



# IBM Power Systems: un approccio migliore all'High Performance Computing



## Tre pilastri per il futuro dell'HPC

**L**e organizzazioni operanti in area HPC sono alle prese con un problema. Da un lato, la quantità di dati coinvolti in settori quali ricerca genomica, analisi sismica, simulazioni climatiche, analisi finanziarie e altri tipi di applicazioni impegnative continua a crescere - e molti dicono che l'era dell'elaborazione in esacala non è lontana.

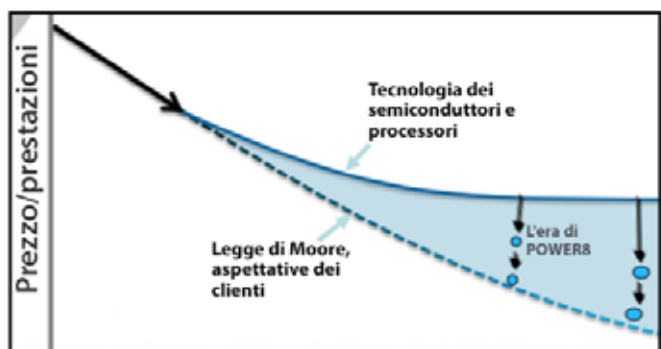
Dall'altro, l'aumento delle prestazioni dei microprocessori sulla base della fisica e del design dei dispositivi è rallentato, e ci si chiede se le fondamentali previsioni prezzo/prestazioni della Legge di Moore possano continuare a essere vere. In altre parole, la quantità di dati utili cresce più velocemente della capacità di elaborare tali dati. Gli esperti in HPC hanno risposto a questo dilemma dell'HPC con un approccio triplice.

In primo luogo, hanno ampliato l'attenzione espandendola oltre i microprocessori come fonte primaria di miglioramenti delle prestazioni. La comunità ora si avvale di un approccio al problema a livello di sistema, che tiene conto del fatto che gli acceleratori hanno cambiato radicalmente l'HPC. L'approccio al clustering a livello di sistema non solo comporta l'ottimizzazione delle prestazioni dei vari elementi del sistema con componenti all'avanguardia a tutti i livelli dello stack, ma anche il miglioramento della larghezza di banda e della latenza laddove tali componenti si interconnettono. IBM®, che collabora con più partner dell'ecosistema, è unica nella sua capacità di fornire uno stack completo che accelera l'HPC permettendo il raggiungimento di nuovi livelli.

In secondo luogo, è stato accolto il concetto di elaborazione data-centric. In termini pratici, questo significa ridurre al minimo lo spostamento dei dati e porre la potenza di elaborazione più vicina ai dati, quando possibile. Il risultato è una gestione più rapida dei carichi di lavoro, che a sua volta porta a un migliore sostegno per il raggiungimento di obiettivi scientifici e/o commerciali.

Infine, per garantire ecosistemi eccellenti, gli esperti HPC hanno creato ecosistemi aperti. Gli ecosistemi aperti sono fonti più solide di sviluppo della tecnologia, basati sui punti di forza di tutti coloro che hanno contribuito. Le idee combinate di molti sono maggiori di quelle di uno solo.

Nel 2013 IBM, NVIDIA, Mellanox e altri hanno creato la OpenPOWER Foundation, un gruppo tecnico aperto senza scopo di lucro, formato da più soci che è già diventato un'importante fonte di innovazione HPC. Ricercatori e data scientist che scelgono IBM Power Systems come alternativa alle soluzioni basate su x86 possono essere certi della disponibilità di un ecosistema ricco e in crescita, in grado di soddisfare le loro esigenze e portare l'innovazione al limite massimo.



## Approccio all'HPC a livello di sistema

Uno degli obiettivi della comunità HPC è di continuare a migliorare le prestazioni del cluster in linea con le aspettative di lungo periodo sulla base della legge di Moore.

Tradizionalmente, i processori sono stati al passo con la legge di Moore attraverso miglioramenti nel numero di operazioni mobili al secondo (FLOPS). I FLOPS aggregati installati sono aumentati notevolmente dal monitoraggio iniziato nel 1993, da meno di 60 gigaflop a quasi 300 petaflop.<sup>i</sup> Tuttavia, questa curva di crescita si è, infine, scontrata con i limiti della fisica. Le caratteristiche dei processori più veloci presentano ora una larghezza di soli 70 atomi,<sup>ii</sup> cosa che lascia poco spazio a miglioramenti. La chiave per ulteriori progressi sta in una nuova visione di cluster HPC, non come un insieme di server, ma come un portafoglio integrato di prodotti basati su un ecosistema efficiente.

## Progettato per l'accelerazione

IBM sta adottato questo approccio ecosistemico all'HPC. I suoi potenti processori IBM POWER8™ si prestano a pieno titolo ai "big data". Sono dotati di 10 core ciascuno (con scalabilità a 160.000 core), funzionano a una velocità di 2,9 - 3,3 GHz e possiedono fino a un terabyte di memoria con 230 GB di larghezza di banda di seconda memoria. I server basati su queste CPU sono in grado di offrire fino a 192 core e 16 terabyte di memoria.

Il processore POWER8 offre vantaggi significativi, tra cui la possibilità di eseguire query simultanee, una maggiore velocità rispetto ai processori x86, la capacità di gestire 1 TB di memoria in un sistema dual-socket, maggiore larghezza di banda della memoria e più cache on-chip rispetto ai processori x86. Ma ancora più importante di queste funzionalità è il fatto che le CPU di IBM POWER8 sono state progettate fin dall'inizio per sfruttare il vantaggio degli acceleratori.

### Tipi di acceleratori

L'esempio più comune di un acceleratore per calcolo è la linea NVIDIA Tesla di unità di elaborazione grafica (GPU). Questi acceleratori aumentano le prestazioni dell'intero sistema scaricando porzioni di calcolo intensivo di un'applicazione alla GPU, mentre ogni restante parte del codice viene eseguita comunque sulla CPU. Sono stati realizzati notevoli miglioramenti delle prestazioni.

Un altro approccio all'aumento delle prestazioni è attraverso l'uso di array FPGA (Field-Programmable Gate Array) invece della CPU per calcoli complessi legati a un particolare campo di studio. Gli FPGA sono specificamente progettati per eseguire un particolare algoritmo, e poiché sono creati appositamente a farlo nell'hardware, sono sostanzialmente più veloci di una CPU generica.

### Interfacce per acceleratore differenziate

La velocità con cui gli acceleratori possono calcolare è ovviamente fondamentale, ma altrettanto importante è la velocità con cui possono comunicare con la CPU. I sistemi IBM POWER8 offrono due opzioni innovative per risolvere questo problema.

### CAPI

La prima, CAPI, è l'acronimo di Coherent Accelerator Processor Interface. Essa fornisce agli utenti POWER8 una soluzione ad alte prestazioni per l'implementazione di algoritmi ad alta densità di elaborazione specifici del cliente su un array FPGA. Questa innovazione può sostituire i programmi applicativi in esecuzione su implementazioni di accelerazione core o personalizzata collegate tramite I/O.

