

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA INFORMATICA

Analisi e sviluppo di middleware DDS per la gestione dei consumi in sistemi HPC

Relatore

Prof. Andrea Bartolini

Candidato

Giacomo Madella

Ottobre 2023

Abstract

Indice

1	Introduzione	4
1.1	Contributi	5
2	Power management	6
2.1	Stato dell'arte	6
2.1.1	Servizi In-Band	7
2.1.2	Servizi Out-of-Band	7
2.1.3	Interfacce di alto livello	7
2.2	Componenti PowerStack	7
2.2.1	Workflow engine	9
2.2.2	Job schedulers	9
2.2.3	System Manager	9
2.2.4	Job Manager	9
2.2.5	Node Manager	9
2.2.6	Monitor	9
3	REGALE	11
3.1	Power Stack	11
3.2	Problematica	11
4	DDS & RTPS	12
4.1	Implementazione usata	12
4.2	DDS	12
4.3	RTPS	13
5	Casi di studio e valutazioni	15
5.1	Test	15
5.1.1	Struttura dei test	16
5.1.2	Impatto del numero di sub in un dominio	19
5.1.3	Test1	20
5.1.4	Test2	21

5.1.5	Test3	22
5.2	Risultati	22
5.3	Modello	22
5.4	Scheletro componenti	22
6	Conclusioni	24

Introduzione

Con high performance computing (HPC), o calcolo ad elevate prestazioni, ci si riferisce alle tecnologie utilizzate da cluster calcolatori che lavorando in parallelo, e utilizzando componenti ad alte prestazioni, riescono a processare enormi quantità di dati e risolvere problemi complessi a velocità estreme.

Gli HPC sono progettati per affrontare sfide che richiedono quantità massicce di calcoli, come simulazioni complesse, analisi dei dati su larga scala e ottimizzazione di progetti.

Ovviamente tutto questo ha un costo, e in questo ultimo decennio si sono manifestate delle sempre crescenti richieste di capacità e potenza computazionale mentre le tecnologie ad esse associate si sono avvicinate ai propri limiti fisici. La gestione energetica di sistemi HPC è diventata una delle principali preoccupazioni, non solo a causa dei costi monetari, ma anche per la progettazione di nuove generazioni di supercomputer e per la sostenibilità ambientale.

Questo è dovuto in parte anche alla fine delle leggi di Denard e Moore, che avevano previsto una crescita continua della capacità di calcolo e della densità dei transistor nei circuiti integrati. Tali leggi, che avevano guidato l'industria informatica per decenni, hanno perso progressivamente la loro validità poiché la fine dell'innovazione dei transistor ha comportato un consumo energetico crescente al crescere della velocità e capacità computazionale, rendendo sempre più difficilmente il mantenimento di questi sistemi. Con Power Management invece si definisce una stack software che ha il compito di gestire la potenza, l'energia e la temperatura di sistemi HPC standardizzando le interfacce tra diversi livelli di componenti. Per avere un PowerStack completo è necessario definire una visione globale per la gestione energetica, estensibile ed in grado di ottimizzare la metrica di efficienza desiderata. Il secondo aspetto è definire un'interfaccia standard per interagire con i controlli software e hardware di ottimizzazione su sistemi HPC di diversi fornitori. Mentre sono state proposte diverse tecniche per la gestione della potenza e dell'energia, la maggior parte di queste è stata ideata per soddisfare singole esigenze di uno specifico centro HPC o per obiettivi di ottimizzazione mirati su un insieme di problemi. Un recente studio [22] condotto dal gruppo di lavoro EEHPC [9] ha concluso che la maggior parte di tali tecniche manca di una consapevolezza globale necessaria per

ottenere le migliori prestazioni di sistema e throughput. Inoltre, ciascuna tecnica tende a migliorare la gestione di potenza ed energia per un sottoinsieme diverso dell'hardware del sito o del sistema e a diverse granularità (spesso in conflitto). Sfortunatamente, le tecniche esistenti non sono state progettate per coesistere simultaneamente su un unico sito e cooperare nella gestione in modo efficiente. L'obiettivo finale sarebbe infatti quello di collegare gli strumenti disponibili utilizzando un approccio distribuito, sfruttando il potenziale del Data Distribution Service (DDS)[??] e del Real-Time Publish-Subscribe (RTPS).

1.1 Contributi

- Definire le interfacce tra questi livelli per tradurre gli obiettivi a ciascun livello in azioni al livello inferiore adiacente. - Promuovere l'ottimizzazione end-to-end attraverso diversi livelli del PowerStack.

Power management

Per svolgere al meglio il suo compito, un PowerStack deve interfacciarsi ad una serie di componenti HW e SW come: (i) sensori fisici, (ii) attuatori, (iii) sistema operativo e (iiii) applicazioni dell'utente. Successivamente, grazie a queste interfacce, viene monitorato lo stato di Processore, Temperatura e Tensione, impostando di conseguenza, (secondo delle politiche definite), il target di funzionamento.

Oltre a queste metriche, il Power Management deve monitorare il consumo energetico delle tensioni dei binari dal Resource Manager (RM) e riceve dall'OS le richieste in termini di livello di prestazioni (Frequenza Obiettivo), budget energetico e caratteristiche del carico di lavoro da eseguire. La politica di gestione della potenza determina, in base a questi parametri, il miglior target di funzionamento in cui eseguire gli elementi di elaborazione, garantendo al contempo la stabilità termica, il budget energetico e i vincoli dell'applicazione. La gestione della potenza consente all'applicazione e al modello di programmazione in esecuzione di richiedere modifiche al target di funzionamento in modo asincrono per seguire le fasi dell'applicazione ed entrare in punti di funzionamento a basso consumo energetico durante le fasi limitate dall'I/O, dalla memoria e dalla comunicazione per aumentare l'efficienza energetica.

