiti di speedup (Raj et al., 2020). Questi studenti traggono beneficio da un approccio focalizzato sull'applicazione dell'HPC ai problemi del loro ambito (ad esempio eseguire simulazioni o analisi di dati), con i contenuti informatici presentati in modo accessibile (magari tramite framework ad alto livello o ambienti interattivi), una volta stabiliti i concetti di base .Al contrario, per gli studenti di informatica e ingegneria i programmi possono approfondire maggiormente gli aspetti interni dell'HPC: includendo un'ampia gamma di algoritmi paralleli, l'architettura dei supercomputer e degli acceleratori, le sfide classiche come le condizioni di competizione (race conditions) e i deadlock, fino ad arrivare ad argomenti avanzati come i pattern di progettazione parallela (Raj et al., 2020).Questa doppia impostazione garantisce che ciascun pubblico ottenga le basi adeguate: gli specialisti di dominio acquisiscono capacità di pensiero computazionale, mentre gli specialisti dell'informatica sviluppano competenze a livello di sistema, trovando comunque un terreno comune nei principi fondamentali dell'HPC. Inoultre, le iniziative di formazione all'HPC dovrebbero incoraggiare il lavoro di squadra interdisciplinare (ad esempio team misti di studenti di informatica e di scienze che affrontano un problema), riflettendo la natura collaborativa della scienza computazionale moderna. Un simile approccio mirato e integrato formerà laureati in grado di comunicare tra discipline diverse e di promuovere collettivamente l'adozione dell'HPC sia nella ricerca sia nell'industria.

Introdurre precocemente i concetti HPC

Sebbene siano ancora in una fase iniziale, le iniziative di formazione in ambito pre-universitario all'HPC e nel calcolo parallelo dimostrano che i giovani studenti possono impegnarsi in modo significativo con idee fondamentali come il parallelismo se insegnate attraverso metodi appropriati. Le attività pratiche (ad esempio, la costruzione di piccoli cluster, l'uso di analogie visive) e le competizioni possono suscitare curiosità e introdurre l'HPC anche in giovanissima età. La sfida principale risiede nella scalabilità, passando da workshop pilota isolati a una più ampia integrazione curricolare, che richiederà una formazione mirata degli insegnanti e la definizione di standard curriculari per l'informatica nella scuola secondaria che includano esplicitamente il parallelismo.

Integrare riflessioni sull'energia, sostenibilità e impatto sociale

La formazione sull'HPC non dovrebbe concentrarsi solo sull'efficienza tecnica, ma anche incoraggiare gli studenti a riflettere criticamente sull'impronta ambientale e sulle implicazioni sociali più ampie del supercalcolo. La formazione dovrebbe riguardare argomenti quali il consumo energetico di sistemi su larga scala, le strategie per il calcolo sostenibile e il ruolo dell'HPC nell'affrontare le sfide globali (ad esempio, la modellizzazione del clima, l'assistenza sanitaria, la preparazione ai disastri). L'integrazione di queste riflessioni nei programmi di studio favorirà una generazione di professionisti che non solo padroneggiano gli aspetti tecnici dell'HPC, ma sono anche in grado di prendere decisioni responsabili sul suo utilizzo nella società.

Integrare i trend HPC emergenti nei curricula

Con la rapida evoluzione del panorama HPC, la progettazione didattica dovrebbe anticipare e incorporare connessioni con paradigmi emergenti come l'intelligenza artificiale, l'informatica quantistica e i gemelli digitali. Queste tecnologie stanno convergendo sempre più con l'HPC, rimodellando sia la ricerca che le applicazioni industriali. Incorporando moduli o casi di studio sull'integrazione HPC-IA, l'accelerazione quantistica e l'uso di gemelli digitali per la simulazione e l'ottimizzazione, i programmi di studio possono rimanere orientati al futuro e adattabili. Ciò garantisce che gli studenti sviluppino sia solidi fondamenti HPC che l'agilità necessaria per interagire con le

tecnologie all'avanguardia che definiranno la prossima generazione di calcolo ad alte prestazioni.

Rafforzare i legami tra academia, industria e centri HPC

La progettazione didattica dovrebbe sfruttare partenariati al di fuori dell'aula tradizionale per mantenere i contenuti rilevanti e facilitare il trasferimento delle conoscenze. Raccomandiamo di integrare esperienze industriali e di ricerca nell'educazione all'HPC ovunque sia possibile. Ciò può spaziare da tirocini e collaborazioni progettuali (in cui gli studenti lavorano su applicazioni HPC reali in aziende o laboratori nazionali) all'invito di esperti del settore per seminari o alla co-progettazione di moduli di corso sulle tecnologie più avanzate. Il nuovo curriculum del master EuroHPC ha reso i tirocini industriali una componente obbligatoria, sottolineando il valore dell'esperienza pratica negli ambienti HPC di produzione (Bouvry et al., 2025). Tali esperienze espongono gli studenti a casi d'uso all'avanguardia dell'HPC (dall'automotive alla farmaceutica alla finanza) e a strumenti e flussi di lavoro moderni che potrebbero non essere ancora presenti nei manuali. Inoltre, contribuiscono a colmare il divario culturale tra teoria accademica e competenze pratiche: ad esempio, gli studenti apprendono l'ottimizzazione del software in condizioni reali o la collaborazione in grandi progetti HPC. La cooperazione tra accademia e industria può inoltre garantire che vengano enfatizzati temi come gli standard aperti e la riproducibilità, poiché le imprese cercano laureati in grado di scrivere codice HPC portabile e affidabile. Allineando i risultati formativi con le esigenze dei datori di lavoro e con la direzione della ricerca, queste collaborazioni rendono i programmi di HPC più dinamici e di impatto. In sintesi, un forte legame tra l'apprendimento in aula e l'ecosistema HPC più ampio – centri HPC, aziende e progetti internazionali – produrrà una generazione di professionisti ben preparati a far progredire lo stato dell'arte.