CAPi elimina l'overhead e la complessità del sottosistema I/O, quindi un acceleratore può funzionare nell'ambito di un'applicazione. Ad esempio, una soluzione FPGA definita dal cliente può essere alla pari con i core POWER8 dal punto di vista di accesso alla memoria (coerente). Ciò consente un migliore funzionamento del sistema con un investimento di programmazione molto inferiore, permettendo il successo dell'elaborazione su una gamma molto più ampia di applicazioni.

Inoltre, poiché gli array FPGA possono essere riconfigurati, l'hardware può essere potenzialmente specializzato senza i costi tradizionalmente associati alla fabbricazione dell'hardware.

### NVLink

Un'opzione emergente e fortemente richiesta, NVLink di NVIDIA, è una tecnologia che aumenta la larghezza di banda totale tra le GPU e da GPU a CPU e altre parti del sistema.

Oggi, le GPU sono tipicamente collegate tra loro, alle CPU e a molti altri dispositivi tramite corsie PCI-E. Queste sono adeguate per alcuni carichi di lavoro, ma possono causare gravi ingorghi nelle applicazioni che fanno un uso intenso dei dati. Gestire la complessità dello spostamento dei dati dal sistema alla memoria della GPU per evitare di saturare l'interfaccia PCI-E ha impedito a molti di massimizzare i benefici dell'elaborazione accelerata.

NVLink attenua questo problema, consentendo il trasferimento dei dati a velocità da 5 a 12 volte superiori rispetto a PCI-E. POWER8 sarà il primo processore che collegherà le GPU alla CPU tramite NVLink. Insieme alle nuove caratteristiche di coerenza della memoria negli acceleratori con FPU NVIDIA Tesla P100 (Page Migration Engine), porterà una nuova ondata di applicazioni di calcolo accelerate.

## Elaborazione data-centric

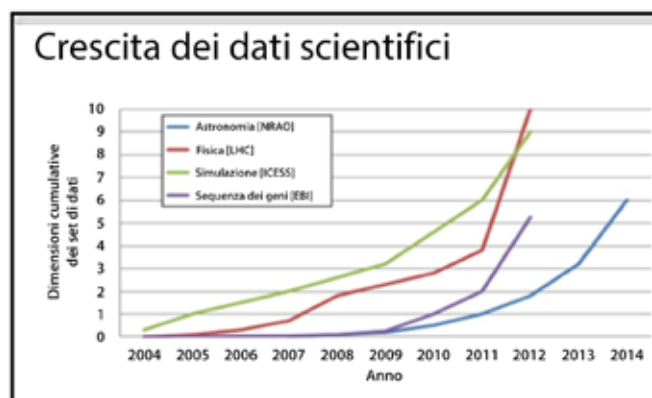
IBM Research, riconoscendo un cambiamento fondamentale nel settore informatico, ha identificato e coniato il concetto di elaborazione "data-centric" per un

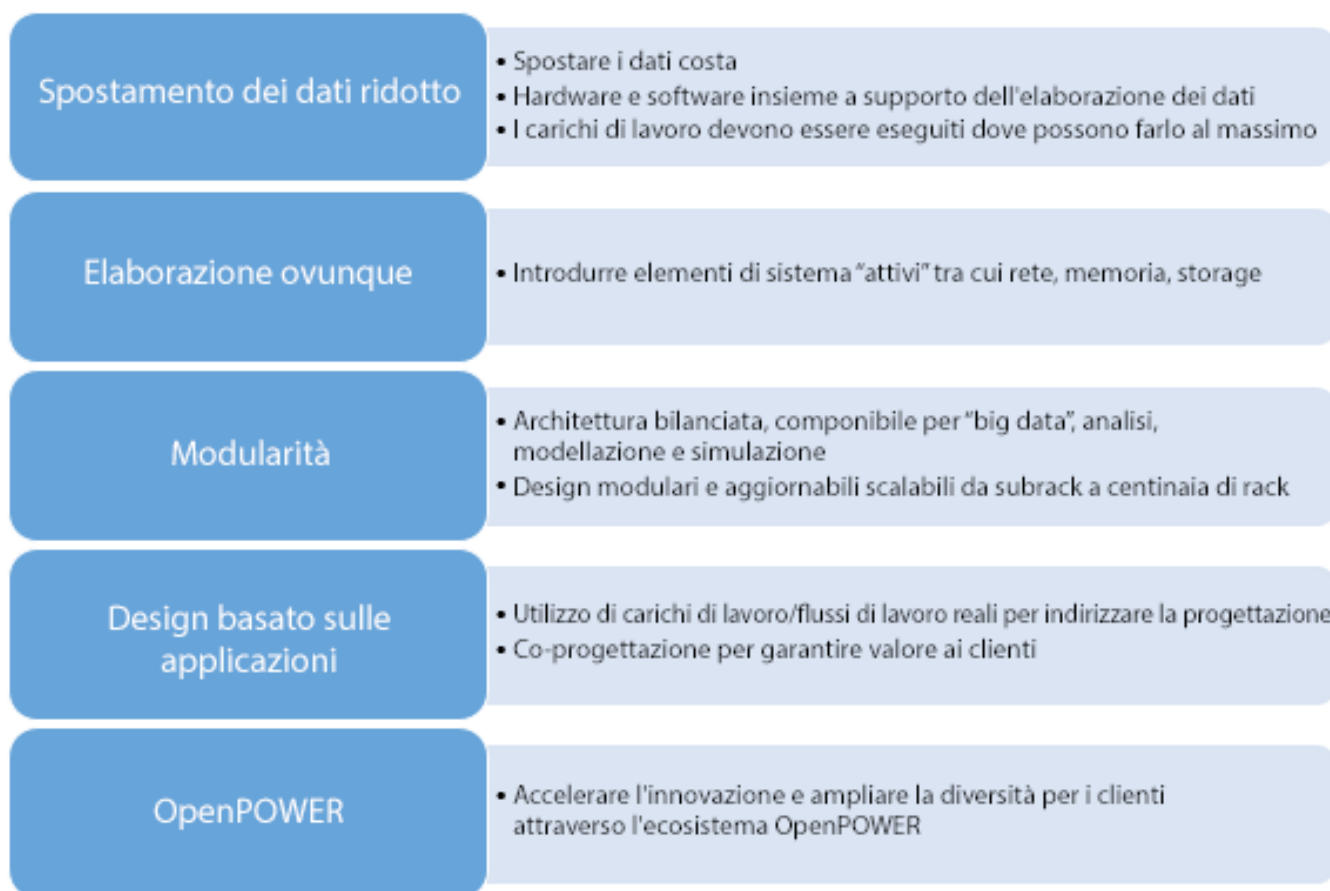
semplice motivo. La quantità di dati disponibili per l'analisi in quasi tutte le aree di indagine è in rapida crescita, con oltre 2,5 esabyte di dati creati ogni giorno. Le applicazioni HPC tradizionali non solo fanno un uso sempre più intenso di dati, ma utilizzano una quantità sempre maggiore di dati non strutturati per acquisire conoscenze approfondite. Come indicato dal grafico, la scienza è chiaramente in testa a questa tendenza di crescita.<sup>iii</sup>

Mano a mano che vengono utilizzati strumenti scientifici più ampi e complessi, come il CERN Large Electron Positron (LEP) Collider, la necessità di analizzare quantità ancora maggiori di dati è una certezza virtuale. Reti di sensori associate a reti elettriche intelligenti, autostrade intelligenti e simili genereranno petabyte di dati in tempi sempre più brevi, addirittura in un solo giorno.

