

Sviluppo di un ambiente per la simulazione distribuita

Stelluti Francesco Pio, 100637
`francescopi.stelluti@studenti.unicam.it`

Zamponi Marco, 100911
`marco.zamponi@studenti.unicam.it`

24 giugno 2020

Indice

Introduzione	5
1 Ambiente per la simulazione distribuita	7
1.1 Struttura delle classi	7
1.1.1 <code>quasylab.sibilla.core.network</code>	7
1.1.2 <code>quasylab.sibilla.core.network.client</code>	7
1.1.3 <code>quasylab.sibilla.core.network.master</code>	8
1.1.4 <code>quasylab.sibilla.core.network.slave</code>	8
1.1.5 <code>quasylab.sibilla.core.network.communication</code>	9
1.1.6 <code>quasylab.sibilla.core.network.compression</code>	10
1.1.7 <code>quasylab.sibilla.core.network.serialization</code>	11
1.1.8 <code>quasylab.sibilla.core.network.util</code>	11
1.2 Descrizione dell'infrastruttura	12
1.2.1 Client	12
1.2.2 Server Master	13
1.2.3 Server Slave	13
1.3 Protocollo di comunicazione	14
1.3.1 Comandi scambiati	14
1.3.1.1 Client	14
1.3.1.2 Server Master	15
1.3.1.3 Server Slave	15
1.3.2 Trasporto delle informazioni	15
1.3.2.1 <code>TCPNetworkManager</code> e l'impiego di TLS	15
1.3.2.2 <code>UDPNetworkManager</code>	16
1.3.3 Ulteriori funzionalità	16
1.3.3.1 Serializzazione	16
1.3.3.2 Compressione	17
1.3.3.3 Caricamento del modello di simulazione a tempo d'esecuzione	17
1.4 Avvio degli esempi di applicazione	18
1.4.1 Classi d'esempio e parametri per l'avvio	18
1.4.1.1 <code>quasylab.sibilla.examples.servers.client</code>	18
1.4.1.2 <code>quasylab.sibilla.examples.servers.master</code>	19
1.4.1.3 <code>quasylab.sibilla.examples.servers.slave</code>	21
1.5 Interfaccia di monitoraggio	21
1.6 Logging delle attività	22
1.7 Documentazione del codice	23

2	Conclusioni	24
2.1	Dispositivi su cui è stata testata la libreria	24
2.2	Problemi e limiti della libreria	24
2.3	Sviluppi futuri della libreria	25

Elenco delle figure

1.1	Diagramma delle classi del package <code>quasylab.sibilla.core.network</code>	7
1.2	Diagramma delle classi del package <code>quasylab.sibilla.core.network.client</code> . . .	8
1.3	Diagramma delle classi del package <code>quasylab.sibilla.core.network.master</code> . . .	8
1.4	Diagramma delle classi del package <code>quasylab.sibilla.core.network.slave</code>	9
1.5	Diagramma delle classi del package <code>quasylab.sibilla.core.network.communication</code>	10
1.6	Diagramma delle classi del package <code>quasylab.sibilla.core.network.compression</code>	11
1.7	Diagramma delle classi del package <code>quasylab.sibilla.core.network.serialization</code>	11
1.8	Diagramma delle classi del package <code>quasylab.sibilla.core.network.util</code>	12
1.9	Diagramma delle classi del package <code>quasylab.sibilla.examples.servers.client</code>	19
1.10	Diagramma delle classi del package <code>quasylab.sibilla.examples.servers.master</code>	20
1.11	Diagramma delle classi del package <code>quasylab.sibilla.examples.servers.slave</code> .	21
1.12	Una schermata del frontend che monitora un Master server	22
1.13	Il log presente in un terminale in cui è stato avviato l'eseguibile del package <code>quasylab.sibilla.examples.servers.client</code>	23

Elenco delle tabelle

1.1	Comandi disponibili per i Client	14
1.2	Comandi disponibili per i server Master	15
1.3	Comandi disponibili per i server Slave	15
1.4	Parametri di avvio nel Client d'esempio	19
1.5	Parametri di avvio nel server Master d'esempio	20
1.6	Parametri di avvio nel server Slave d'esempio	21

Introduzione

Con *simulazione* si fa riferimento ad un processo di analisi che consente di prevedere le possibili evoluzioni di un *sistema reale* a partire da una sua opportuna descrizione. Gli ambiti di applicazione della simulazione sono molteplici e vanno dall'ingegneria civile alla biologia, dalle scienze sociali all'epidemiologia.

Il primo passo della simulazione è la definizione del *modello* che descrive il *sistema* che si vuole simulare. Esistono diversi formalismi, che variano a secondo del particolare contesto applicativo, per descrivere il modello da simulare. Ogni formalismo metterà in risalto gli aspetti specifici che si vogliono studiare in un sistema.

Dato un *modello* il processo di simulazione consente di ricostruire l'evoluzione dello stesso nel tempo. Supponendo che ad un certo tempo t il nostro sistema descritto per mezzo di un modello M si trovi nello stato s , il singolo passo di simulazione viene realizzato individuando il prossimo stato s' e a quale istante di tempo $t' > t$ tale stato verrà raggiunto. L'evoluzione del sistema, infatti, viene rappresentato per mezzo di *passi discreti*. La computazione del singolo passo di comunicazione necessita l'uso di un *generatore pseudocasuale di numeri* necessario a *risolvere* le possibili incertezze presenti nel sistema.

Il risultato di un singolo *run* di simulazione permette di ottenere a partire da un modello M e da uno *stato iniziale* s una sequenza, detta anche *traiettoria*, che descrive l'evoluzione del sistema nel tempo¹:

$$(s, 0)(s_1, t_1) \cdots (s_i, t_i) \cdots (s_n, t_n)$$

dove (s_i, t_i) rappresenta lo stato del sistema a tempo t_i .

Per poter effettuare l'analisi di un sistema un numero N di traiettorie vengono generate ed analizzate per mezzo di metodi statistici. Quest'ultimi vengono utilizzati per poter stimare parametri quali *media* e *varianza* delle misure di interesse o per valutare la *probabilità* con cui certe configurazioni (potenzialmente pericolose) possono essere raggiunte. Maggiore è il numero N di traiettorie generate, maggiore sarà la *precisione* dei risultati stimati. Questo significa che, per poter garantire analisi ragionevoli, è spesso necessario generare un numero elevato di traiettorie. Tale generazione, soprattutto nel caso di sistemi di dimensioni elevate, risulta particolarmente oneroso per quanto riguarda il tempo di computazione. Fortunatamente, però, il processo di generazione è completamente *parallelizzabile*.