Riconoscere e certificare le competenze

Si raccomanda agli stakeholder di osservare attentamente e contribuire a iniziative come il Forum di certificazione HPC. Avere certificazioni o badge HPC ampiamente riconosciuti può aiutare in diversi modi: fornisce motivazione agli studenti (un obiettivo chiaro a cui puntare), aiuta i datori di lavoro a identificare talenti qualificati e stabilisce un obiettivo concreto per i programmi educativi con cui allinearsi. La collaborazione

tra università e industria nella definizione di questi standard di competenze è fondamentale per garantire che soddisfino le esigenze del mondo reale. Nel frattempo, le università potrebbero prendere in considerazione l'idea di offrire i propri certificati in HPC (ad esempio, un programma di certificazione che richiede una serie di corsi e un progetto relativi all'HPC) per riconoscere formalmente la specializzazione degli studenti, che può essere annotata su una trascrizione o un CV. L'approccio delle micro-credenziali, sperimentato nell'EU Master for HPC (Bouvry et al., 2025), è un percorso promettente da esplorare.

Supportare la diversità e l'inclusione nella didattica dell'HPC

Gli sforzi per rafforzare la didattica dell'HPC devono anche affrontare la persistente sottorappresentazione delle donne e dei gruppi minoritari nelle scienze computazionali e nell'ingegneria. La diversità non è solo una questione di equità, ma anche un motore di innovazione, poiché è stato dimostrato che team eterogenei producono soluzioni più creative e prospettive più ampie su sfide complesse. Le iniziative internazionali forniscono modelli utili: programmi come *Women in HPC* (istituito presso SC15 e ora attivo a livello globale) hanno creato reti di mentorship, workshop di formazione e campagne di visibilità per supportare le donne che entrano e avanzano nel calcolo ad alte prestazioni. Allo stesso modo, i progetti di sensibilizzazione negli Stati Uniti e in Europa hanno cercato di coinvolgere i gruppi sottorappresentati attraverso scuole estive, borse di studio e assunzioni mirate. Per basarsi su queste esperienze, i programmi di studio dovrebbero incorporare pratiche didattiche inclusive (ad esempio, utilizzando modelli di ruolo diversi, progettando punti di ingresso accessibili a discenti con diversi livelli di esperienza precedente) e fornire opportunità di tutoraggio strutturate per gli studenti provenienti da contesti sottorappresentati. Le politiche istituzionali possono sostenere ulteriormente la diversità sponsorizzando la partecipazione a conferenze internazionali sull'HPC, garantendo un accesso equo alle risorse di formazione e stabilendo partnership con iniziative che promuovono l'equilibrio di genere e una più ampia rappresentanza nell'informatica. Incorporare la diversità come principio guida nella formazione HPC non solo amplierà la pipeline di talenti, ma garantirà anche che la prossima generazione di professionisti HPC rifletta l'intero spettro della società.

Conclusione

L'implementazione di queste raccomandazioni può aiutare a modernizzare la formazione all'HPC e garantire che la progettazione didattica risponda alle esigenze attuali. Concentrandosi sui principi fondamentali, sulla pratica, sul supporto degli educatori, sull'inclusività dei diversi background e sulla collaborazione esterna, i programmi di formazione HPC possono produrre una forza lavoro più ampia e competente. Nel tempo, tali sforzi colmeranno il divario tra la rapida evoluzione dell'HPC e il ritmo più lento del cambiamento dei programmi di studio, consentendo in ultima analisi a un maggior numero di ricercatori, ingegneri e responsabili delle decisioni di sfruttare l'HPC per l'innovazione.

Bibliografia

Adams, J. C. (2021). Evolving PDC curriculum and tools: A study in responding to technological change. *Journal of Parallel and Distributed Computing, 157,* 201–219.