Oltre alla enorme quantità di dati, ci sono altri fattori che determinano la necessità dell'elaborazione data-centric.

- Un numero sempre maggiore di discipline accademiche/scientifiche si stanno trasformando in scienze basate sui dati. La biologia è forse l'esempio più visibile, ma rientrano in questa tendenza anche altre discipline al di là delle scienze tradizionali, come l'archeologia e la linguistica.
- Si stanno diffondendo metodi iterativi di risoluzione dei problemi come la modellazione stocastica (servizi finanziari) o la modellazione parametrica (produzione) che generano grandi volumi di dati.
- Nuovi metodi analitici e di strumenti come MapReduce/Hadoop, analisi dei grafici e algoritmi di acquisizione di conoscenza tramite l'analisi semantica rendono più realistica l'estrazione di informazioni da enormi quantità di dati.<sup>iv</sup>





## Tecnologia HPC data-centric

L'HPC data-centric in IBM si basa su cinque principi, indicati sopra.

L'aumento delle quantità di dati influisce sia sulla velocità che sul costo dell'HPC. Lo spostamento dei dati tra le gerarchie di memoria, dallo storage alla memoria di classe storage alla memoria principale ai livelli di cache alla CPU dove i dati vengono in realtà elaborati, richiede una notevole quantità di tempo. Inoltre, è costoso. Secondo uno studio, tra il 28 e il 40% del consumo totale di energia nell'elaborazione ad alte prestazioni è impiegato dallo spostamento dei dati.<sup>v</sup>

Un approccio data-centric elimina questa perdita di tempo e di energia in quanto i carichi di lavoro vengono eseguiti, quando possibile, dove risiedono i dati. Ciò significa introdurre elementi di sistema attivi a tutti i livelli della gerarchia di memoria del sistema e l'esecuzione

di operazioni di database quali il filtraggio di query a livello di storage, e di operazioni di file system come ad esempio la trasformazione dei dati a livello di memoria di classe storage.

Il design dei processori POWER8 di IBM tiene conto dell'importanza della memoria, con una cache di livello 3 (L3) on-die di 96 MB. Al contrario, la cache più grande di ultimo livello dei processori x86 concorrenti è di appena 30 MB. Inoltre, la larghezza di banda della memoria di IBM POWER8 è di 230 GB, più del triplo di quella dei processori x86 comparabili.<sup>vi</sup>

Quando i dati devono essere spostati, i sistemi IBM li spostano con tecnologia che aumenta la velocità e nel contempo riduce i costi. Un esempio è Data Engine for NoSQL, una piattaforma integrata per archivi di dati NoSQL di grandi dimensioni e in rapida crescita con tecnologie di entità associate alla OpenPOWER Foundation quali Redis Labs, Canonical e IBM. Molti

casi d'uso riguardano applicazioni che necessitano di accesso rapido a un flusso costante di brevi sessioni di lettura e scrittura per milioni di record che non rientrano in strutture di dati SQL tradizionali. Gli sviluppatori di applicazioni stanno adottando strutture NoSQL come alternativa, ma poiché le dimensioni di questi archivi di dati aumentano, il grande numero di sistemi x86 necessari per supportarli potrebbe essere eccessivamente costoso e complesso.

Data Engine for NoSQL è un'alternativa intelligente. Si avvale della tecnologia FPGA collegata a CAPI, a cui si è accennato in precedenza, per assicurare l'accesso ad alta velocità allo storage flash sia a costi significativamente inferiori che a una maggiore densità di carichi di lavoro rispetto a un normale sistema basato su RAM. Infatti, con la soluzione IBM, le organizzazioni possono sostituire un cluster da 24 U con una distribuzione 4 U, ottenendo una riduzione del 300% del costo totale e un miglioramento del consolidamento di 10:1.

Un altro esempio di spostamento ottimizzato dei dati è l'uso della tecnologia InfiniBand di Mellanox. La tecnologia InfiniBand lega la memoria e i processori di più server in modo così stretto che le comunicazioni tra di essi imitano quelle di un singolo server. Lo fa unendo i quattro strati inferiori dello stack di rete OSI (Open Systems Interconnection) — il collegamento fisico dei dati, la rete e i livelli di trasporto — in un'unica architettura.

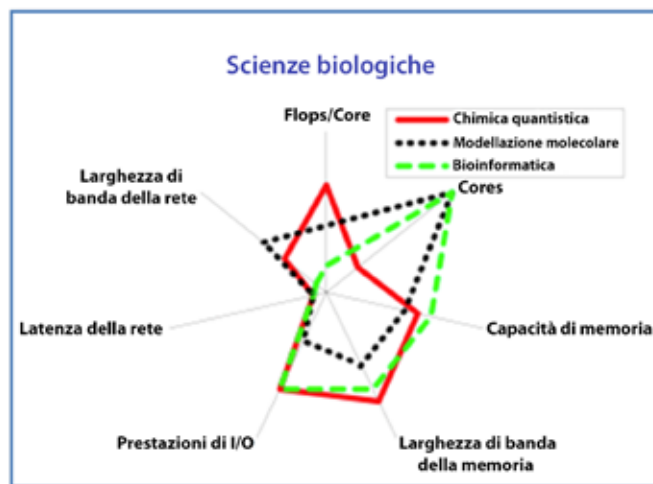
L'attributo dell'esclusiva tecnologia Mellanox InfiniBand è Remote Direct Memory Access (RDMA), che consente alla scheda di rete di scrivere e leggere i dati nello spazio di memoria di un server, eliminando la necessità che il processore del server se ne occupi personalmente. Inoltre, la latenza intrinsecamente bassa di Infiniband garantisce un percorso veloce tra questi sistemi. La sua massiccia larghezza di banda assicura trasferimenti agevoli.

Per clienti HPC di fascia alta con esigenze di storage nell'ordine di decine di milioni, centinaia di milioni o anche miliardi di file, IBM offre anche il suo sistema HPSS (High Performance Storage System), un sistema HSM (Hierarchical Storage Management) altamente scalabile. L'HPSS è in grado di accedere contemporaneamente a

centinaia di nastri per velocità di trasferimento di dati aggregati estremamente elevate, e può facilmente soddisfare esigenze di larghezza di banda e capacità di storage totale altrimenti irraggiungibili. HPSS può eseguire lo stripe dei file su più nastri, il che assicura trasferimento di dati di file di grandi dimensioni a elevata larghezza di banda. HPSS consente la gestione e l'accesso a molti petabyte di dati memorizzati su librerie a nastro automatizzate.

## Il modo migliore per confrontare

Tutte le caratteristiche descritte fino a questo punto sono importanti quando le organizzazioni si trovano ad affrontare la sfida di scegliere la migliore soluzione HPC per una particolare nuova iniziativa, ma non tutte sono ugualmente importanti per ogni caso d'uso. Ci sono variazioni non solo da un segmento di mercato a un altro, ma anche all'interno dei segmenti di mercato.