Lo scopo di questo lavoro è stato quello di sviluppare un ambiente distribuito per il supporto alla simulazione di sistemi. L'ambiente di simulazione è stato integrato nel framework Sibilla², un ambiente di simulazione sviluppato presso l'Università di Camerino.

Sibilla

Sibilla è un ambiente di simulazione specificatamente pensato per supportare la simulazione di sistemi basati su un elevato numero di agenti che interagiscono. Il framework non si basa su

¹Per semplicità si assume che la simulazione parta dal tempo 0.

²<https://github.com/quasylab/sibilla>

un particolare formalismo, ma fornisce gli strumenti per poter personalizzare sia il processo di simulazione che la tipologia di modello utilizzato per descrivere i sistemi. Questo è stato grazie all'uso degli opportuni pattern di sviluppo che semplificano l'integrazione di nuovi componenti.

Attualmente in Sibilla sono integrati modelli per la descrizione dei sistemi per mezzo di *Process Description Languages* (PDL). Questa tipologia di formalismi consentono di rappresentare il sistema in termini di una serie di *processi* o *agenti* che interagiscono tra loro allo scopo di raggiungere un particolare obiettivo. Tali formalismi fondano le proprie basi teoriche nelle *Algebre di Processo*, strumenti matematici specificatamente introdotti per descrivere il *comportamento* e la *comunicazione* tra i processi.

Il framework Sibilla, inoltre, consente di poter effettuare la simulazione utilizzando un approccio multi-threading e concorrente. Questo permette di poter sfruttare al meglio le capacità computazionali dei moderni processori che, grazie alla loro struttura basata su *multicore*, permettono l'esecuzione concorrente di un numero di flussi computazionali (o *thread*).

Il lavoro del progetto si è concentrato nello sviluppo e affinamento delle classi orientate a rendere la simulazione del framework *Sibilla* distribuita in rete. Da questo lavoro è nata la libreria `quasylab.sibilla.core.network`, ideata per affiancare e sfruttare le classi già presenti nella libreria originale `quasylab.sibilla.core.simulator`.

Capitolo 1

Ambiente per la simulazione distribuita

1.1 Struttura delle classi

1.1.1 `quasylab.sibilla.core.network`

Il package di riferimento relativo alla *libreria sviluppata*. Le classi contenute al suo interno hanno la natura di wrapper di dati e hanno un impiego condiviso da parte degli ulteriori pacchetti, ognuno presente con responsabilità e finalità definiti:

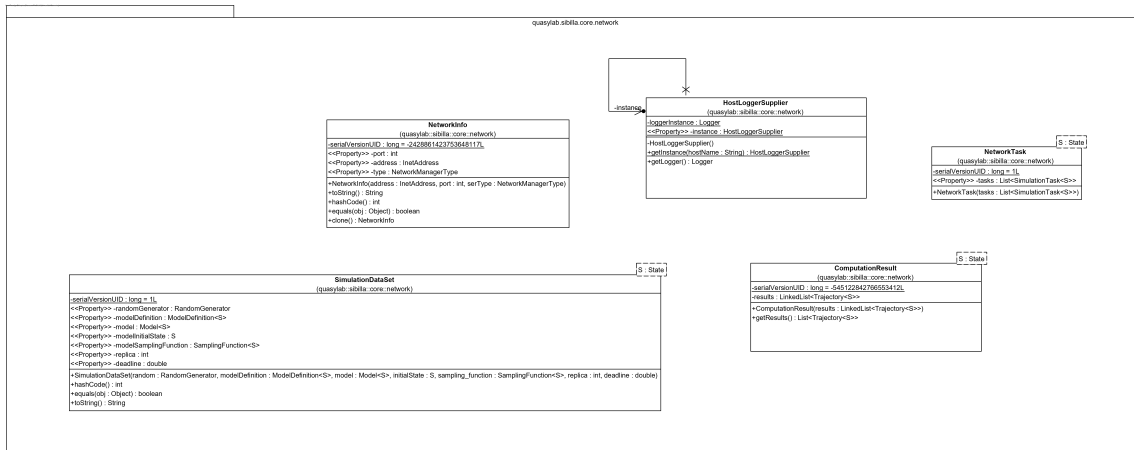


Figura 1.1: Diagramma delle classi del package `quasylab.sibilla.core.network`

1.1.2 `quasylab.sibilla.core.network.client`

Contiene tutte le classi utili a inizializzare un nuovo *Client* e a gestire la comunicazione con un server Master.

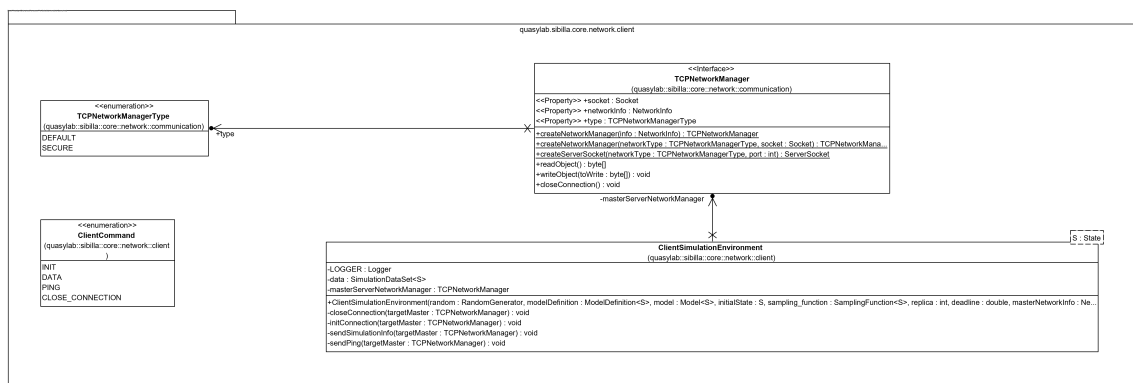


Figura 1.2: Diagramma delle classi del package `quasylab.sibilla.core.network.client`

1.1.3 quasylab.sibilla.core.network.master

Contiene tutte le classi utili a inizializzare un nuovo *server Master* e a gestire la comunicazione con tutti i Client che sottomettono ad esso simulazione e con tutti i server Slave che sono presenti all'interno della rete in cui tale Master è avviato.