Association for Computing Machinery (ACM). (2023). *Computing curricula 2023 (CC2023): Paradigms for global computing education.* ACM. https://doi.org/10.1145/3664191

Bell, T., & Duncan, C. (2018). Teaching computing in primary schools. In S. Sentance, E. Barendsen, & C. Schulte (Eds.), *Computer science education: Perspectives on teaching and learning in school* (Chapter 10, pp. 131–150). Bloomsbury Academic. https://doi.org/10.5040/9781350057142.ch-010

Bohn, C., & Brown, C. (2020). Legion: A K-12 HPC outreach and education cluster. *Practice and Experience in Advanced Research Computing,* 448–451. https://doi.org/10.1145/3311790.3400845

Bouvry, P., Brorsson, M., Canal, R., Eftekhari, A., Höfinger, S., Smets, D., … & Silvano, C. (2025). The European master for HPC curriculum. *Journal of Parallel and Distributed Computing, 201,* 105081. https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2025.105081

Brođanac, P., Novak, J., & Boljat, I. (2022). Has the time come to teach parallel programming to secondary school students? *Heliyon, 8*(1), e08662. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08662

Bücker, H. M., Corrado, J., Fedorin, D., García-Álvarez, D., Gonzalez-Escribano, A., Li, J., Pantoja, M., Pautsch, E., Plesske, M., Ponce, M., Rizzi, S., Saule, E., Schoder, J., Thiruvathukal, G., Van Zon, R., Weber, W., & Bunde, D. P. (2023). Peachy parallel assignments (EduHPC 2023). In *Proceedings of the SC '23 Workshops of the International Conference on High Performance Computing, Network, Storage, and Analysis* (pp. 366–373). https://doi.org/10.1145/3624062.3625541

Chalmers, C., Carter, M., Cooper, T., & Nason, R. (2017). Implementing "big ideas" to advance the teaching and learning of science, technology, engineering, and mathematics (STEM). *International Journal of Science and Mathematics Education, 15,* 25–43.

Chen, J., Ghafoor, S., & Impagliazzo, J. (2022). Producing competent HPC graduates. *Communications of the ACM, 65*(12), 56–58.

Feng, A., Tilevich, E., & Feng, W. (2015). Block-based programming abstractions for explicit parallel computing. In *2015 IEEE Blocks and Beyond Workshop (Blocks and Beyond)* (pp. 71–75). IEEE. https://doi.org/10.1109/BLOCKS.2015.7369006

Fernandez Slezak, D., Turjanski, P. G., Montaldo, D., & Mocskos, E. E. (2010). Hands-on experience in HPC with secondary school students. *IEEE Transactions on Education, 53*(1), 128–135. https://doi.org/10.1109/TE.2009.2025491

Glaser, B. G., & Strauss, A. L. (1967). The discovery of grounded theory: Strategies for qualitative research. Routledge.

Gschwandtner, P., Hirsch, A., Thoman, P., Zangerl, P., Jordan, H., & Fahringer, T. (2021). The cluster coffer: Teaching HPC on the road. *Journal of Parallel and Distributed Computing, 155,* 50–62. https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2021.04.013

Harlen, W., Bell, D., Devés, R., Dyasi, H., Millar, R., Reiss, M., Rowell, P., & Welford, G. (2010). *Principles and big ideas of science education.* Association for Science Education.

Harlen, W., Bell, D., Devés, R., Dyasi, H., Millar, R., Reiss, M., Rowell, P., & Welford, G. (2015). *Working with big ideas of science education.* Science Education Programme (SEP) of IAP.

Kunkel, J., Filinger, W., Meesters, C., & Gerbes, A. (2020). The HPC certification forum: Toward a globally acknowledged HPC certification. *Computing in Science & Engineering, 22*(4), 110–114. https://doi.org/10.1109/MCSE.2020.2996073

Ludin, M., Weeden, A., Houchins, J., Thompson, S., Peck, C., Babic, I., Muterspaw, K., & Sergienko, E. (2013). LittleFe: The high performance computing education appliance. In *2013 IEEE International Conference on Cluster Computing (CLUSTER)* (pp. 1–1). IEEE. https://doi.org/10.1109/CLUSTER.2013.6702649

Matthews, S. J. (2020). PDCunplugged: A free repository of unplugged parallel distributed computing activities. In *2020 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops (IPDPSW)* (pp. 284–291). IEEE. https://doi.org/10.1109/IPDPSW50202.2020.00060

Morris, M., & Frinkle, K. (2014). A three-semester, interdisciplinary approach to parallel programming in a liberal arts university setting. In *Proceedings of the 2014 Annual Conference on Extreme Science and Engineering Discovery Environment* (pp. 1–7). https://doi.org/10.1145/2616498.2616567

Mwasaga, N. M., & Joy, M. (2020). Using high-performance computing artifacts as a learning intervention: A systematic literature review. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent and Innovative Computing Applications* (pp. 1–10). https://doi.org/10.1145/3415088.3415130

Prasad, S. K., Coyle, J., Farley, J., Robey, R., Rosenberg, A. L., Saule, E., & Weems, C. (2011). *NSF/IEEE-TCPP curriculum initiative on parallel and distributed computing: Core topics for undergraduates*. *In Proceedings of the 42nd ACM Technical Symposium on Computer Science Education* (pp. 617–618). ACM. https://doi.org/10.1145/1953163.1953336

Prasad, S. K., Estrada, T., Ghafoor, S., Gupta, A., Kant, K., Stunkel, C., Sussman, A., Vaidyanathan, R., Weems, C., Agrawal, K., Barnas, M., Brown, D. W., Bryant, R., Bunde, D. P., Busch, C., Deb, D., Freudenthal, E., Jaja, J., Parashar, M., Phillips, C., Robey, B., Rosenberg, A., Saule, E., & Shen, C. (2020). *NSF/IEEE-TCPP curriculum initiative on parallel and distributed computing – Core topics for undergraduates, version II-beta.* Center for Parallel and Distributed Computing Curriculum Development and Educational Resources *(CDER).* http://tcpp.cs.gsu.edu/curriculum/

Raj, R. K., Romanowski, C. J., Impagliazzo, J., Aly, S. G., Becker, B. A., Chen, J., … & Thota, N. (2020). *High performance computing education: Current challenges and future directions*. In 2020 ITiCSE Working Group Reports (pp. 51–74). Association for Computing Machinery.