Ad esempio, come mostra il grafico, i FLOPS per core sono molto più importanti nella chimica quantistica di quanto non lo siano nella bioinformatica, mentre il numero di core ha all'incirca la stessa importanza per entrambe. Per la modellazione molecolare, la larghezza di banda della rete è molto più importante di quanto lo sia per la bioinformatica. Variazioni simili esistono

nell'ingegneria computerizzata, nei servizi finanziari, nell'energia e nelle scienze ambientali; la tecnologia HPC viene utilizzata più o meno ovunque.

Valutare sistemi HPC e prendere decisioni di acquisto esclusivamente su singole specifiche hardware, benchmark molto semplicistici (latenza ping-pong) o anche benchmark cluster di fascia bassa come HPL (High Performance LINPACK) è un approccio inadeguato, perché questi benchmark non sono pienamente indicativi dell'ampia varietà di flussi di lavoro HPC in diversi settori e applicazioni. L'unico modo per valutare in modo accurato le prestazioni dei sistemi HPC è di valutare l'intero sistema, utilizzando carichi di lavoro reali.

Un esempio di questo approccio, preso dalla finanza, è il set di benchmark STAC-A2. Sviluppato dalla comunità di utenti, esso rappresenta una classe di carichi di lavoro di analisi dei rischi finanziari caratterizzata dalla simulazione Monte Carlo e dai calcoli "greci".

Rispetto ad altri risultati di warm run sui benchmark greci (STAC-A2. 2.GREEKS.TIME.WARM) diffusi pubblicamente, un server POWER8 a due socket, dotato

di due schede di processore POWER8 a 3,52 GHz e 12-core, ha ottenuto i seguenti risultati:<sup>vii</sup>

- 2,3 volte migliori prestazioni rispetto alla configurazione x86 paragonabile
- 1,7 volte prestazioni superiori rispetto alla migliore soluzione x86

Il server POWER8 stabilisce anche nuovi record per la scalabilità dei percorsi. Rispetto alla migliore soluzione a quattro socket basata su x86, al momento del test il server POWER8 ha registrato:

- 2,1 volte il throughput
- aumento del 16% in termini di capacità delle risorse

I sistemi IBM POWER8 hanno dimostrato vantaggisimili in termini di prestazioni in molti altri test di casi specifici.

In sintesi, a livello di sistema, l'approccio data-centric di IBM ad HPC sta mantenendo la promessa di rivoluzionare le operazioni e le economie HPC.



## Oltre l'hardware: gestione facilitata e un ecosistema collaudato

L' HPC non esiste per caso. Per garantire valore, i sistemi HPC non devono essere solo ben progettati per le prestazioni in sé e per sé. Devono anche essere disponibili in un ambiente confortevole, facile da gestire da parte di ricercatori e ingegneri che li usano su base quotidiana, fornendo “più scienza e meno scienza dei dati”, supportando al tempo stesso prestazioni elevatissime e massima efficienza. Inoltre, per garantire la sostenibilità in corso, oltre all'aumento di innovazione e prestazioni nel corso del tempo, i sistemi HPC devono essere sistemi aperti, in modo che possano partecipare e beneficiare dell'innovazione che ha luogo in un ecosistema esterno, di dimensioni maggiori centrato su HPC. Questo articolo tratta entrambe queste importanti questioni.

### Gestione semplificata in grado di garantire produttività, efficienza e risultati

Gli utenti di sistemi HPC in ambienti del settore pubblico e privato di ogni dimensione sono sotto pressione per massimizzare l'uso di risorse limitate. I budget sono risicati, e la maggiore quantità di dati oggi disponibili mette in crisi i sistemi come mai prima d'ora. Inoltre, vi è spesso concorrenza tra vari gruppi di risorse. A causa di tutti questi fattori, l'utilizzo efficiente e conveniente dei sistemi HPC è diventato una priorità assoluta.

Ma nello stesso tempo, i gruppi di ricerca vogliono concentrare i loro sforzi sulla ricerca, non sulle complessità della condivisione dei cluster, della programmazione dei processi e altre attività che consentono di ottimizzare il rapporto qualità-prezzo. Purtroppo, gli utenti informatici tecnici senza supporto IT spesso devono diventare esperti in informatica



per amministrare i carichi di lavoro sui loro cluster. Di conseguenza, questi esperti del settore dedicano tempo e fatica alla gestione delle infrastrutture; e ogni ora persa nell'amministrazione significa un'ora in meno dedicata a produrre risultati.

### Gestione HPC con IBM® Platform Computing™

IBM Platform Computing risolve questo dilemma con un set completo di capacità tecniche, che combina gestione dei cluster e la gestione dei carichi di lavoro in un unico prodotto per fornire tre vantaggi centrali:

- Maggiore produttività da parte degli utenti
- Massima efficienza operativa
- Utilizzo ottimale delle risorse

Altre soluzioni cluster HPC spesso combinano più strumenti con più interfacce che non sono state certificate e testate insieme. IBM Platform Computing, invece, fornisce un insieme unificato di funzionalità di gestione — certificato per i sistemi POWER8 — che vengono installate tutte in una sola volta. Un ricco set di funzionalità out-of-the-box consente a responsabili e utenti HPC di ridurre la complessità di amministrazione dei rispettivi ambienti, con cluster condivisi che arrivano a contenere fino a 160.000 core. Le funzionalità specifiche includono:

- Distribuzione di sistema operativo, strumenti e applicazioni
- Manutenzione di patch, aggiornamenti, upgrade e monitoraggio delle condizioni generali dei cluster
- Invio, gestione e monitoraggio dei processi
- Pianificazione meticolosa dei carichi di lavoro per un utilizzo equo da parte di più utenti e risoluzione dei conflitti tra le applicazioni
- Condivisione dei cluster (dando agli amministratori locali il controllo delle proprie risorse e permettendo nel contempo ai cluster remoti di sfruttare la capacità inutilizzata)
- Isolamento dei problemi e risoluzione dei guasti

IBM Platform Computing fornisce tutte le funzionalità necessarie per gestire un ambiente HPC in modo efficiente ed efficace.

L'amministrazione avviene tramite una semplice interfaccia basata sul Web che per l'invio dei processi si avvale di modelli e script che spesso possono eliminare operazioni manuali associate a queste operazioni lunghe e soggette a errori. IBM Platform LSF consente anche la programmazione basata su criteri che privilegia i processi in base a classifiche concordate in precedenza. Nell'insieme, queste caratteristiche di facilità d'uso riducono i tempi di formazione per i nuovi utenti e migliorano la produttività per tutti.

Questo è solo un esempio dell'impegno di IBM per l'elaborazione data-centric, con un approccio all'HPC a livello di sistema. In particolare, si riconosce e si

ammette che l'efficienza di elaborazione in sé e per sé non è sufficiente se il flusso di lavoro è bloccato in attesa dei dati. Per risolvere questo problema, è disponibile IBM Platform Data Manager. Esso supporta una varietà di meccanismi di trasporto in grado di automatizzare il trasferimento di dati in una cache intelligente che porta i dati usati spesso più vicino alle risorse di elaborazione, bypassando così i blocchi di storage.