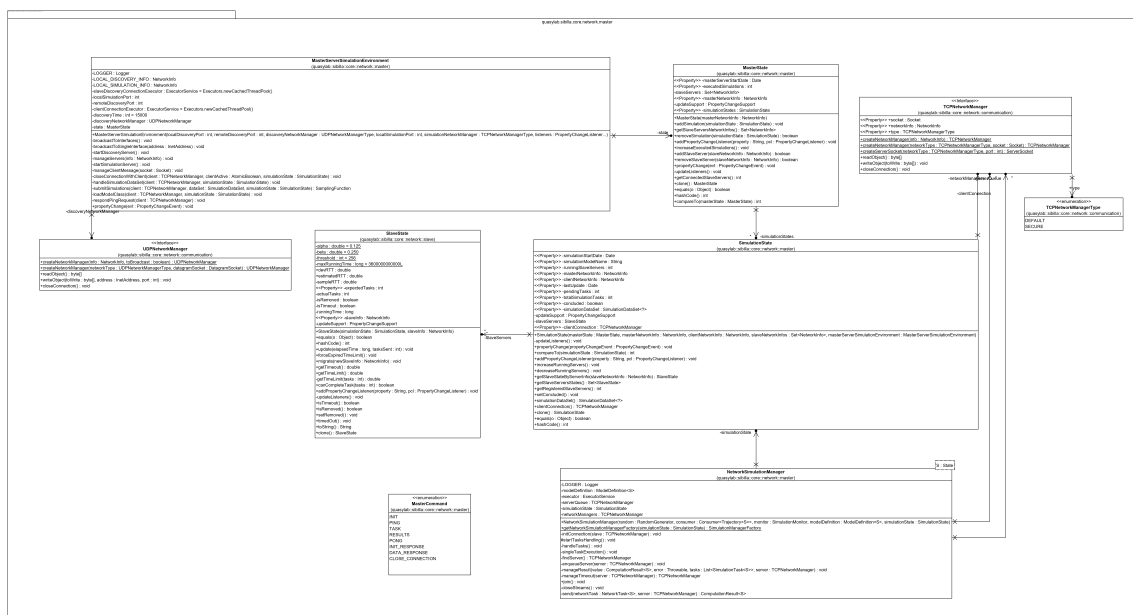
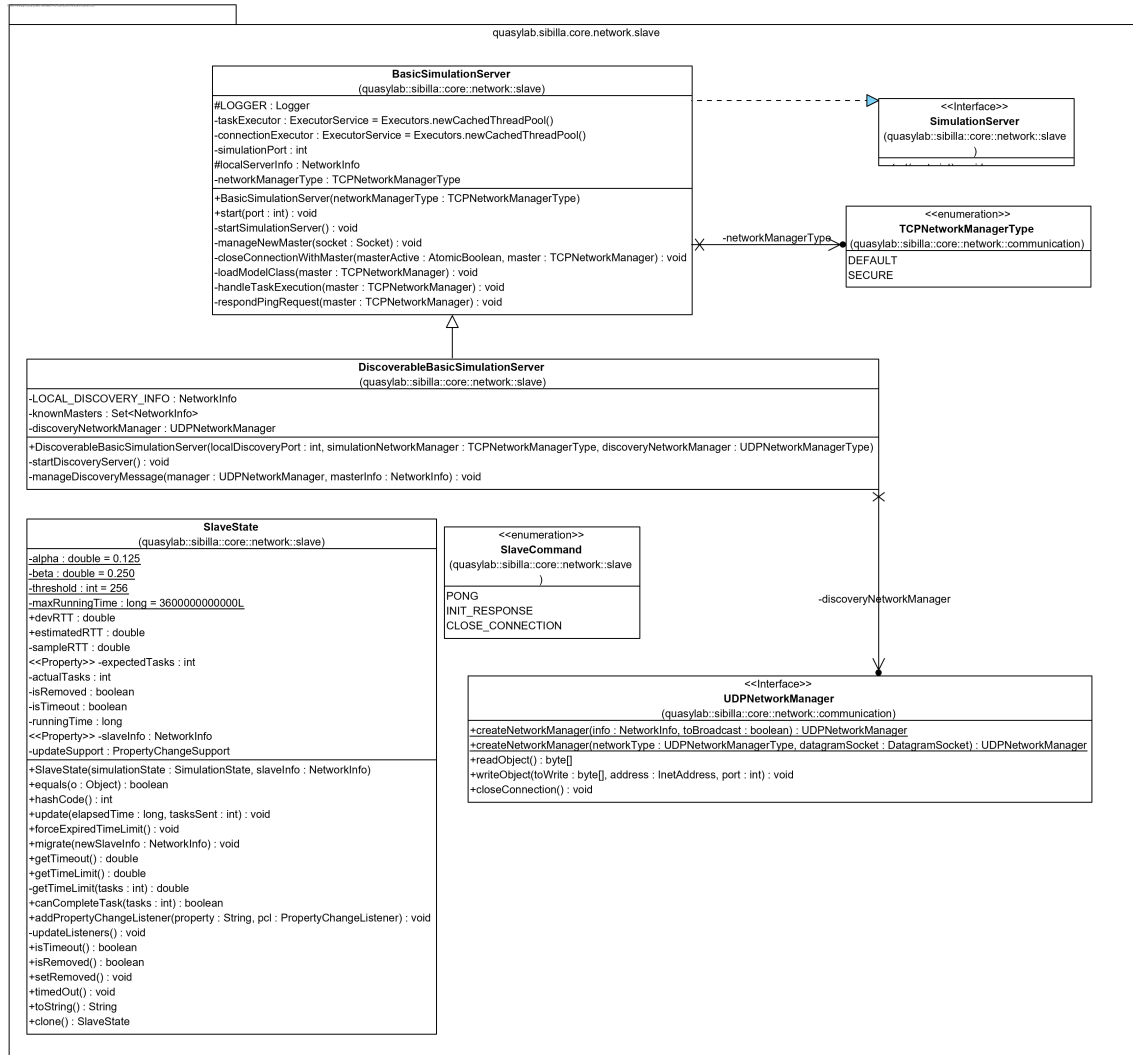


Figura 1.3: Diagramma delle classi del package `quasylab.sibilla.core.network.master`

1.1.4 quasylab.sibilla.core.network.slave

Contiene tutte le classi utili a inizializzare un nuovo *server Slave* e a gestire la comunicazione con tutti i server Master che inviano messaggi di discovery e sottomettono simulazioni.

Figura 1.4: Diagramma delle classi del package `quasylib.sibilla.core.network.slave`

1.1.5 quasylib.sibilla.core.network.communication

Contiene le classi che si occupano di gestire la *comunicazione* tramite i vari nodi dell'infrastruttura basandosi sui protocolli di trasporto TCP e UDP.