Reid, A., Cais, A., Keller, T., Purwanto, W., & Rasel, A. A. (2024). HPC carpentry: A scalable, peer-reviewed training program to democratize HPC access. *The Journal of Computational Science Education, 15*(1), 32–34. https://doi.org/10.22369/issn.2153-4136/15/1/6

Reid, A., Keller, T., O'Cais, A., Rasel, A. A., Purwanto, W., Herriman, J., Muite, B., & Hermanns, M.-A. (2025). HPC carpentry: Recent progress and incubation toward an official carpentries lesson program. *The Journal of Computational Science Education, 16*(1), 31–34. https://doi.org/10.22369/issn.2153-4136/16/1/7

Saule, E., Subramanian, K., & Payton, J. (2021). We need community effort to achieve PDC adoption! In *2021 IEEE 28th International Conference on High Performance Computing, Data and Analytics Workshop (HiPCW)* (pp. 43–49). IEEE. https://doi.org/10.1109/HiPCW54834.2021.00013

Sbaraglia, M. (2023). *Teaching informatics to novices: Big ideas and the necessity of optimal guidance* [Doctoral dissertation, Alma Mater Studiorum Università di Bologna] Doctorate in Computer Science and Engineering, cycle 35. https://doi.org/10.48676/unibo/amsdottorato/10914

Schwill, A. (1994). Fundamental ideas of computer science. *Bulletin of the European Association for Theoretical Computer Science 53*, 274.

The Council of the European Union, Council Recommendation on a European approach to micro-credentials for lifelong learning and employability, Off. J. Eur. Union C243 (2022) 10–25, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022H0627(02)

Valentine, D. (2014). HPC/PDC immunization in the introductory computer science sequence. In *2014 Workshop on Education for High Performance Computing* (pp. 9–14). IEEE. https://doi.org/10.1109/EduHPC.2014.11

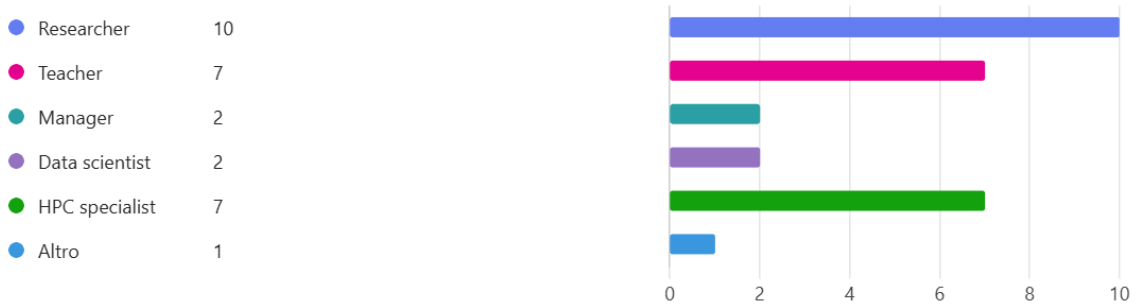
Vargas-Pérez, S. (2022). Designing an independent study to create HPC learning experiences for undergraduates. In *2022 IEEE 29th International Conference on High Performance Computing, Data and Analytics Workshop (HiPCW)* (pp. 6–11). IEEE. https://doi.org/10.1109/HiPCW57629.2022.00006

Appendice – Analisi e risultati del questionario

Profili demografici e professionali degli intervistati

Ruoli nel campo dell'HPC

3. What is your role in the field of HPC?



Le risposte alla domanda "Qual è il tuo ruolo nel campo dell'HPC?" evidenziano la diversità dei ruoli professionali che contribuiscono all'ecosistema dell'High Performance Computing. La maggior parte degli intervistati si identifica come *ricercatori* (comparendo in 9 risposte), suggerendo una forte attenzione agli aspetti teorici e sperimentali dell'HPC, tra cui lo sviluppo di algoritmi, l'ottimizzazione delle prestazioni e la modellazione computazionale. Questo è seguito da vicino da coloro che si identificano come *specialisti HPC* (che compaiono in 9 risposte), il che evidenzia l'importanza delle competenze tecniche pratiche nella gestione e nella manutenzione dei sistemi HPC, nonché nell'ottimizzazione del loro utilizzo per varie applicazioni.