IBM Platform HPC migliora decisamente il funzionamento generale del sistema. In una installazione accademica,<sup>viii</sup> presso la University of East Anglia di Norwich, Inghilterra, un gruppo di ricerca è riuscito a:

- Aumentare la potenza di calcolo da 9 a 21,5 teraflop
- Aumentare la quantità di cluster da 900 a > 2000 core
- Aumentare la velocità di funzionamento dell'hardware di sistema dal 20 al 40%
- Ridurre sostanzialmente i tassi di consumo di energia e i costi

## Opzioni di codifica per ricercatori che si avvalgono dell'elaborazione accelerata

Un altro settore di grande importanza per gli ambienti HPC è la codifica, che include la creazione, l'ottimizzazione, il riutilizzo e il porting. In molti casi, gli scienziati e i ricercatori che vogliono sfruttare le capacità di accelerazione degli odierni sistemi HPC tramite GPU deve provvedere alla propria codifica, perché il loro progetto non dispone di risorse o perché le loro richieste sono semplicemente troppo complesse da passare a un codificatore dedicato. In entrambi i casi, questa attività sottrae tempo alla ricerca vera e propria, e l'ecosistema HPC di IBM offre una serie di opzioni per ridurre al minimo il problema.

OpenACC è un modello di programmazione di alto livello basato su direttive che offre un approccio semplice ma potente agli acceleratori senza grandi difficoltà di programmazione. Con OpenACC, il codice esistente rimane sostanzialmente intatto e l'aggiunta di semplici pragma offre prestazioni più veloci quando nel sistema è disponibile un acceleratore. Una singola versione del codice sorgente garantirà prestazioni migliori trasferibili su più piattaforme.

OpenMP, un altro modello di programmazione parallela basato su direttive e uno dei nostri framework di elaborazione parallela più utilizzati, è in rapida evoluzione per supportare la prominenza degli acceleratori in implementazioni HPC. IBM e altri membri dell'ecosistema OpenPOWER Foundation sono partecipanti attivi dell'evoluzione dello standard OpenMP presente da lunga data.

È disponibile anche CUDA, un approccio esplicito di basso livello alla programmazione parallela per le GPU. Creato per aiutare gli sviluppatori a sfruttare la potenza delle GPU per applicazioni non grafiche, CUDA fornisce un maggiore controllo sui dettagli di come viene gestita l'elaborazione parallela sugli acceleratori GPU.

Infine, NVIDIA sta sviluppando una versione migliorata dei suoi compilatori PGI® ampiamente utilizzati che consentono una migrazione facile e indolore del software esistente ai sistemi POWER8. Essi consentono agli sviluppatori di soluzioni HPC di ricompilare ed eseguire le proprie applicazioni su tutte le principali piattaforme HPC con prestazioni uniformemente elevate utilizzando una base di codice sorgente comune. Ciò significa che le applicazioni x86 accelerate da GPU create con i compilatori PGI consentiranno la migrazione ai sistemi POWER8 accelerati da GPU con una semplice ricompilazione.

I compilatori di ottimizzazione delle PGI per Fortran, C, C++ hanno tutti la stessa interfaccia utente, caratteristiche di linguaggio, funzionalità di programmazione parallela e capacità di ottimizzazione

dei compilatori PGI Linux x86, in modo che la curva di apprendimento sia praticamente pari a zero. Le caratteristiche di questi compilatori sono particolarmente significative perché il porting e l'ottimizzazione delle applicazioni HPC da una piattaforma all'altra possono essere tra i costi più significativi associati all'adozione di nuove tecnologie hardware.

## Un ecosistema HPC senza peer

Ogni organizzazione si rende conto che quando fa un investimento significativo nel settore IT non sta solo acquistando dei prodotti. Sta anche entrando in un ecosistema che comprende tecnologie complementari a cui sono collegate diverse aziende che producono tali tecnologie: fornitori di software indipendenti (ISV), consulenti, una comunità di utenti e anche un pool di talenti di potenziali dipendenti.

L'importanza di questi ecosistemi nell'HPC non è mai esagerata. Il fatto stesso che un gran numero di persone e aziende si impegnano nei confronti di una particolare tecnologia è di per sé un buon fattore predittivo della redditività a lungo termine, che è ovviamente importante per qualsiasi acquirente di tale tecnologia. Anche gli ecosistemi forniscono agli utenti finali il supporto necessario a prendere decisioni di acquisto intelligenti, massimizzando il valore della tecnologia per le loro particolari esigenze, e, naturalmente, a risolvere i problemi quando si presentano.

Ancora più importante è il ruolo che un ecosistema svolge in termini di innovazione, che è fondamentale se un ecosistema deve svilupparsi nel tempo. La linea di fondo è che, mentre i membri di un dato ecosistema in genere ottengono benefici commerciali, i veri vincitori sono gli utenti finali, che beneficiano sia dell'innovazione sia della concorrenza sui prezzi, che sono caratteristiche di ecosistemi sani.

IBM ha posto la base del fiorente ecosistema che supporta POWER8 quando ha lanciato la OpenPOWER Foundation nel 2013 con altri quattro soci co-fondatori, ognuno dei quali ha dato importanti contributi iniziali al sistema POWER8 nel suo complesso. Da una prospettiva di alto livello, anche i soci fondatori riflettono la diversità di questo approccio all'elaborazione:

- IBM ha fornito la sua nuova tecnologia costituita da processori data-centric, compresa l'interfaccia CAPI ad altissima velocità per GPU, FPGA e memoria flash, così come le piattaforme di sistema.
- NVIDIA ha contribuito con i coprocessori grafici (GPU) in grado di accelerare notevolmente gli algoritmi caratteristici dei casi d'uso HPC.
- Mellanox ha fornito adattatori e switch InfiniBand per velocizzare la comunicazione da sistema a sistema e il trasporto dei dati.
- Tyan ha fornito le piattaforme e il firmware del sistema.
- Google ha contribuito con software e approfondimenti importanti nelle proprie specifiche esigenze di elaborazione, tra cui il desiderio di diverse architetture di processori a prestazioni più elevate.

La versione OpenPOWER va oltre lo sviluppo di un singolo prodotto o linea di prodotti. IBM condivide e concede in licenza la propria tecnologia di processori in una modalità simile all'approccio adottato da ARM. Numerosi chip di architettura Power sono pronti o in fase di sviluppo.

Inoltre, i membri della OpenPOWER Foundation spesso creano il proprio hardware. Una prominente società di cloud gestito, Rackspace, sta già creando e condividendo un progetto di server che si basa sulla tecnologia dei processori POWER8. Anche Servery, Inspur, ChuangHe e Wistron sono membri della OpenPOWER Foundation impegnati a progettare server basati sui chip POWER8.<sup>ix</sup>



L'appartenenza alla OpenPOWER Foundation comprende:

- Accesso alle specifiche OpenPOWER durante la fase di sviluppo e prima del rilascio finale in versione bozza
- Integrazioni di elementi OpenPOWER in soluzioni indipendenti con la licenza appropriata
- Idoneità a condurre e contribuire a progetti OpenPOWER
- Partecipazione a iniziative ed eventi riservati solo ai soci, compresi seminari di certificazione
- Attribuzione della OpenPOWER Foundation

Il potenziale di mercato delle tecnologie dei fondatori, in combinazione con la visione aperta per il futuro, si è dimostrato interessante per un gran numero di responsabili tecnologici. Al momento della stesura di questo documento, OpenPOWER comprende più di 200 membri a tutti i livelli del suo stack. Questi livelli comprendono chip e SOC; schede e sistemi; acceleratori, I/O e memoria; sistemi e software; e implementazione/HPC/ricerca.