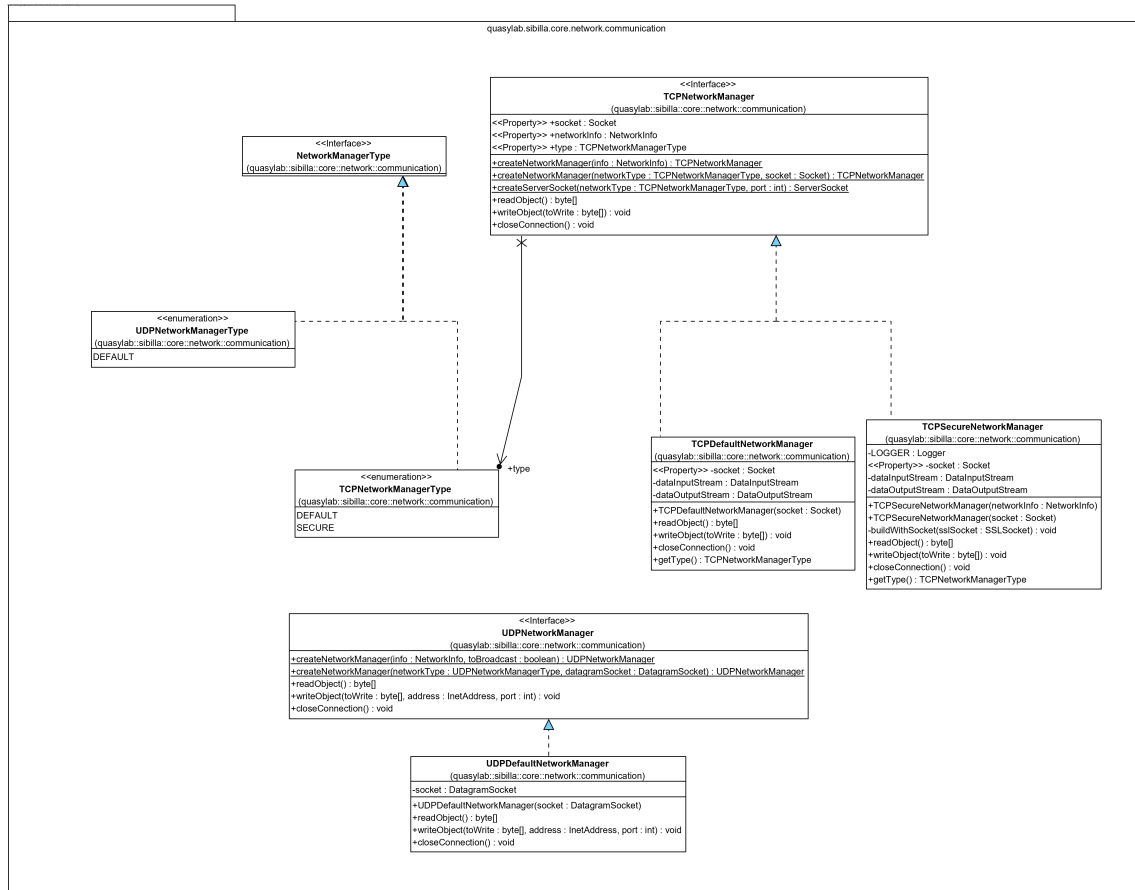


Figura 1.5: Diagramma delle classi del package
quasylib.sibilla.core.network.communication

1.1.6 quasylib.sibilla.core.network.compression

Contiene le classi di utilità che sono impiegate per la *compressione* e la *decompressione* dei messaggi e dei dati all'interno del protocollo di comunicazione. Il funzionamento delle classi all'interno del pacchetto si basa sulla libreria `java.util.zip`.

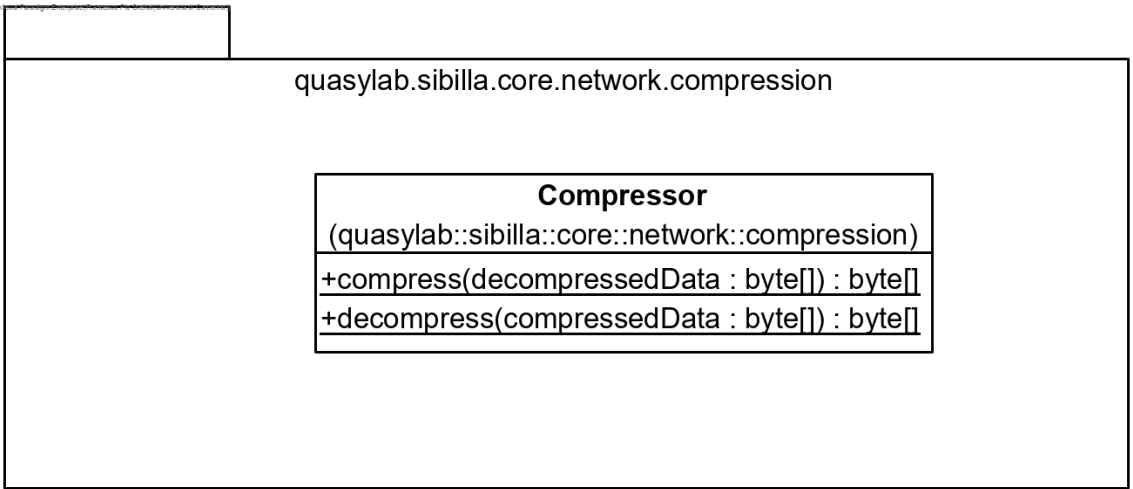


Figura 1.6: Diagramma delle classi del package `quasylab.sibilla.core.network.compression`

1.1.7 `quasylab.sibilla.core.network.serialization`

Contiene le classi di utilità che sono impiegate per la *serializzazione* e *deserializzazione* dei messaggi e dei dati all'interno del protocollo di comunicazione e per il *caricamento* a tempo d'esecuzione delle classi contenenti i modelli delle simulazioni da elaborare e gestire. Il funzionamento delle classi relative alla serializzazione si basa sulla libreria `org.apache.commons.lang3`.