La presenza di ruoli come *Insegnante* (che appare in 6 risposte) e *Manager* (che appare in 2 risposte) suggerisce che anche gli aspetti educativi e manageriali dell'HPC sono ben rappresentati, il che è fondamentale per la diffusione della conoscenza dell'HPC e la pianificazione strategica e il coordinamento delle iniziative HPC. In particolare, la combinazione di *Ricercatore* e *Insegnante* (5 risposte) sottolinea una miscela di responsabilità accademiche e pedagogiche, indicando che molti intervistati svolgono un duplice ruolo sia nella conduzione della ricerca che nella formazione della prossima generazione di professionisti HPC.

Ruoli aggiuntivi come *Data Scientist* (che appare in 2 risposte) e *Education and Training Officer* (che appare in 1 risposta) riflettono la crescente intersezione tra L'HPC e altri campi come la scienza dei dati, in cui l'HPC è fondamentale per l'elaborazione di set di dati di grandi dimensioni, e l'attenzione dedicata alla formazione e allo sviluppo delle competenze all'interno della comunità HPC.

Anni di esperienza nell'HPC

4. How many years of experience do you have in the field of HPC?

Le risposte alla domanda "Quanti anni di esperienza hai nel campo dell'HPC?" mostrano una vasta gamma di livelli di esperienza all'interno dei partecipanti al sondaggio, fornendo preziose informazioni sulle competenze della comunità HPC rappresentata.

Una percentuale significativa di intervistati (7 su 13) dichiara di avere 10+ anni di esperienza nel settore, evidenziando una forte presenza di professionisti di grande esperienza. Si tratta di un gruppo maturo di individui con una profonda esperienza nell'HPC, probabilmente in possesso di una conoscenza completa sia della sua evoluzione storica che dello stato attuale. La loro vasta esperienza potrebbe essere preziosa nell'identificare le "Big Ideas" nel campo, in particolare nella comprensione dei concetti fondamentali e dell'evoluzione a lungo termine della disciplina.

D'altra parte, le risposte riflettono anche una notevole presenza di professionisti con 5-10 anni di esperienza (3 su 13). Queste persone hanno probabilmente familiarità con i moderni progressi nelle tecnologie, negli strumenti e nelle metodologie HPC.

Una percentuale minore di intervistati (3 su 13) dichiara di avere meno di 5 anni di esperienza. Sebbene ciò possa indicare un coinvolgimento relativamente nuovo nel campo, apporta una nuova prospettiva all'indagine, possibilmente enfatizzando le tendenze emergenti nell'HPC e il modo in cui i nuovi professionisti percepiscono e interagiscono con i concetti fondamentali del campo.

Esperienza di insegnamento HPC

5. Do you have teaching experience in the field of HPC (at the university level or in professional training)?

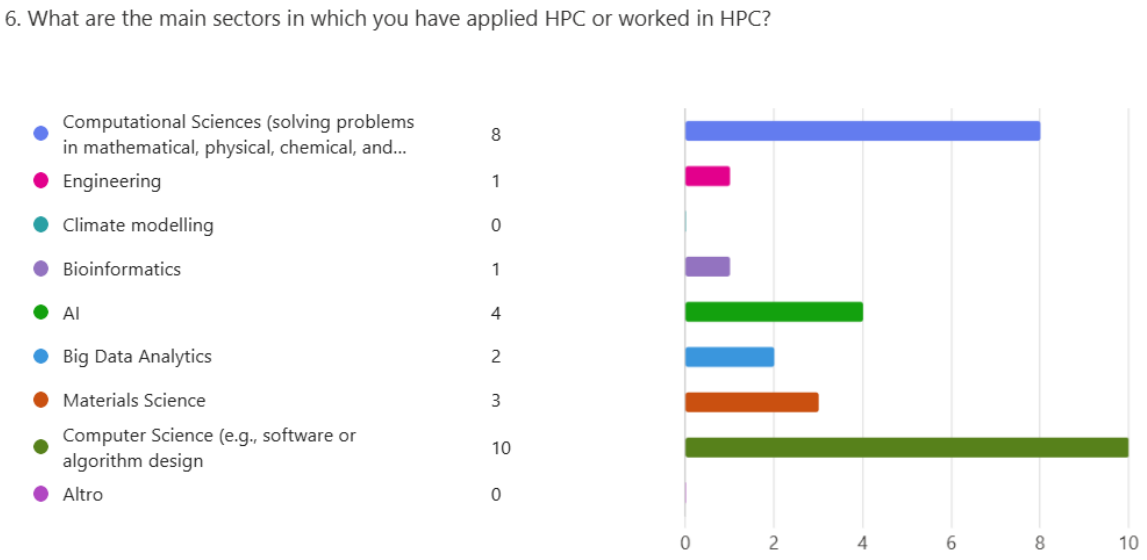
Le risposte suggeriscono un gruppo di intervistati altamente coinvolto con vari gradi di coinvolgimento nell'insegnamento, fornendo una gamma completa di prospettive sulle implicazioni educative dell'HPC. La maggior parte degli intervistati (8 su 13) indica di avere un'esperienza di insegnamento continua. Questi intervistati svolgono probabilmente un ruolo fondamentale nel plasmare la prossima generazione di professionisti HPC, sia in ambito accademico che attraverso programmi di sviluppo professionale.