2.1 Stato dell'arte

Il Power Management è collegato: (i) on-chip ai Power Management (gestendo il consumo energetico e le prestazioni degli elementi di elaborazione principali) e ai sensori (monitorando il processo, la temperatura e la tensione degli elementi di elaborazione principali); (ii) off-chip ai Moduli Regolatori di Tensione (VRM) che alimentano il chip, gli altri componenti a bordo e il Controller di Gestione della Scheda (BMC).

Questi componenti hardware vengono utilizzati per offrire un insieme di servizi in-band e out-of-band.

I servizi in-band vengono forniti alle applicazioni e ai sistemi operativi in esecuzione negli elementi di elaborazione del chip e sono composti da: (i) governor dedicati alla potenza e telemetria correlata alla potenza a livello di sistema operativo; (ii) un'inter-

faccia dedicata per consentire alle applicazioni e ai tempi di esecuzione del modello di programmazione di specificare suggerimenti e prescrizioni per la gestione della potenza; (iii) un'interfaccia dedicata al Sistema e alla Gestione delle Risorse per supportare il capping della potenza a livello di CPU e nodo, nonché per gestire il compromesso tra Throughput ed Efficienza Energetica. I servizi out-of-band vengono forniti all'amministratore di sistema e agli strumenti di gestione del sistema tramite il Controller di Gestione della Scheda (BMC). Questi servizi consistono nella telemetria di potenza out-of-band, nel capping di potenza a livello di sistema e nella affidabilità e assistenza.

2.1.1 Servizi In-Band

Il Power Management condivide una regione di memoria interna con lo spazio degli indirizzi I/O degli elementi di elaborazione. Questa interfaccia consente all'OS di accedere periodicamente a un insieme di strutture dati di stato contenenti lo stato del Power Management, le statistiche e il consumo energetico dei diversi binari di tensione e componenti. Queste informazioni possono essere utilizzate e accessibili dalle applicazioni e dagli utenti per monitorare in modo dettagliato l'energia consumata dalle applicazioni, consentendo la consapevolezza energetica.

2.1.2 Servizi Out-of-Band

Oltre alla politica di gestione della potenza e ai servizi In-Band, il Power Management si interfaccia con il BMC per supportare servizi Out-of-Band. Questi includono la telemetria dettagliata sullo stato di potenza e prestazioni del chip, il Power Management a livello di chip e a livello di sistema e la segnalazione di errori e guasti nel chip e nei processi principali.

2.1.3 Interfacce di alto livello

Nel corso degli anni sono state sviluppati diversi software come parti di Power Management come *Variorum* (LLNL), *GEOPM* (Intel)[1], and *HDEEM* (Atos)[2]. Tutti questi strumenti rappresentano un tentativo di risolvere un problema specifico di Power Management e non un software globale di gestione dell'energia di sistemi HPC.