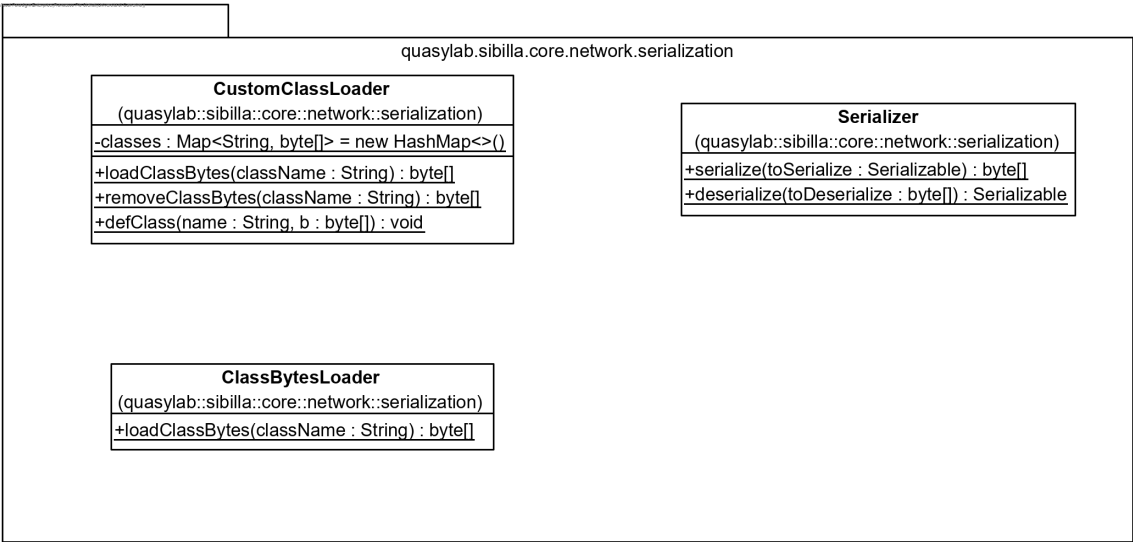


Figura 1.7: Diagramma delle classi del package `quasylab.sibilla.core.network.serialization`

1.1.8 `quasylab.sibilla.core.network.util`

Contiene varie classi di utilità che sono impiegate all'interno delle classi della libreria. Tra le funzionalità di tali classi rientrano il configurare e gestire i parametri per le comunicazioni in rete basate su *SSL* o *TLS*, l'ottenere informazioni utili relative alle *interfacce di rete* del dispositivo e

il configurare e gestire i *parametri di avvio* all'interno delle classi che decidono di implementare ed utilizzare le classi della libreria.

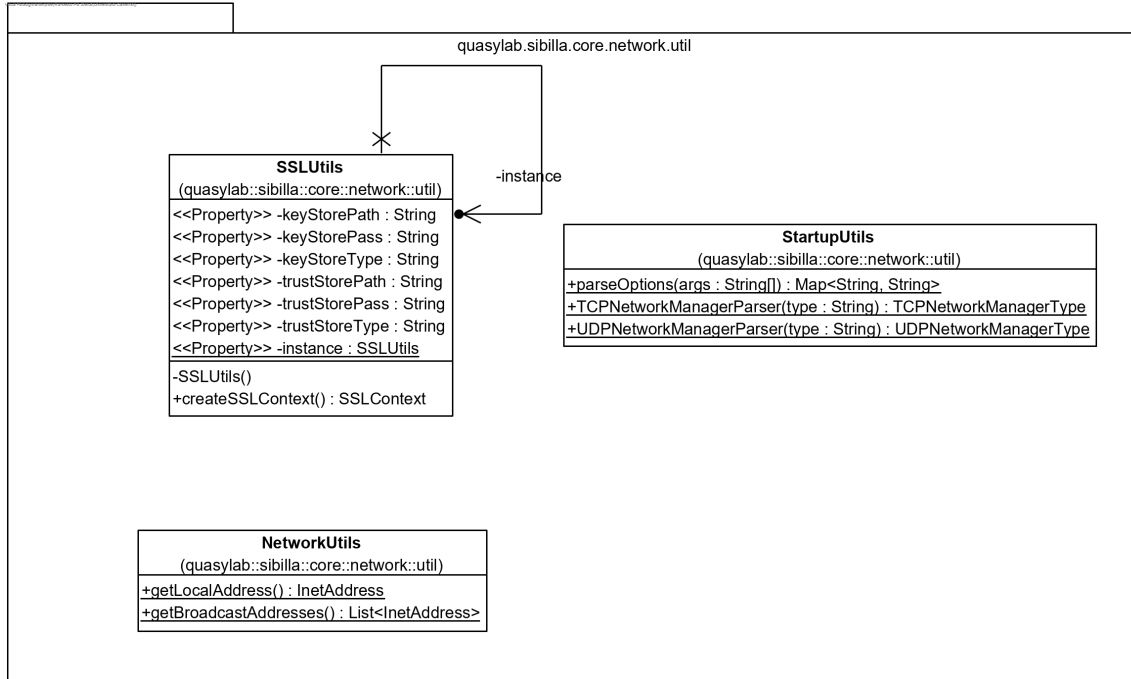


Figura 1.8: Diagramma delle classi del package `quasylab.sibilla.core.network.util`

1.2 Descrizione dell'infrastruttura

L'architettura alla base delle comunicazioni tra i vari nodi della libreria è di natura *Master/Slave*. Più specificatamente, le simulazioni da eseguire sono sottomesse da parte di un *Client* che si connette ad un *server Master* disponibile pubblicamente in rete, da cui vengono provengono anche i risultati delle simulazioni. All'interno della rete locale al Master sono quindi presenti i *server Slave* che rappresentano le unità di elaborazione delle simulazioni. Questi server non sono disponibili pubblicamente in rete e interagiscono con il Master per poter ricevere nuove simulazioni da eseguire e per poter restituire i risultati di tali simulazioni.

1.2.1 Client

La logica di funzionamento di un *Client* è contenuta interamente nella classe `ClientSimulationEnvironment`, le cui istanze devono essere incluse in tutte le classi di avvio di un Client. Nella definizione della classe di avvio di un Client è necessario includere l'istanziamento di un oggetto della classe `ModelDefinition`, rappresentante il modello della simulazione che verrà sottomesso per essere elaborato, e parametri relativi alla simulazione quali il numero delle repliche e la deadline.

Alla sua creazione, l'istanza di `clientSimulationEnvironment` cercherà di contattare tramite la rete un server Master utilizzando i parametri definiti all'avvio, quali porta, indirizzo IP e tipo di comunicazione basata su TCP. Durante questa fase vengono trasmessi al server Master i byte contenuti nel file compilato `.class` relativo alla classe che implementa `ModelDefinition`, istanziata all'avvio del Client. Il caricamento di queste informazioni nel server Master risulta fondamentale

per poter gestire correttamente i dati e i parametri relativi alla simulazione che sono trasmessi dal Client successivamente alla prima fase.

L'invio di questi dati coincide con la sottomissione effettiva della simulazione al server Master. Tutte le comunicazioni successive a questa fase riguardano la ricezione dei risultati da parte del server Master e la chiusura della comunicazione sia lato Client che lato server Master.

1.2.2 Server Master

La classe `MasterServerSimulationEnvironment` contiene tutta la logica di un *server Master*, qui vengono avviati i servizi che deve fornire un server Master, cioè il discovery dei server Slave remoti e la gestione delle simulazioni richieste dai *Client*. Inoltre i due servizi sono collegati e due oggetti `NetworkInfo` diversi, dove il primo è inerente alle informazioni di rete legate al servizio di discovery, mentre il secondo contiene le informazioni di rete legate al servizio di esecuzione delle simulazioni.