Un gruppo più piccolo di intervistati (4 su 13) riporta esperienze di insegnamento occasionali nell'HPC, il che potrebbe indicare che l'insegnamento non è il loro ruolo primario, ma che contribuiscono all'istruzione su base meno frequente, potenzialmente attraverso conferenze ospiti, workshop o corsi brevi. Questo gruppo apporta anche preziose intuizioni, soprattutto con la loro esperienza nel campo e un coinvolgimento più sporadico ma comunque significativo nell'istruzione.

È interessante notare che due intervistati hanno riferito di non avere alcuna esperienza di insegnamento nell'HPC, il che potrebbe indicare che il loro lavoro nell'HPC è puramente incentrato su aspetti tecnici o di ricerca. Anche se potrebbero non essere direttamente coinvolti nell'insegnamento, le loro risposte possono offrire una prospettiva unica sull'identificazione delle "Big Ideas" da un punto di vista più pratico e pratico.

Strumenti e applicazioni HPC

L'analisi delle risposte alle domande riguardanti i settori in cui i partecipanti hanno applicato o lavorato con l'HPC e le tecnologie e gli strumenti che utilizzano più frequentemente nel loro lavoro quotidiano fornisce un quadro complesso e affascinante delle pratiche quotidiane e degli ambiti applicativi dell'High Performance Computing. I settori in cui gli intervistati hanno applicato o lavorato con l'HPC sono numerosi e variegati, riflettendo l'importanza dell'HPC in un'ampia gamma di campi accademici e industriali.

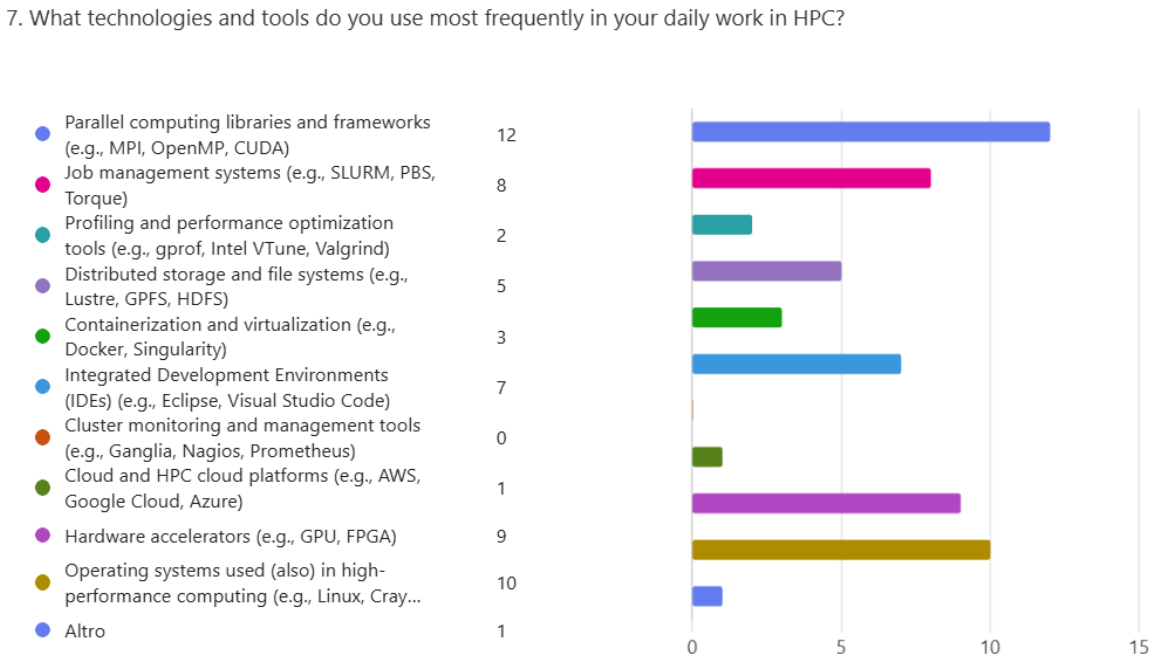


The majority of respondents indicated working in Computational Sciences, in particolare nella risoluzione di problemi matematici, fisici, chimici e di scienze naturali utilizzando l'HPC. Ciò riflette un'area fondamentale in cui le simulazioni complesse e l'elaborazione dei dati richiedono l'accesso a risorse computazionali avanzate. Le scienze computazionali rappresentano una parte fondamentale del campo dell'HPC e il loro impatto si estende ben oltre il mondo accademico, influenzando anche la ricerca industriale e il progresso tecnologico in diversi settori.

Inoltre, l'importanza dell'informatica è evidente, con molti intervistati che menzionano applicazioni relative alla progettazione di software e algoritmi. L'HPC è essenziale non solo per lo sviluppo di nuovi algoritmi, ma anche per l'ottimizzazione di quelli esistenti e per affrontare problemi computazionali complessi, come quelli che si presentano nell'intelligenza artificiale e nell'apprendimento automatico. In particolare, la

menzione dell'IA tra i settori indica la crescente integrazione dell'HPC nelle tecnologie di IA, che richiedono un'enorme potenza di calcolo per l'addestramento di modelli complessi.