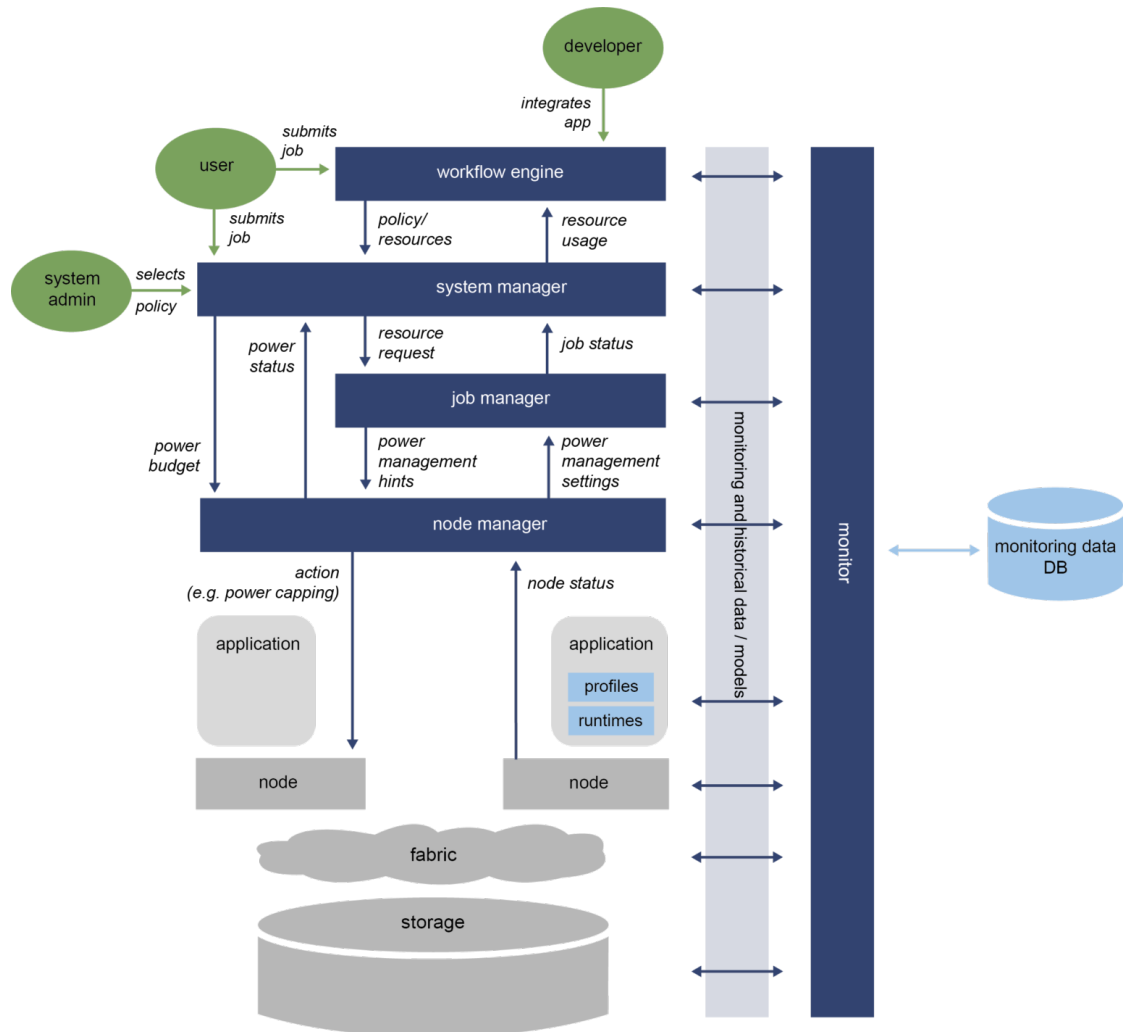
2.2 Componenti PowerStack

Un power stack completo e interoperabile, deve essere composto da attori che svolgono ruoli ben precisi. Tra questi i più importanti sono:

- Workflow engine

- System Manager
- Job Manager
- Node Manager
- Monitor

Di seguito viene riportato uno schema?? che mostra le interazioni tra i vari attori.



2.2.1 Workflow engine

Il workflow engine analizza le dipendenze e le richieste di risorse di ogni workflow e decide dinamicamente come dividerlo negli specifici jobs che verranno assegnati al system-manager.

2.2.2 Job schedulers

Il job scheduler ha il compito di assegnare e condividere le risorse computazionali e fisiche del sistema HPC, ai vari utenti che lo utilizzano. In particolare la serie di compiti che si trova a svolgere è il seguente L'utente schedula i jobs da svolgere in una o più code, definite dallo scheduler. Il Job scheduler esamina tutte le code e i job in esse contenute, e decide dinamicamente, quale sarà l'ordine di esecuzione, e il tempo massimo in cui viene assegnata una risorsa. Generalmente si cerca di ottimizzare alcune caratteristiche come il tempo di utilizzo del sistema oppure l'accesso veloce alle risorse per alcuni sottoinsiemi di jobs. Inoltre le code definite, possono avere diverse priorità o può essere ristretto l'accesso a soli alcuni utenti.

2.2.3 System Manager

Riceve come input un insieme di jobs che devono essere schedulati all'interno del sistema, e in modo indicativo decide quando schedulare ogni job, su quale nodo, e con quale power budget. Successivamente vengono monitorati i dati relativi a potenza ed energia, e controlla di conseguenza i budget di potenza, e la *user-fairness*

2.2.4 Job Manager

Il job manager decide i target delle manopole del Power Management, come (i) CPU power cap, (ii) CPU clock frequency oltre ad eseguire ottimizzazione del codice.

2.2.5 Node Manager

Il node manager fornisce accesso ai controlli e monitoraggio hardware a livello del nodo. Volendo permette anche di definire delle policy di power management. Ha infine lo scopo di preservare integrità, sicurezza del nodo sia in termini informatici che fisici.

2.2.6 Monitor

Il monitor è responsabile di collezionare tutte le metriche in-band e out-of-band che riguardando:

- prestazioni

- Utilizzo di risorse
- Stato delle risorse
- Potenza
- Energia

Tutto questo deve essere fatto con il minor impatto possibile sul sistema dove sta agendo, collezionando, aggregando e analizzando le metriche e dove necessario, scambiandole ad altri attori.

REGALE

REGALE è:

3.1 Power Stack

Molti dei compiti necessari dal ps precedentemente citati sono già coperti da componenti di REGALE:

3.2 Problematica

DDS & RTPS

DDS (Data Distribution Service)[3] e RTPS (Real-Time Publish-Subscribe)[4] costituiscono due soluzioni fondamentali nel campo delle comunicazioni distribuite e real-time. Queste tecnologie svolgono un ruolo importante nella la trasmissione di dati tra dispositivi e applicazioni interconnesse, rivestendo particolare importanza in scenari complessi come i sistemi embedded, in IoT e applicazioni ad alte prestazioni come l'HPC (High-Performance Computing).

4.1 Implementazione usata

DDS e RTPS sono dei protocolli di comunicazione per specifici casi di utilizzo. Ci sono state diverse implementazioni di questi protocolli da diversi società e organizzazioni, come:

- FastDDS (eprosima)
- CycloneDDS (Oracle)
- ConnexDDS
- GurumDDS

e tante altre. In tutti i successivi capitoli verrà preso come riferimento FastDDS ed in particolare la sua versione 2.11.2 [5]. E' stato scelto di utilizzare questa implementazione dato il supporto per le comunicazione Real-Time, e le impostazioni delle Qualità del servizio(QoS) che la rendevano perfetta per un utilizzo su sistemi di HPC.