Il servizio di *discovery* dei server Slave remoti è gestito da due thread separati. Il primo si occupa del *broadcast* su *tutte le reti locali* connesse al server Master, per mezzo di un `UDPNetworkManager`, dell'oggetto `NetworkInfo` relativo alle informazioni di rete locali per il servizio di discovery. Il secondo thread si occupa invece di ascoltare in rete i messaggi inviati dai server Slave e di aggiornare la lista dei server Slave collegati di conseguenza.

Il servizio di gestione delle simulazioni si occupa invece di creare un nuovo `SimulationEnvironment` quando un *Client* richiede l'esecuzione di una simulazione che utilizza un nuovo `NetworkSimulationManager`, a cui viene passato in input un `SimulationState`. Il `SimulationState` in questione contiene tutti i dati necessari per eseguire il *bilanciamento* delle simulazioni tra i vari server Slave, tra cui un set di oggetti `SlaveState`, ognuno dei quali si riferisce ad uno dei server Slave connessi.

In particolare il *bilanciamento* delle simulazioni tra i vari server Slave viene eseguito all'interno della classe `NetworkSimulationManager`, che, in seguito all'esecuzione della prima *task* inviata ad un server Slave e delle successive, chiamerà il metodo `update` all'interno dello `SlaveState` corrispondente al server Slave che ha eseguito la task. All'interno di tale metodo, in base al numero di tasks eseguite ed al tempo impiegato, verranno aggiornati i parametri che stabiliscono il numero di task che il server Slave può eseguire (`expectedTasks`) e quelli che stabiliscono il timeout, cioè il tempo oltre il quale l'esecuzione di una task da parte di un server Slave può essere dichiarata fallita e si può effettuare la rischedulazione di tali task (`sampleRTT`, `estimatedRTT` e `devRTT`).

Più in dettaglio, l'algoritmo utilizzato per il bilanciamento delle task è molto simile a quello per il *controllo della congestione in TCP*. Abbiamo infatti un incremento esponenziale del numero di task eseguibili dai server Slave, dove, in seguito ad un eventuale *timeout*, il numero dei task eseguibili viene dimezzato. L'unica differenza è la presenza di una *soglia* fissa, oltre la quale il numero dei task eseguibili non viene più duplicato, ma viene incrementato di una unità, tale *soglia* è infatti calcolata dinamicamente nel caso di TCP. Il tempo di *timeout* viene calcolato invece in base a parametri calcolati dal *Round Trip Time* tra l'invio del task da parte del server Master e la ricezione dei risultati da parte del server Slave (`estimatedRTT` e `devRTT`).

1.2.3 Server Slave

La classe alla base del funzionamento di un *server Slave* è `DiscoverableBasicSimulationServer`, estensione della classe `BasicSimulationServer`. La classe `BasicSimulationServer` è stata rivista per poter implementare il nuovo protocollo di comunicazione con i server Master ma la logica è rimasta la medesima: le istanze di tale classe sono infatti forniti di due istanze di `ExecutorService` basati su `CachedThreadPool` per poter gestire, rispettivamente, le connessioni in ingresso da parte di server Master e per gestire in maniera efficiente i task di simulazione sottomessi sfruttando le capacità di *multithreading* del server Slave. Nella corrente implementazione di `BasicSimulationServer` è inoltre presente la gestione della comunicazione con i server Master per poter ricevere da questi e caricare in memoria i byte dei file `.class` associati alle simulazioni da eseguire e, successivamente,

anche i parametri e i dati di tali simulazioni, oltre che per poter inviare ai server Master i risultati delle simulazioni richieste una volta che la loro esecuzione è terminata. Tra le funzionalità presenti nella classe si annoverano anche la possibilità di chiudere la connessione con i server Master che lo richiedono, nel caso ideale dopo aver ricevuto i risultati delle simulazioni sottomesse, e di rispondere ai messaggi di ping che i server Master potrebbero inviare in caso sia stato rilevato un timeout.

Il comportamento aggiuntivo introdotto tramite la classe `DiscoverableBasicSimulationServer` si focalizza sulla possibilità per un server Slave di essere individuato nella propria rete locale da tutti i server Master presenti all'interno della medesima rete. Ogni server Slave riceve infatti periodicamente *messaggi di discovery* inviati in modalità broadcast dai server Master presenti, che contengono l'oggetto `NetworkInfo` con le informazioni riguardo l'*indirizzo IP*, la *porta* e l'`UPDNetworkManagerType` usati per il discovery da parte del server Master. Lo Slave risponde a tali messaggi inviando l'oggetto `NetworkInfo` contenente le informazioni di rete del server che eseguirà le simulazioni. In questo modo il singolo server Slave permette di risultare visibile ai server Master che, alla successiva interazione da parte di Client, lo contatteranno per poter sottomettere nuove simulazioni. Nell'attuale implementazione, i server Slave rispondono ad ogni messaggio di broadcast inviato dai server Master presenti nella loro rete. Non conoscendo a priori lo stato del server Master e quali server Slave sono già stati individuati tale implementazione permette agli Slave di essere sempre visibili per poter ricevere nuove simulazioni da eseguire.

1.3 Protocollo di comunicazione

I tre componenti dell'infrastruttura comunicano tra di loro tramite l'invio di pacchetti sulla rete, utilizzando un protocollo di comunicazione personalizzato. I messaggi sono di due possibili tipi: *comandi* o *dati*. I comandi sono dei messaggi che danno indicazioni agli altri componenti riguardo i dati che verranno inviati e riguardo alle particolari azioni da eseguire, mentre i dati sono le informazioni che vengono utilizzate per eseguire le azioni richieste dai comandi. In generale entrambi i tipi di messaggi sono composti da degli oggetti Java serializzati ed inviati sulla rete.