Altri settori importanti includono la scienza dei materiali, la bioinformatica e l'analisi dei big data, che evidenziano come l'HPC venga utilizzato in campi interdisciplinari per esplorare nuove frontiere nella ricerca sui materiali, nelle scienze biomediche e nella gestione di vasti set di dati.



Per quanto riguarda le tecnologie e gli strumenti più utilizzati nel loro lavoro quotidiano, c'è una forte enfasi sulle librerie e sui framework di calcolo parallelo come MPI, OpenMP e CUDA, strumenti fondamentali per sfruttare la potenza dei moderni sistemi multicore e delle GPU. Queste tecnologie sono fondamentali per ottimizzare le prestazioni e garantire che i calcoli vengano eseguiti in modo efficiente su hardware ad alte prestazioni.

Anche i sistemi di gestione dei lavori (come SLURM, PBS, Torque) e i sistemi operativi (in particolare Linux e Cray OS) sono ampiamente utilizzati, evidenziando la necessità di gestire e coordinare risorse informatiche su larga scala. La gestione dei carichi di lavoro e delle risorse è una parte vitale dell'ecosistema HPC, in quanto consente l'uso ottimale delle infrastrutture di calcolo distribuite e parallele.

L'uso di acceleratori hardware come GPU e FPGA è altrettanto importante, riflettendo il ruolo crescente di questi strumenti nell'accelerazione di attività computazionali complesse, come l'addestramento di modelli di intelligenza artificiale e l'elaborazione di set di dati di grandi dimensioni. Le tecnologie di containerizzazione e virtualizzazione (come Docker e Singularity) stanno emergendo come soluzioni essenziali per garantire la portabilità e la scalabilità delle applicazioni HPC, soprattutto in ambienti cloud o distribuiti.

Inoltre, gli strumenti per l'ottimizzazione delle prestazioni e la profilazione (come gprof, Intel VTune, Valgrind) sono fondamentali per analizzare e migliorare l'efficienza delle applicazioni HPC, garantendo che le risorse computazionali siano utilizzate nel modo più efficace possibile.

Big Ideas identificate

Le domande aperte sull'identificazione delle Big Ideas sono state analizzate seguendo una metodologia di analisi tematica (Braun & Clarke, 2006). Questo ci ha permesso di identificare i temi ricorrenti che le Big Ideas affrontavano. Li riportiamo di seguito, con alcuni esempi tratti dalle risposte degli intervistati.

Tema	Esempio di Big Ideas degli intervistati che si riferiscono al tema
Parallelismo (algoritmi, strutture dati)	La parallelizzazione è la base dell'HPC. Questo si estende su diverse scale di grandezza: dai microprocessori, ai nodi di un sistema, a più sistemi. La parallelizzazione è fondamentalmente un problema di orchestrazione di più agenti. (R8) Al centro dell'HPC ci sono algoritmi paralleli e strutture di dati. (R12)
Problema di scomposizione	Per i problemi relativi ai "Big Data", il divide et impera è la strategia più efficace. (R1)

	Molti problemi complessi possono essere risolti suddividendoli in problemi più semplici che possono essere risolti in modo indipendente. (R13)
Modelli di progettazione paralleli	Quando si scrive un software HPC, i modelli di progettazione paralleli possono evitare di dover "reinventare la ruota". (R1)
Innovazione tecnologica e progressi hardware/software	Le sfide nella progettazione di sistemi HPC risiedono nei vincoli fisici: es. 1: Il problema della progettazione di chip che siano allo stesso tempo potenti e compatti ad es. 2: Raggiungimento del minor consumo energetico possibile (R8)
Sofisticazione di algoritmi paralleli	Gli algoritmi paralleli sono molto più complessi e potenti dei corrispondenti algoritmi seriali. (R6)
Aumento delle prestazioni dell'HPC rispetto ai modelli tradizionali	Il calcolo distribuito può essere utilizzato per migliorare le prestazioni o aumentare l'affidabilità o entrambi. (R1) Il calcolo parallelo è l'equivalente computazionale del vecchio adagio "molte mani rendono il lavoro leggero". (R1)
Limitazioni e sfide del parallelismo (hardware e software)	Il sovraccarico di comunicazione può ridurre la velocità. (R11) L'HPC non è una panacea. L'adattamento di un problema a soluzioni basate su HPC comporta dei compromessi, che possono sorprendere i nuovi utenti HPC. Ad esempio, il tempo di soluzione può dipendere fortemente dalla strategia per rendere l'attività parallela e, per alcune attività, potrebbe non offrire alcun vantaggio. (R2)
Ambiente eterogeneo e combinazione di diversi modelli	Vari tipi di metodi HPC separati possono essere combinati in modo intelligente. Un esempio potrebbe essere multicore+GPU, o multicore+SIMD, o MPI+multicore+GPU. (R3)