4.2 DDS

Data Distribution Service è un protocollo di comunicazione incentrato sullo scambio di dati per sistemi distribuiti. Questo si basa su modello chiamato Data-Centric Publish Subscribe (DCPS) I principali attori che vengono coinvolti sono:

- **Publisher:** responsabile della creazione e configurazione dei DataWriter. Il DataWriter è l'entità responsabile della pubblicazione effettiva dei messaggi. Ciascuno avrà un Topic assegnato sotto il quale vengono pubblicati i messaggi;
- **Subscriber:** responsabile di ricevere i dati pubblicati sotto i topic ai quali si iscrive. Serve uno o più oggetti DataReader, che sono responsabili di comunicare la disponibilità di nuovi dati all'applicazione;
- **Topic:** collega i DataWriter con i DataReader. È univoco all'interno di un dominio DDS;
- **Dominio:** utilizzato per collegare tutti i publisher e subscriber appartenenti a una o più domini di appartenenza, che scambiano dati sotto diversi topic. Il DomainParticipant funge da contenitore per altre entità DCPS, e svolge anche la funzione di costruttore di entità Publisher, Subscriber e Topic fornendo anche servizi di QoS;
- **Partizione:** costituisce un isolamento logico di entità all'interno dell'isolamento fisico offerto dal dominio;

Inoltre DDS definisce le cosiddette Qualità di Servizio (QoS policy) che servono configurare il comportamento di ognuno di questi attori.

4.3 RTPS

Real-Time Publisher Subscribe protocol è un protocollo-middleware utilizzato da DDS per gestire la comunicazione su diversi protocolli di rete come UDP/TCP e Shared Memory. Il suo principale scopo è quello di inviare messaggi real-time, con un approccio best-effort e cercando di massimizzare l'efficienza. E' inoltre progettato per fornire strumenti per la comunicazione unicast e multicast. Le principali entità descritte da RTPS sono:

- **RTPSWriter:** endpoint capace di inviare dati;
- **RTPSReader:** endpoint abilitato alla ricezione dei dati;

Ereditato da DDS anche RTPS ha la concezione di Dominio di comunicazione e come questo, le comunicazioni a livello di RTPS girano attorno al concetto di Topic prima definito. L'unità di comunicazione è chiamata **Change** che rappresenta appunto un cambiamento sui dati scritti sotto un certo topic. Ognuno degli attori registra questi *Change* in una struttura dati che funge da cache. In particolare la sequenza di scambio è:

1. il *change* viene aggiunto nella cache del RTPSWriter;
2. RTPSWriter manda questa *change* a tutti gli RTPSReader che conosce;
3. quando RTPSReader riceve il messaggio, aggiorna la sua cache con il nuovo *change*.

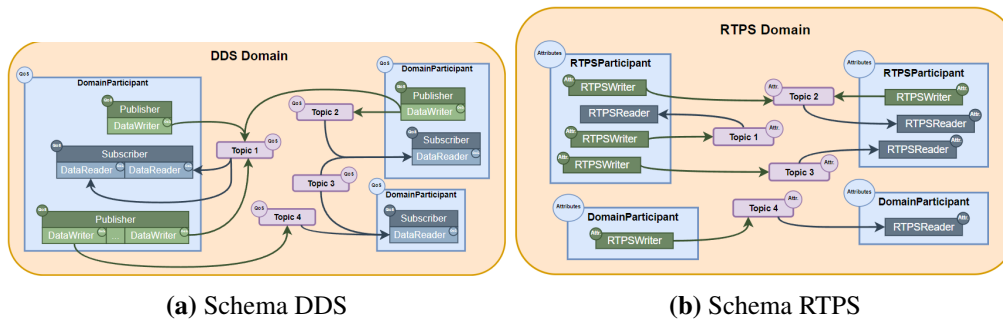


Figura 4.1. Confronto tra architettura DDS e RTPS

Casi di studio e valutazioni

In questa sezione verranno riportati i casi studio e i test effettuati sul framework. Tutti questi sono stati eseguiti su un sistema HPC Galielo-100 Cineca con le specifiche riportate nella tabella seguente

Parameter	Value
Number of nodes used	3
Processor	Intel CascadeLake 8260
Number of sockets per node	2
Number of cores per socket	24
Memory size per node	384 GB
Interconnect	Mellanox Infiniband 100GbE
OS	CentOS Linux
MPI	Open MPI 4.1.1

5.1 Test

Sono stati svolti diversi test al fine di trovare un modello ottimale di utilizzo e per la caratterizzazione di DDS, all'interno di sistemi HPC, nel contesto del Power Management. Nello specifico i test sono stati utili a capire il peso che avesse una singola configurazione o modello di utilizzo al fine di trovare quello più adeguato per una futura implementazione. I test effettuati sono:

- test-1: protocollo di comunicazione

- test-2: partizioni e wildcards
- test-3: throughput

Al fine di condurli nel modo più trasparente e corretto possibile sono stati resi pubblici [6] tutti i codici utilizzati durante lo svolgimento di questi test.

5.1.1 Struttura dei test

Ognuno dei test effettuati, con il fine di coprire e reperire il maggior numero di informazioni possibili, ha dovuto monitorare e catalogare 4 tipi di informazioni diversi:

- Tempo solo invio
- Istruzioni Perf-Event
- Cicli TSC (read_tsc)
- Tempo invio-ricezione

In particolare nel Publisher 4.2 prima e dopo la chiamata a funzione di write() si sono presi i valori tempo-invio, istruzioni, e TSC, mentre al lato ricevente, di Subscriber 4.2 è stato preso il tempo al momento dell'arrivo del messaggio. Segue uno schema uml della base di ognuno dei test.