1.3.1 Comandi scambiati

1.3.1.1 Client

INIT	Indica l'inizio di una connessione con un server Master, è seguito dall'invio del nome della classe <code>ModelDefinition</code> da simulare e dai corrispondenti class bytes
DATA	Indica l'invio dei dati ad un server Master della simulazione da eseguire, è seguito dall'invio del <code>SimulationDataSet</code> da simulare
PING	Invia una ping request ad un server
CLOSE_CONNECTION	Indica la chiusura della connessione con l'host remoto, è seguito dall'invio del nome della classe <code>ModelDefinition</code> usata per le simulazioni che verrà eliminata dai server

Tabella 1.1: Comandi disponibili per i Client

1.3.1.2 Server Master

INIT	Indica l'inizio di una connessione con un server Slave, è seguito dall'invio del nome della classe <code>ModelDefinition</code> da simulare e dai corrispondenti class bytes
PING	Invia una ping request ad un server
TASK	Indica l'invio di un task di simulazione ad un server Slave, è seguita dall'invio del <code>NetworkTask</code> che verrà eseguito dal server Slave
RESULTS	Indica l'invio dei risultati di una simulazione eseguita al Client, è seguita dall'invio dell'oggetto <code>SamplingFunction</code> che contiene i risultati di tale simulazione
PONG	Risposta ad una ping request inviata da un altro host
INIT_RESPONSE	Indica il ricevimento del comando INIT da parte di un Client
DATA_RESPONSE	Indica il ricevimento del comando DATA da parte di un Client
CLOSE_CONNECTION	Indica il ricevimento del comando <code>CLOSE_CONNECTION</code> da parte di un Client e chiude a sua volta la connessione con l'host remoto, inoltre è inviato ai server Slave per indicare la chiusura della connessione, in questo caso è seguito dall'invio del nome della classe <code>ModelDefinition</code> usata per le simulazioni che verrà eliminata dai server

Tabella 1.2: Comandi disponibili per i server Master

1.3.1.3 Server Slave

PONG	Risposta ad una ping request inviata da un altro host
INIT_RESPONSE	Indica il ricevimento del comando INIT da parte di un server Master
CLOSE_CONNECTION	Indica il ricevimento del comando <code>CLOSE_CONNECTION</code> da parte di un server Master e chiude a sua volta la connessione con l'host remoto

Tabella 1.3: Comandi disponibili per i server Slave

1.3.2 Trasporto delle informazioni

Il trasporto dei messaggi da un nodo all'altro dell'infrastruttura è reso possibile tramite le classi che estendono le interfacce `TCPNetworkManager` e `UDPNetworkManager`, entrambi presenti nel package `quasylab.sibilla.core.network.communication` e rappresentanti canali di comunicazione basati sui protocolli del livello di trasporto *TCP* e *UDP*. Gli unici metodi implementati all'interno delle interfacce sono *factory methods* che restituiscono istanze di classi implementazioni a seconda del valore dei parametri passati come argomento. Nello specifico, uno dei metodi richiede come argomento un'istanza di `NetworkInfo`, contenente i valori di porta e indirizzo logico del nodo che si vuole contattare assieme al valore di `NetworkManagerType` specifico del canale di comunicazione che si vuole impiegare, mentre l'altro metodo presente richiede, rispettivamente in `TCPNetworkManager` e `UDPNetworkManager`, un valore di `TCPNetworkManagerType` assieme ad un'istanza di `Socket` su cui basare la comunicazione ed un valore di `UDPNetworkManagerType` assieme ad un'istanza di `DatagramSocket`.

1.3.2.1 TCPNetworkManager e l'impiego di TLS

I metodi di interfaccia sono basilari e si limitano all'invio e ricezione di informazioni sotto forma di `byte[]`, al recupero dell'istanza di `Socket` su cui è basata la comunicazione tramite *TCP*, alla chiusura della connessione e all'ottenimento di un'istanza di `NetworkInfo` contenente porta e indirizzo

logico relativi all'altro nodo a cui si è connessi e il valore di `TCPNetworkManagerType` associato alla particolare implementazione dell'interfaccia.

`TCPDefaultNetworkManager` e `TCPSecureNetworkManager` sono le classi presenti nella libreria volte a implementare `TCPNetworkManager` e rappresentate tramite i valori `DEFAULT` e `SECURE` all'interno della classe enumerazione `TCPNetworkManagerType`.

Entrambe le classi basano il loro funzionamento su istanze di `InputStream` e `OutputStream` ottenute a partire dall'istanza di `Socket` generata a partire dalla porta e indirizzo logico del nodo dall'altra parte della comunicazione.

La classe `TCPSecureNetworkManager`, oltre ad offrire lo stesso sistema di comunicazione basato su TCP di `TCPDefaultNetworkManager`, sfrutta anche il protocollo *TLS 1.2* per fornire maggiore sicurezza alla comunicazione di rete. TLS 1.2 è la penultima versione del protocollo di sicurezza TLS, successore di *SSL* e indirizzato a garantire il *criptaggio* delle informazioni trasmesse, l'*autenticazione* dei due nodi tra cui tale comunicazione avviene e l'*integrità* dei dati trasmessi. L'avvio di una comunicazione TLS si basa sull'*handshake* tra i due nodi per poter stabilire la suite di algoritmi da impiegare e permettere ai due nodi di procedere con l'autenticazione. Nello specifico caso dell'implementazione adottata per lo sviluppo della libreria in esame si è deciso di optare per un'autenticazione a due vie, nella quale ognuno dei due nodi coinvolto nella comunicazione procede con l'autenticazione dell'altro nodo tramite il suo certificato verificato.

Per poter ricreare totalmente una comunicazione sicura tramite TLS, per ognuno dei tre tipi di nodi alla base dell'architettura sono stati generati un *keystore* contenente una chiave pubblica ad identificazione del singolo nodo ed un *truststore* contenente le chiavi pubbliche degli altri nodi coinvolti nelle comunicazioni su rete. La gestione di tali store di chiavi è delegata alla classe di utilità `SSLUtils`, con la quale è necessario interagire per poter impiegare `TCPSecureNetworkManager` nel caso la si scelga come classe per le comunicazioni tra i nodi. Negli esempi di avvio delle classi della libreria allegati a quest'ultima sono presenti anche i file `.jks` relativi ai keystore e ai truststore generati durante il lavoro sulla libreria, grazie ai quali è possibile impiegare sin da subito una comunicazione sicura e affidabile tra i vari nodi senza ulteriori operazioni da parte dell'utente.

Le classi implementazione di `TCPNetworkManager` vengono impiegate nella libreria per tutte le comunicazioni tra i nodi dell'architettura che non siano relative al discovery di nuovi server Slave.

1.3.2.2 UDPNetworkManager

I metodi di interfaccia si concentrano sull'invio e ricezione di informazioni sotto forma di `byte[]` e alla chiusura della connessione.

L'unica implementazione di tale interfaccia presente nella libreria sviluppata è `UDPDefaultNetworkManager` e si basa sull'uso di `DatagramSocket` per poter fornire una comunicazione basilare basata su *UDP*. Non sono presenti implementazioni che sfruttino TLS in quanto UDP è, per sua natura, un protocollo non orientato alla connessione e non può pertanto garantire sicurezza e affidabilità delle trasmissioni su rete allo stesso livello di un protocollo orientato alla connessione come TCP.