## Una fiorente comunità ISV

Gli ISV storicamente hanno accolto rapidamente l'apertura, e OpenPOWER non fa eccezione. Offre affidabilità e riduce i rischi grazie a una piattaforma aperta testata, collaudata, prevedibile e sicura. Gli ISV sono stati tra i primi a cominciare a sfruttare gli elementi di sviluppo di OpenPOWER, che includono

specifiche tecniche essenziali e centinaia di migliaia di righe di codice firmware disponibili gratuitamente.

In linea con la filosofia di non-proprietà di OpenPOWER, i server POWER8 destinati all'HPC sono server Linux. I processori supportano storage e accesso alla memoria Little Endian nativa, al pari dei server x86. Questo è estremamente importante, perché significa che le applicazioni che vengono trasferite da sistemi x86 a POWER8 possono semplicemente essere ricomilate, senza la necessità di una notevole ri-codifica, un grande vantaggio per gli ISV.

Di conseguenza, gli ISV stanno portando avanti nuove interessanti applicazioni progettate non solo per IBM Power Systems che eseguono Linux, ma compatibili anche con tutte le soluzioni o i sistemi futuri non IBM ma basati su OpenPOWER che potrebbero arrivare sul mercato. Fino ad oggi, l'elenco delle applicazioni ISV per l'ecosistema OpenPOWER

include oltre 2.000 applicazioni, con centinaia di applicazioni HPC sviluppate e implementate con successo.

### Un ecosistema per oggi e domani

In poche parole, le prestazioni e le capacità di elaborazione grezza di POWER8 e di altri sistemi con architettura Power sono state enormemente migliorate da un solido ecosistema. Per le persone che li utilizzano, è stato fatto tutto il possibile per ridurre al minimo i problemi operativi e i tempi di sviluppo del codice, massimizzando nel contempo il throughput dei processi. Inoltre, esiste una grande comunità di fornitori disponibili per garantire supporto a breve termine e innovazione a lungo termine.

Per questo motivo, questi sistemi rappresentano un'opportunità immediata per migliorare le prestazioni e raggiungere più rapidamente gli obiettivi di ricerca, in combinazione con un futuro estremamente luminoso.

# HPC per valore scientifico e commerciale: lo stato attuale e la crescita futura dell'HPC

**N**essuno deve istruire gli scienziati sul valore dell'HPC. Tuttavia il suo valore come arma competitiva nel mondo dell'imprenditoria sta emergendo solo ora. Ad esempio, i dati transazionali esistono da lungo tempo in silos. Ora sta emergendo la loro utilità per altre aree dell'impresa, in particolare in settori come analisi predittiva e riconoscimento di modelli. Questo è solo un esempio di come l'HPC possa supportare gli obiettivi di business al di là della scienza pura o dell'R&D.

Allo stato attuale, HPC è in primo luogo di competenza di specifici settori. Nel corso del tempo, e più velocemente di quanto molti pensano, dimostrerà il proprio valore in una gamma molto più ampia di applicazioni. Questo articolo ripercorre quel cammino dai casi di utilizzo altamente specializzati di oggi alle applicazioni più ampie di domani.

Qui sono riportati alcuni casi di utilizzo tipici in cui i "big data" stanno dando attualmente contributi essenziali al raggiungimento di obiettivi scientifici e commerciali.

## Scienze biologiche

Nelle scienze biologiche, la ricerca genomica sta attirando una quantità enorme di interesse (e finanziamenti) perché promette cure per malattie incurabili e consente un livello di personalizzazione basato sul genoma per terapie che non sono al momento possibili. Anche la ricerca genomica genera enormi quantità di dati. Infatti, comprendere come i geni influenzano la malattia potrebbe richiedere l'acquisizione di dati da milioni di persone.

Negli ultimi 10 anni, la quantità di dati associati alla ricerca genomica è raddoppiata ogni sette mesi, e questi dati sono in formati eterogenei. Entro il 2025, si stima che potrebbero essere stati sequenziati centinaia



di milioni di genomi, creando una quantità di dati compresa tra 2 e 40 esabyte.<sup>x</sup>

Il volume e la varietà dei dati genomici non è l'unica sfida. Identificare le varianti genomiche in ogni singolo genoma, un'attività di ricerca essenziale sia per la popolazione che per la genomica medica, prevede fasi che sono molto complesse sotto il profilo dell'elaborazione. In termini tecnici, la variante che richiede 2 miliardi di genomi all'anno, con 100.000 CPU in parallelo, necessiterebbe di metodi che elaborano 2 genomi per ciascuna ora di CPU.

Parlando più in generale, si stima che il 25 per cento dei biologi abbia già richiesto l'HPC nel 2015.<sup>xi</sup>

## Petrolio e gas

Secondo i dati di Halliburton, oltre il 70% della produzione attuale di petrolio e di gas in tutto il mondo proviene da giacimenti maturi, nella fase di produzione

meno redditizia.<sup>xii</sup> L'aumento dei cosiddetti "giacimenti intelligenti" e "giacimenti petroliferi digitali" riflette questo fatto. L'HPC viene utilizzato per monitorare e gestire aspetti quali proporzione acqua/olio, emissioni di metano, attività micro-sismica associata alla perforazione e molti altri parametri tecnici.

Prendere le decisioni giuste per consentire la massima estrazione con la massima efficienza da questi giacimenti, oltre all'esplorazione efficiente di quelli nuovi potenziali, è fondamentale per il successo economico.

Queste decisioni a loro volta dipendono da due fattori:

**Dati:** Tecniche avanzate come l'imaging 3-D e le indagini WAZ (Wide-Azimuth) necessarie per prendere decisioni sagge possono richiedere centinaia di petabyte di dati grezzi.

**Elaborazione:** Per analizzare questi dati, le società che si occupano di petrolio e gas si rivolgono sempre più a nuovi algoritmi proprietari che richiedono molta più potenza di elaborazione rispetto a quelli utilizzati in passato.

La linea di fondo è che l'HPC è assolutamente fondamentale per il successo del settore.

## Ingegneria meccanica

L'ingegneria che si occupa di turbine a gas e motori a reazione è fortemente dipendente dalla fluidodinamica computazionale (CFD) per svolgere attività che vanno dall'aumento dell'output di potenza e il risparmio di carburante delle turbine, alla riduzione del rumore e degli effetti sull'ambiente. La CFD è un fattore critico per la progettazione, la produzione e il supporto dei motori delle turbine a gas utilizzate per aerei, navi, treni e generatori di corrente. Per progettare le turbine a gas del futuro, tuttavia, gli ingegneri avranno bisogno di sistemi HPC in esascalà.

Con sistemi più grandi, essi potranno andare oltre la mera CFD e studiare modi in cui il processo di combustione e gli elementi strutturali del motore interagiscono con il flusso d'aria. Gli ingegneri studieranno, ad esempio, come la composizione

molecolare dei materiali può contribuire a migliorare l'efficienza o evitare guasti catastrofici.