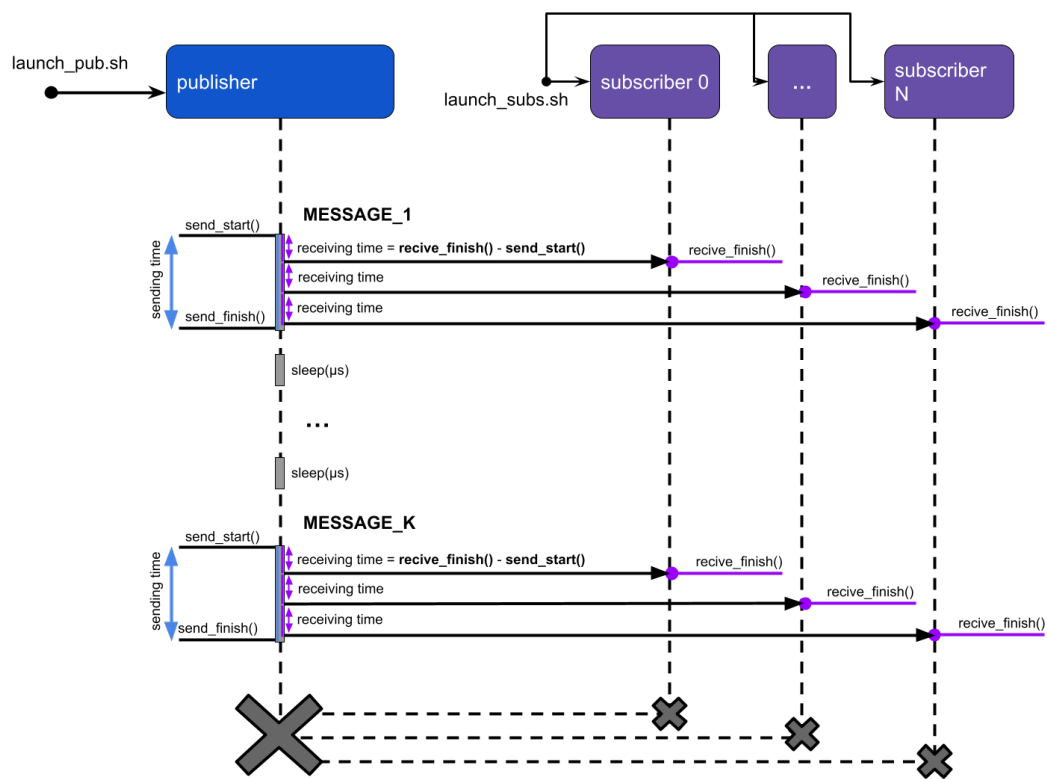


Figura 5.1. Schema UML

Sincronizzazione orologi su nodi diversi

Per ottenere risultati attendibili sulla metrica del tempo è stato necessario sincronizzare i nodi utilizzati prima di poter far partire i test. Per farlo è stata usata una funzione *CLOCK_MONOTONIC* che rappresenta un *un orologio non impostabile a livello di sistema che rappresenta il tempo monotono da un punto non specificato nel passato*. Su Linux, quel punto corrisponde al numero di secondi di esecuzione del sistema da quando è stato avviato. L'orologio *CLOCK_MONOTONIC* non è influenzato da salti discontinui nell'ora del sistema, ma è influenzato dalle regolazioni incrementali eseguite da NTP. Il problema che si è presentato, è che avendo nodi diversi su cui far eseguire i test, per provare ad esempio nel modo più affidabile i protocolli di trasporto, è stato necessario implementare delle MPI_Barrier prima di diverse esecuzioni di *clock_gettime(CLOCK_MONOTONIC)*. Di seguito sono stati riportati i grafici del risultato ottenuto.