HPC + AI	AI/ML è un'applicazione di HPC (R10) L'integrazione di HPC e machine learning consente simulazioni in tempo reale di sistemi complessi, utilizzando modelli surrogati per ridurre i costi computazionali senza compromettere l'accuratezza. (R7)
Scalabilità e sistemi distribuiti	In alcuni casi è possibile sostituire un processore potente ma costoso con un gran numero di processori meno potenti ma molto più convenienti. (R13)
Storage e data management	La disaggregazione dei dispositivi mette a dura prova la rete. Alte prestazioni, sicuro. Il trasferimento dei dati a bassa latenza è necessario per supportare carichi di lavoro sempre più distribuiti. (R4) Un file può essere diviso e i suoi frammenti archiviati su più server, pur mantenendo l'aspetto di un singolo file comune per l'utente. (R5)
Applicazioni pratiche dell'HPC	L'integrazione di HPC e machine learning consente simulazioni in tempo reale di sistemi complessi. (R7)
Implicazioni sociali dell'HPC	Esistono problemi computazionalmente complessi che richiedono molti calcoli. I personal computer non sono sufficienti per risolvere questi problemi. La società trae vantaggio dallo sforzo di superare i limiti per risolvere questi problemi nel modo più efficace possibile. La frontiera è l'HPC (R8)

I temi individuati possono essere raggruppati in cinque macro-temi come segue:

Cluster	Temi inclusi
Fondamenti del calcolo parallelo	• Parallelismo (algoritmi, strutture dati) • Problema di scomposizione • Modelli di progettazione paralleli • Sofisticazione di algoritmi paralleli • Limitazioni e sfide del parallelismo (hardware e software)
Infrastrutture tecnologiche e innovazione	• Innovazione tecnologica e progressi hardware/software • Ambiente eterogeneo e combinazione di diversi modelli • Scalabilità e sistemi distribuiti • Archiviazione e gestione dei dati
Sinergie con l'Intelligenza Artificiale	• HPC + AI
Applicazioni e impatto sociale	• Applicazioni pratiche dell'HPC • Implicazioni sociali dell'HPC
Performance e vantaggio strategico	• Aumento delle prestazioni dell'HPC rispetto ai modelli tradizionali

Bisogni educativi emersi

Per analizzare i bisogni educativi per formare esperti del mondo accademico e dell'industria, siamo partiti dai temi evidenziati per la classificazione delle Big Ideas. Quindi, sono stati aggiunti altri temi per raggiungere una descrizione completa delle risposte degli intervistati.

	Tema	Accademia	Industria
Da Big Ideas	Parallelismo (algoritmi, strutture dati)	✓	✓
Nuovo	Concorrenza	✓	×
Da Big Ideas	Problema di scomposizione	×	×
Nuovo	Scomposizione dei dati	✓	×
Da Big Ideas	Modelli di progettazione paralleli	✓	✓
Nuovo	Insegnamento su dataset del mondo reale	✓	×
Nuovo	Innovazione tecnologica e progressi hardware/software	×	✓
Da Big Ideas	Sofisticazione di algoritmi paralleli	×	×
Da Big Ideas	Aumento delle prestazioni dell'HPC rispetto ai modelli tradizionali	✓	✓
Da Big Ideas	Limitazioni e sfide del parallelismo (hardware e software)	✓	✓

Nuovo	GPU	✓	✓
Da Big Ideas	Ambiente eterogeneo e combinazione di diversi modelli	×	×
Da Big Ideas	HPC + AI	✓	✓
Da Big Ideas	Scalabilità e sistemi distribuiti	×	×
Da Big Ideas	Storage and data management	×	×
Da Big Ideas	Applicazioni pratiche dell'HPC	×	×
Da Big Ideas	Implicazioni sociali dell'HPC	✓	✓
Nuovo	Focus sulla ricerca educativa per insegnanti/formatori HPC	✓	×
Nuovo	Background informatico per major non informatici	✓	×
Nuovo	Verifica e riproducibilità dei risultati	✓	×
Nuovo	Open standards	×	✓
Nuovo	Trasferimento di conoscenze tra i dipendenti	×	✓
Nuovo	Accesso e utilizzo del supercomputer pubblico	×	✓

Gli esperti citano come temi fondamentali per la formazione **sia in ambito accademico che industriale:**

- Parallelismo (algoritmi, strutture dati)
- Modelli di progettazione paralleli
- Aumento delle prestazioni dell'HPC rispetto ai modelli tradizionali
- Limitazioni e sfide del parallelismo (hardware e software)
- GPU
- HPC + AI
- Implicazioni sociali dell'HPC

Altri temi riconosciuti importanti per la formazione **in ambito accademico** sono:

- Concorrenza
- Decomposizione dei dati
- Insegnamento su set di dati del mondo reale
- Focus sulla ricerca educativa per insegnanti/formatori HPC
- Background informatico per major non informatici
- Verifica e riproducibilità dei risultati

Altri temi che sono riconosciuti importanti per la formazione **nell'industria** sono:

- Innovazione tecnologica e progressi hardware/software
- Standard aperti
- Trasferimento di conoscenze tra i dipendenti
- Accesso e utilizzo del supercomputer pubblico

La tua visione è preziosa

Contribuisci
ed entra a far parte
della nostra ricerca