Inoltre, la produzione di aeromobili non è certo l'unico settore in cui i tecnici si avvalgono degli strumenti della CFD. Le applicazioni dell'HPC comprendono sviluppo di prodotti di consumo e imballaggi, progettazione automobilistica, energia verde (ad es., la progettazione di turbine eoliche), progettazione di dispositivi medici, progettazione di soluzioni termiche e altre ancora.

## Leadership HPC

Per leadership HPC non si intende semplicemente la creazione di supercomputer velocissimi su benchmark sintetici. Si tratta di sistemi che risolvono problemi reali e che sono fortemente utilizzati dalle parti in causa, utenti finali e comunità. Ecco alcuni altri esempi specifici di iniziative HPC all'avanguardia create con IBM e l'ecosistema OpenPOWER.

### Computer CORAL

In uno sforzo che si è caratterizzato come un importante passo nella direzione dell'elaborazione in esascalà, IBM, NVIDIA, e Mellanox — tutti soci fondatori della OpenPOWER Foundation — stanno ora creando due supercomputer di punta per il Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti, nell'ambito di un progetto denominato "CORAL" dai laboratori nazionali coinvolti: Oak Ridge, Argonne, e Lawrence Livermore.

Due computer CORAL saranno dotati di processori IBM POWER9, insieme con le future GPU Volta di NVIDIA e un'interconnessione di sistema fornita da Mellanox. Essi sono progettati per la ricerca in aree in cui l'HPC è una dotazione necessaria, ad es. cambiamenti climatici, biocarburanti, energia nucleare, astrofisica e altro ancora. Le prestazioni di picco saranno dai 150 ai 300 petaFLOP, con 40 teraFLOP per nodo.

Per i sistemi CORAL non ci si può limitare a parlare di "prestazioni". Essi consentono la ricerca di base in ambiti quali scienze biologiche, materiali, energia, astrofisica, clima e altro ancora con l'intento di migliorare

ogni giorno la vita degli esseri umani. La loro missione prevede la cessione di una parte dei loro cicli per incoraggiare la competitività industriale a tutti i livelli.

### Genomica presso la LSU

Una collaborazione tra la Louisiana State University (LSU) e IBM ha dimostrato notevoli aumenti delle prestazioni nell'analisi genomica.

Nonostante i numerosi precedenti tentativi di analisi del genoma con Hadoop su un cluster HPC di 120 nodi della LSU basato su Intel Xeon, non è stato possibile analizzare un grande insieme di dati metagenomici in un periodo di tempo ragionevole utilizzando le risorse esistenti presso la LSU. Conoscendo le straordinarie capacità di analisi di "big data" offerte da IBM Power Systems, il personale e i ricercatori del Center for Computational Technologies della LSU si sono rivolti a IBM per assistenza.

Il metodo esistente basato su Hadoop è stato portato su un cluster POWER8 di 40 nodi dell'IBM Customer Center con Ubuntu 14.10 e IBM Spectrum Scale (ex GPFS). Il risultato è stato sorprendente. La prima fase dell'analisi Hadoop sull'enorme insieme di dati metagenomici (3,2 TB) è stata completata in 6,25 ore, utilizzando solo 40 nodi.

Si tratta di un passo avanti estremamente promettente nel caso di un utilizzo scientifico di Hadoop con una grande quantità di dati ed elevata intensità di elaborazione.

### Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY)

Il centro di ricerca nazionale DESY in Germania utilizza un acceleratore PETRA III lungo 2,74 km che crea enormi quantità di dati a raggi X utilizzati da più di 2.000 scienziati ogni anno, per esaminare la struttura atomica di una varietà di materiali, tra cui nuovi semiconduttori, catalizzatori, cellule biologiche e altri campioni.

Una delle sfide principali del centro è l'archiviazione e la gestione di enormi volumi di dati di raggi X, che vengono creati a una velocità superiore a 20 gigabyte al secondo, al massimo delle prestazioni. Per fare fronte a questa sfida,

DESY ha implementato una soluzione di "storage elastico" di IBM, progettata espressamente per i "big data".

## Gestione dei nuovi carichi di lavoro procedendo verso l'alto e verso l'esterno

IBM, operando di concerto con la OpenPOWER Foundation, sta procedendo in modo da estendere la portata dell'HPC orizzontalmente in un numero sempre maggiore di aree di attività. La società sta, inoltre, lavorando per estendere la portata dell'HPC "verso l'alto", vale a dire, per aumentare ulteriormente la sua sfera d'azione in materia di ricerca scientifica, "machine learning" e "cognitive computing".

Una delle aree più promettenti dell'HPC per le imprese è l'uso di database accelerati. Un database accelerato, in particolare uno ottimizzato per l'hardware OpenPOWER, offre alle organizzazioni la possibilità di interrogare e visualizzare ad alta velocità feed di "big data" (inclusi dati non strutturati) in tempo quasi reale. Ad esempio, un rivenditore potrebbe analizzare letteralmente miliardi di Tweet entro un periodo di tempo selezionato, ordinarli in termini specifici, ad esempio "organico", e generare, quindi, quasi istantaneamente la mappa del calore risultante. I soci della OpenPOWER Foundation come GPUdb stanno creando database accelerati con prestazioni incredibili.

Questa tecnologia è già stata implementata con successo da grandi organizzazioni per l'analisi dei dati ad alte prestazioni (HPDA, High Performance Data Analysis), tra cui il Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti e lo U.S. Post Office. Mercati chiave nel prossimo futuro includono logistica, vendita al dettaglio, servizi di pubblica utilità, telecomunicazioni e medicina, dove la possibilità di eseguire ricerche in tempo reale in milioni di record archiviati dei pazienti consentirà ai medici di prendere decisioni ottimali basate sull'efficacia dimostrata in passato. IDC prevede che il mercato HPDA raggiungerà più di \$1,4 miliardi nel 2017, un aumento rispetto ai \$776 milioni nel 2013.<sup>xiii</sup>



## Applicazioni emergenti dell'HPC

Oltre questi esempi attuali, ci sono due tendenze che certamente estendono il valore dell'HPC nella sfera di attività: "machine learning" e "cognitive computing".

### Machine Learning

I sistemi di "machine learning" (o apprendimento automatico) creano modelli per adattarsi ai dati e per migliorare man mano che imparano. Questo può comportare il confronto dei dati a fronte di una "risposta giusta", un processo durante il quale un'applicazione esamina, ad esempio, un flusso continuo di prodotti per determinare se rispondono o meno alle specifiche di qualità. La macchina impara dai propri errori e migliora finché riesce a eseguire l'operazione con un alto tasso di successo. In un altro approccio, le macchine si limitano a esaminare i dati alla ricerca di modelli che altrimenti non potrebbero essere rilevati. Questa capacità può essere utilizzata per la segmentazione dei clienti al di là dei dati demografici attualmente impiegati, per portare alla luce modelli di acquisto nascosti e simili.

Il "machine learning" è spesso supportato da reti neurali, costituite da più processori che comunicano su un gran numero di connessioni pesate in un modo simile al funzionamento del cervello umano.