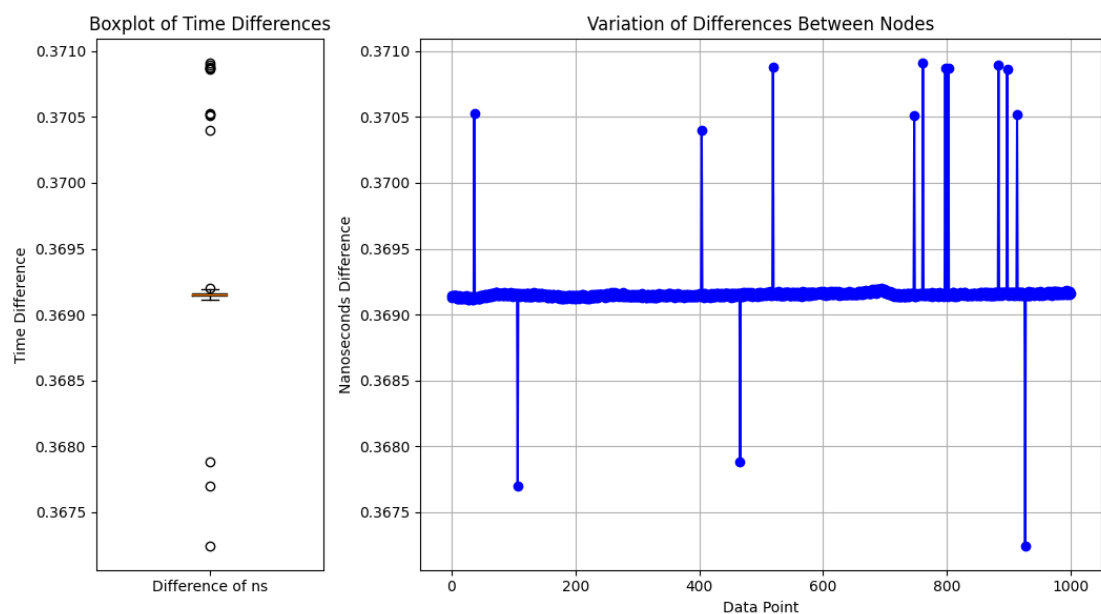


Figura 5.2. Scostamento del tempo su nodi diversi

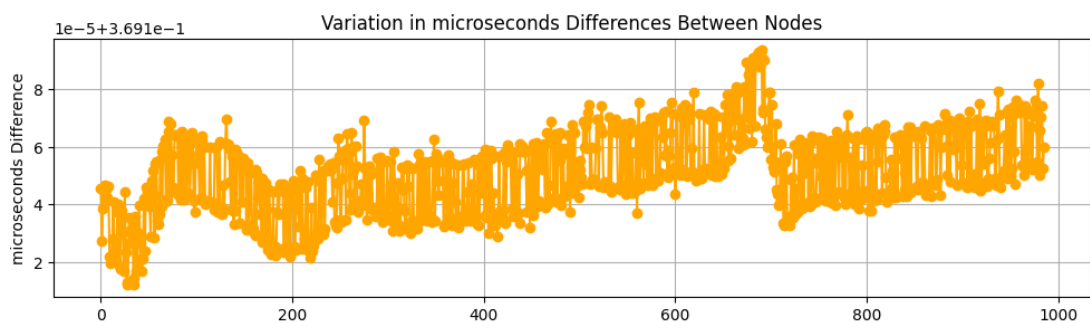


Figura 5.3. Scostamento senza outliers

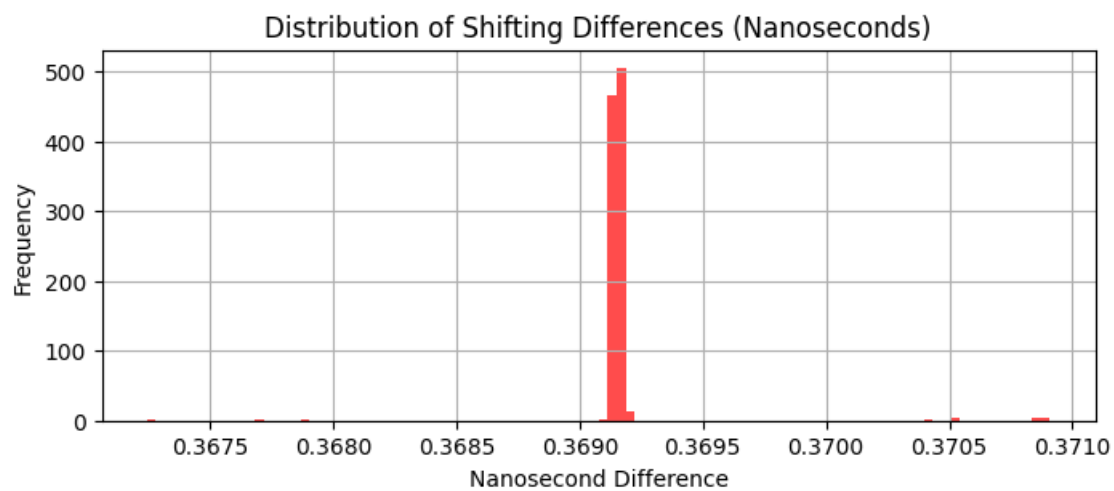


Figura 5.4. Distribuzione delle differenze

Come possibile vedere nella figura 5.2 nonostante le `mpi_barrier`, sono presenti degli scostamenti di tempo tra 2 nodi durante diversi test effettuati (in particolare 1000), e si è scelto di utilizzare il valore modale di questa differenza, sulla base del quale, si sono elaborati tutti i dati successivi.

5.1.2 Impatto del numero di sub in un dominio

Visto lo schema 5.1 risulta facile capire, che il numero di subscriber presenti in un dominio comporta un overhead di comunicazione che va ad influenzare sia i tempi, che i cicli, che le istruzioni impiegate nella singola *publish* su un topic che viene facilmente dimostrato nella figura 5.5.

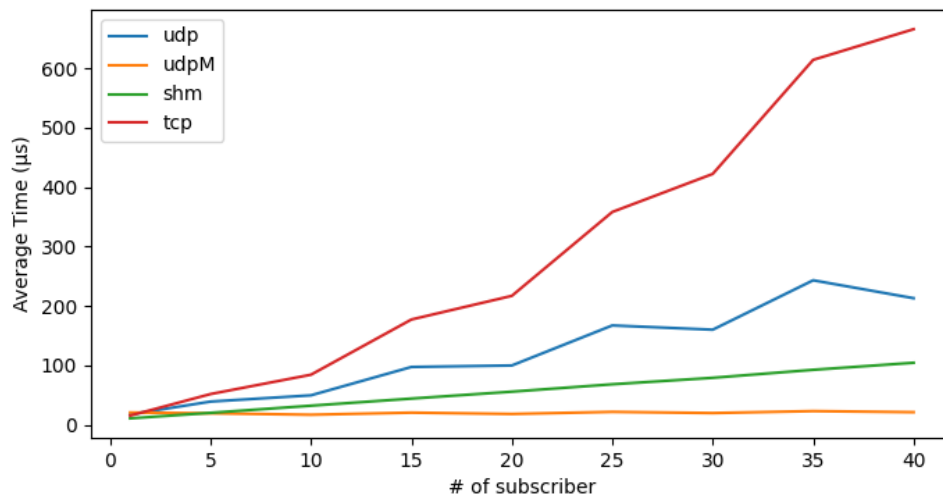


Figura 5.5. overhead sulla publish all'aumentare dei subscriber

Ovviamente l'impatto è poco significativo in quei protocolli che applicano strutture di multicasting (spiegata successivamente) come udp-Multicast e Shared-Memory.

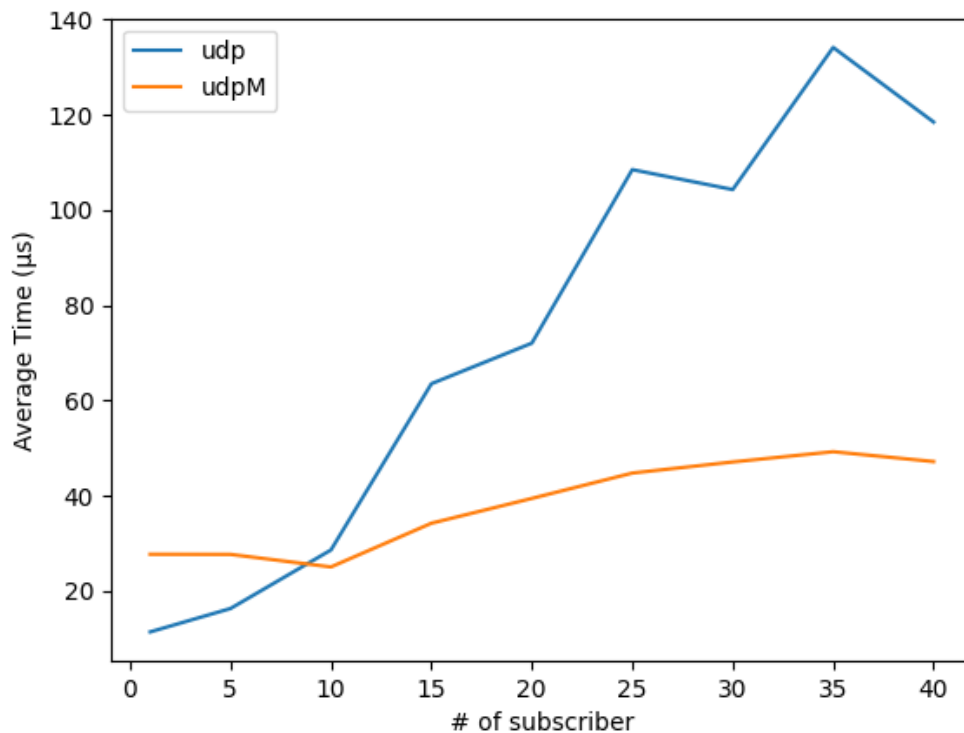


Figura 5.6

Questo può portare una singola publish a impiegare più cicli e più tempo della singola ricezione dei messaggi, come si vede nella figura 5.7

In tutti i test successivi, ove non specificato diversamente sono stati usati 1 publisher e 48 subscriber su diversi nodi. Questo è stato fatto per provare la scalabilità, visto che nel testbed che è stato utilizzato, erano presenti 48 core (1 core per ogni subscriber).

5.1.3 Test1

In DDS ed in particolare nel layer sottostante di RTPS, per scambiare messaggi anche tramite rete, e non solo nello stesso nodo, è possibile scegliere come mezzo diversi tipi di protocolli:

- udp: fornisce due versioni v4 e v6 e importa l'omonimo protocollo di trasporto
- tcp: fornisce due versioni v4 e v6 e importa l'omonimo protocollo di trasporto

- **udp-multicast**: una versione modificata del semplice udp, dove tutti i subscriber collegati allo stesso topic, hanno un indirizzo comune di ricezione dei dati, permettendo così al publisher di inviare un singolo messaggio che viene condiviso tra tutti i subscriber
- **shared-memory**: analogo al metodo precedentemente, ma invece di utilizzare un indirizzo IP, viene utilizzato un indirizzo di memoria. E' possibile solo quando i due processi che comunicano sono sullo stesso nodo, con memoria condivisa.

Nel primo test si è valutata la differenza di queste implementazioni utilizzando la rete infiniband 5 su diversi nodi di un supercalcolatore. I risultati che sono stati trovati forniscono importanti informazioni,