Un esempio lampante di ciò è l'uso di reti neurali nel riconoscimento facciale per la prevenzione delle frodi. Le reti sono "addestrate" a identificare facce specifiche sulla base di input provenienti da milioni di immagini e quindi utilizzate per identificare i truffatori in tempo reale, ad esempio, quando una sola immagine può essere abbinata a più di un gruppo di documenti.

### Cognitive computing

Il "cognitive computing" (o elaborazione cognitiva) è in genere più focalizzato sulle interazioni e il coinvolgimento degli utenti, per capire ciò che

l'utente vuole tramite il contesto e (spesso) l'analisi del linguaggio naturale. Ad esempio, Siri e Cortana possono, tramite uno smartphone, determinare le posizioni degli utenti e se sono alla guida o fermi. Ciò fornisce un contesto all'interno del quale essi comprendono domande o richieste vocali.

I requisiti di elaborazione dei carichi di lavoro generati da "machine learning" e "cognitive computing" sono immensi. In realtà, l'accelerazione da sola non basta per facilitare questi processi; essi richiedono essenzialmente l'elaborazione accelerata.

### Elaborazione accelerata di nuove applicazioni

Il concetto fondamentale di HPC di funzionamento del sistema guidato dall'accelerazione si è già esteso oltre i confini dei dipartimenti di ricerca. Ecco alcuni esempi.

**Vendita al dettaglio:** Un importante rivenditore sta applicando l'HPC al problema della distribuzione. Si tratta, naturalmente, dell'obiettivo di ogni sistema di distribuzione di vendita al dettaglio fornire il prodotto giusto al negozio giusto al momento giusto, e le informazioni da qualsiasi fonte a supporto di tale obiettivo sono preziose. Di recente è emersa una nuova fonte: i social media. Purtroppo la quantità di dati disponibili dai social media è enorme, e i sistemi convenzionali di gestione dei database non sono all'altezza del compito.

È qui che entra in gioco l'HPC. Adottando un approccio architettonico che include l'accelerazione GPU e il fabric NVLink descritto in precedenza, il rivenditore può acquisire informazioni utili e individuare le tendenze in tempo reale. Tali informazioni possono a loro volta essere utilizzate per modificare la distribuzione, destinare la merce appropriata ai negozi appropriati e, infine, aumentare gli utili.

**Servizi finanziari:** La prevenzione delle frodi è una priorità nel settore bancario fin da quando le banche hanno fatto la loro comparsa, e l'era digitale sta solo peggiorando il problema. Una grande banca

sta utilizzando l'accelerazione basata su FPGA in un ambiente HPC per il riconoscimento facciale di truffatori noti. Una volta che il sistema "riconosce" questi criminali noti, confronta le informazioni con l'immissione in tempo reale di dati provenienti dalle telecamere di sicurezza installate presso gli sportelli bancari per segnalare un avvertimento, qualora un individuo sospetto dovesse entrare in una banca. Questa applicazione, che prevede il "machine learning", sarebbe impossibile senza l'HPC.

**Internet of Things:** Sempre più "cose", che vanno dai prodotti di consumo quali frigoriferi a veicoli e pallet in una fabbrica, sono dotate di sensori che forniscono costantemente dati relativi a identità, ubicazione, temperatura e numerosi altri parametri; esiste un numero illimitato di parametri. Uno dei grandi problemi associati all'utilizzo di questi dati è la loro enorme quantità. In termini semplici, gli utenti devono distinguere i dati utili da quelli inutili o dannosi. Ad esempio, se un pallet riferisce la propria posizione e cinque secondi dopo riporta esattamente la stessa posizione, il secondo insieme di dati non ha alcun valore. Utilizzando l'analisi dei pacchetti accelerata dagli FPGA nel contesto di un sistema HPC, le aziende possono ottenere un flusso utile di dati.

## Il futuro dell'elaborazione

Ci sono diversi motivi per cui le organizzazioni saranno costrette a trattare con i "big data" su scala adeguata alla nuova tecnologia, e di gran lunga più conveniente, generata dalla OpenPOWER Foundation. Tra i fattori determinanti vi sono le note "tre V" — volume, varietà e velocità — ma un quarto è in realtà il più importante: valore.

Nessuno può prevedere con certezza dove si posizioneranno le prossime frontiere dei "big data", ma una cosa è chiara. Essi assumeranno un'importanza sempre maggiore per ogni organizzazione. Secondo una stima, entro il 2020 l'universo dei dati avrà raggiunto i 44 zetabyte (44 miliardi di gigabyte). La tecnologia HPC può avvalersi di questi dati. Si stima, inoltre, che una tipica società Fortune 1000 che aumenta l'accessibilità dei dati fino al 10% potrà godere di un aumento dell'utile netto di 65 milioni di dollari.<sup>xiv</sup>

In breve, mentre la quantità e il valore potenziale dei "big data" stanno aumentando, il costo del loro utilizzo è in calo, in particolare attraverso la tecnologia creata da IBM e dei suoi collaboratori OpenPOWER.

<sup>i</sup><http://ibmresearchnews.blogspot.com/2014/11/data-centric-systems-new-paradigm-for.html>

<sup>ii</sup><http://arstechnica.com/information-technology/2016/02/moores-law-really-is-dead-this-time/>

<sup>iii</sup><http://www.slideshare.net/eXascaleInfolab/braintalk-cuso-nm>

<sup>iv</sup><http://www.scientificcomputing.com/articles/2014/03/big-data-meets-hpc>

<sup>v</sup>[https://people.maths.ox.ac.uk/gilesm/files/phil\\_trans14.pdf](https://people.maths.ox.ac.uk/gilesm/files/phil_trans14.pdf)

<sup>vi</sup>[https://people.maths.ox.ac.uk/gilesm/files/phil\\_trans14.pdf](https://people.maths.ox.ac.uk/gilesm/files/phil_trans14.pdf)

<sup>vii</sup><http://www.hpcwire.com/2015/06/09/ibm-power8-outperforms-x86-on-stac-benchmarks/>

<sup>viii</sup>[http://www-01.ibm.com/common/ssi/cgi-bin/ssialias?subtype=AB&infotype=PM&appname=S GE\\_DC\\_ZQ\\_USEN&htmlfid=DCC03020USEN&attachment=DCC03020USEN.PDF](http://www-01.ibm.com/common/ssi/cgi-bin/ssialias?subtype=AB&infotype=PM&appname=S GE_DC_ZQ_USEN&htmlfid=DCC03020USEN&attachment=DCC03020USEN.PDF)

<sup>ix</sup><http://www.enterprisetech.com/2014/10/08/tyan-ships-first-non-ibm-power8-server/>

<sup>x</sup><http://journals.plos.org/plosbiology/article?id=10.1371/journal.pbio.1002195>

<sup>xi</sup><http://www.hpcwire.com/2015/05/18/25-of-life-scientists-will-require-hpc-in-2015/>

<sup>xii</sup><http://www.biztechmagazine.com/article/2014/07/hpc's-role-energy-exploration>

<sup>xiii</sup>[http://www.idc.com/downloads/idc\\_at\\_final.pdf](http://www.idc.com/downloads/idc_at_final.pdf)

<sup>xiv</sup><http://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2015/09/30/big-data-20-mind-boggling-facts-everyone-must-read/#4b9c934f6c1d>