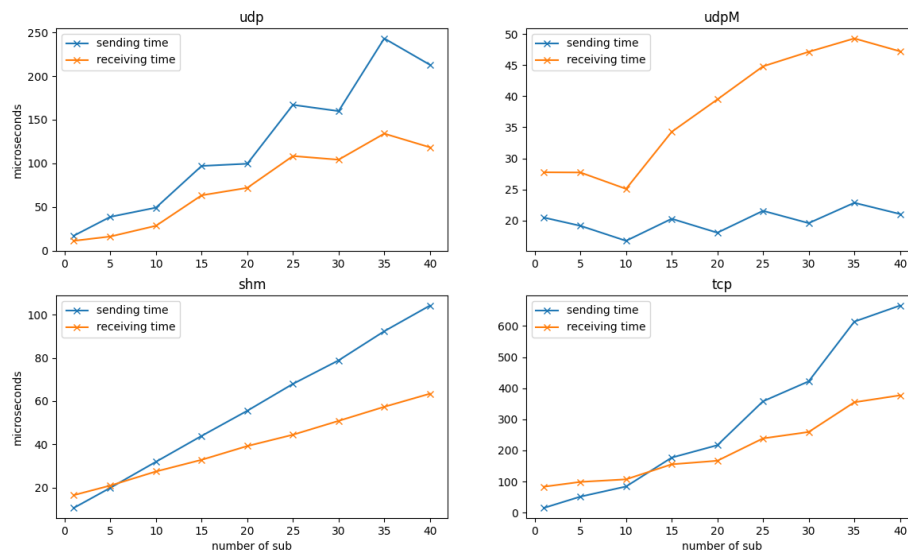


Figura 5.7. differenza tra solo publish e publish-subscribe per ogni protocollo

5.1.4 Test2

Un concetto fondamentale nelle comunicazioni tra attori con gerarchie diverse, in sistemi con diverse centinaia di migliaia di entità, come cluster, nodi, processori, workflow, job (etc.), sono le possibilità di instradare, segmentare e rendere gerarchiche le comunicazioni. Come spiegato nel capitolo 4 in DDS ci sono diversi strumenti disponibili per farlo. Tra di loro differiscono per alcuni aspetti, come flessibilità, costo (in performance) e livello di segmentazione.

In questo test si è valutata la differenza in termini di performance dei diversi strumenti, con un particolare focus sulle partizioni e le wildcards rese disponibili in esso.

Comparazione strumenti

Nei test effettuati con domini, topic e partizioni, non sono state notate differenze degne di nota in termini di performance (cicli e istruzioni) nell'usare uno strumento piuttosto che un altro.

Dominio

Il dominio è la segmentazione di più "forte" e di più alto livello. Va a partizionare gli attori presenti in un dominio in modo del tutto fisico (cambiando per ogni dominio porte e indirizzi di comunicazione) e per nulla flessibile. Per cambiare il dominio è necessario distruggere e creare di nuovo il partecipante. Inoltre il dominio non permette nessun tipo di gerarchia.

Topic

All'interno di un dominio i topic definiscono il metodo principale di instradamento dei messaggi, essendo però limitato dal tipo di messaggio che si vuole inviare. Infatti topic diversi supportano tipi di dato diversi, e non sono modificabili a run-time. Inoltre il topic non permette gerarchie

Partizione

Partizione: molto flessibile, gerarchico, segmentazione virtuale. Topic: flessibile ma a costo elevato, non gerarchico, segmentazione virtuale.

Wildcards

5.1.5 Test3

5.2 Risultati

5.3 Modello

5.4 Scheletro componenti

Nel seguente capitolo viene stilato uno scheletro dei componenti con i relativi topic usati al fine di dare una visione completa e aggiuntiva rispetto al modello precedentemente stilato

DUMMIES	
NAME	USED
NODE MANAGER DUMMY	<ul style="list-style-type: none"> ● P 0 default Monitor_report_job_telemetry ● P 0 default Monitor_report_node_telemetry ● P 0 default Monitor_report_cluster_telemetry
JOB SCHEDULER DUMMY	<ul style="list-style-type: none"> ● P 0 default SystemPowerManager_get ● P 0 default SystemPowerManager_set ● S 0 default SystemPowerManager_get_reply ● S 0 default SystemPowerManager_set_repl
JOB MANAGER DUMMY	<ul style="list-style-type: none"> ● S 0 default NodeManager_get ● P 0 default NodeManager_get_reply
SERVERS	
NAME	OFFERED
NODE MANAGER	<ul style="list-style-type: none"> ● S 0 default NodeManager_get ● S 0 default NodeManager_set ● P 0 default NodeManager_get_reply ● P 0 default NodeManager_set_reply
SYSTEM POWER MANAGER	<ul style="list-style-type: none"> ● S 0 default SystemPowerManager_get ● S 0 default SystemPowerManager_set ● P 0 default SystemPowerManager_get_reply ● P 0 default SystemPowerManager_set_reply
MONITOR	<ul style="list-style-type: none"> ● S 0 default Monitor_report_job_telemetry ● S 0 default Monitor_report_node_telemetry ● S 0 default Monitor_report_cluster_telemetry

Conclusioni

È stato dimostrato come un framework di comunicazione DDS può essere usato all'interno di un Power-Stack per la gestione di energia in sistemi HPC vincolati dalla potenza al fine di affrontare il problema della limitazione energetica.

Bibliografia

- [1] INTEL. *GEOPM*. 2017. URL: https://sc17.supercomputing.org/SC17%20Archive/tech_poster/poster_files/post176s2-file3.pdf.
- [2] Daniel Hackenberg et al. «HDEEM: High Definition Energy Efficiency Monitoring». In: *2014 Energy Efficient Supercomputing Workshop*. 2014, pp. 1–10. DOI: [10.1109/E2SC.2014.13](https://doi.org/10.1109/E2SC.2014.13).
- [3] Object Management Group. *Data Distribution Service*. 2004. URL: <https://www.omg.org/spec/DDS/1.0>.
- [4] Object Management Group. *DDS Interoperability Wire Protocol*. 2008. URL: <https://www.omg.org/spec/DDSI-RTPS/2.0>.
- [5] eProsimia. *FastDDS*. 2022. URL: <https://fast-dds.docs.eprosima.com/en/v2.11.2/>.
- [6] Giacomo Madella. *github/tesiMagistrale*. 2023. URL: <https://github.com/madella/tesiM>.