Le classi implementazione di `UDPNetworkManager` vengono impiegate nella libreria per lo scambio delle comunicazioni di discovery tra server Master e server Slave.

1.3.3 Ulteriori funzionalità

1.3.3.1 Serializzazione

Per agevolare l'invio dei comandi e dei dati in rete è stato implementato un meccanismo di *serializzazione* per tradurre gli oggetti Java in `byte[]`, poi verranno inviati in rete tramite le istanze di `TCPNetworkManager` e `UDPNetworkManager`. L'implementazione di tale tipo di serializzazione è stato effettuato tramite la classe `Serializer`, presente nel package `quasylab.sibilla.core.network.serialization`, basandosi sulla classe

`org.apache.commons.lang3.SerializationUtils`. L'unico requisito necessario affinché un oggetto Java possa venire serializzato è che quest'ultimo implementi l'interfaccia `Serializable`.

1.3.3.2 Compressione

Inoltre è stato introdotto un meccanismo di *compressione*, contenuto all'interno del pacchetto `quasylab.sibilla.core.network.compression`. In particolare nella classe `Compressor` sono presenti due metodi statici, uno per comprimere e l'altro per decomprimere dei dati. Entrambi i metodi prendono in input un `byte[]` e restituiscono un `byte[]`, in modo da restituire dei dati pronti per essere inviati in rete per mezzo di istanze di `TCPNetworkManager` o di `UDPNetworkManager`. Al fine di eseguire la *compressione* dei dati sono state utilizzate le classi `GZIPOutputStream` e `GZIPInputStream`, contenute all'interno del package `java.util.zip`.

Questo meccanismo è utilizzato nell'invio e nella ricezione degli oggetti `ComputationResult` scambiati tra server Slave e Master, che contengono i risultati delle simulazioni eseguite dai server Slave. In questo modo otteniamo una *diminuzione nel tempo di invio* dei risultati delle simulazioni ed una *diminuzione del traffico* sulla rete, in quanto vengono inviati meno dati in rete.

1.3.3.3 Caricamento del modello di simulazione a tempo d'esecuzione

Per poter sottomettere correttamente una simulazione è necessario che l'host richiedente, sia esso un Client o un master Server, carichi su rete il modello associato alla simulazione da effettuare, altrimenti non potrebbero essere eseguite le `lambda expressions` contenute all'interno della definizione dei modelli da simulare. Tale modello è da definire tramite un'istanza di una classe che implementa `ModelDefinition`. Durante la sottomissione di una simulazione viene trasmesso su rete il `byte[]` associato al file `.class` di tale classe definizione del modello di simulazione ed il nome qualificato associato. Per poter estrarre il `byte[]` dal file `.class` caricato nella memoria dell'host che sottomette la simulazione viene impiegato il metodo `loadClassBytes` della classe `ClassBytesLoader`, contenuta nel package `quasylab.sibilla.core.network.serialization`. Tale `byte[]` è già pronto per essere trasmesso in rete tramite `TCPNetworkManager` o `UDPNetworkManager`.

L'host al quale è sottomessa la simulazione, per poter effettivamente svolgere quest'ultima, ha bisogno che la classe personalizzata di `ModelDefinition` associata venga caricata in memoria a partire dal `byte[]` ricevuto. Per poter effettuare tale caricamento ci si affida al metodo `defClass` di `CustomClassLoader`, classe anch'essa presente nel package `quasylab.sibilla.core.network.serialization`.

Tale metodo carica in memoria i dati relativi ad una classe a partire dal `byte[]` contenente i byte del file `.class` di tale classe Java e dal suo nome qualificato. In aggiunta viene anche popolata una struttura dati che permetta di poter recuperare successivamente tali `byte[]` a partire dal relativo nome qualificato. Tale struttura dati risulta fondamentale per poter recuperare successivamente i `byte[]` associati alle classi caricate in memoria tramite il metodo `defClass` in quanto il file `.class` di partenza non viene rigenerato. Il metodo impiegato per poter accedere alla struttura dati citata è `loadClassBytes` e richiede in input il nome qualificato della classe di cui si vuole ottenere il `byte[]`. Un esempio di impiego di quest'ultimo metodo è presente nel funzionamento di un master Server, che carica in memoria il `byte[]` ricevuto da un Client durante la sottomissione di una simulazione e che ha necessità di ritrasmettere tale array ai server Slave selezionati per poter effettuare le operazioni di simulazione. Tale meccanismo è fondamentale in quanto il server Master non ha accesso al file `.class` associato all'istanza di `ModelDefinition` ricevuta dal Client.

All'interno di `CustomClassLoader`, oltre a `loadClassBytes`, è presente il metodo `removeClassBytes`, che permette di eliminare dalla struttura dati citata i dati dei modelli di simulazione ricevuti a partire dal relativo nome qualificato. Questo metodo di rimozione viene chiamato da parte di `MasterServerSimulationEnvironment`, nel caso di un server Master, e `BasicSimulationServer`, nel caso di un server Slave, tutte le volte che ricevono, rispettivamente da parte di un Client e di un server Master, una richiesta di chiusura della connessione. Come

definito nel protocollo di comunicazione, a tale richiesta è quindi associato il nome qualificato della classe rappresentante il modello di simulazione inviato all'apertura della connessione.

1.4 Avvio degli esempi di applicazione

I requisiti di avvio della libreria, e conseguentemente anche degli esempi proposti, sono relativi alla presenza di *Gradle* e del *JDK Java* in versione *11 o superiore*. I tre esempi di avvio di un Client, di un server Master e di un server Slave allegati alla libreria grazie al package `quasylab.sibilla.examples.servers` possono essere eseguiti singolarmente in due modalità: tramite l'utilizzo dei relativi *Gradle wrapper* oppure tramite gli *script* per la bash forniti. In particolare all'interno del package Gradle `quasylab.sibilla.examples.servers` i tre esempi sono disposti all'interno di tre cartelle diverse, ognuna delle quali contiene un file `build.gradle` e lo script in bash corrispondente.

Gli esempi di applicazione delle classi della libreria possono essere avviati tramite Gradle una volta clonata la repository del progetto da GitHub¹ ed eseguendo il comando `gradle run` all'interno della cartella corrispondente al componente che si desidera avviare. Nel caso si vogliano impostare dei parametri di avvio si deve aggiungere al comando di gradle il parametro `--args="[arguments]"`, dove `[arguments]` rappresenta appunto i parametri da impostare.

Il progetto può essere avviato anche tramite gli script per bash appositi, presenti nelle cartelle di avvio d'esempio del progetto. Gli script sono disponibili nella repository ufficiale del progetto e consentono ad un avvio automatico degli esempi forniti con le librerie. Nello specifico, agli script è demandato il compito di effettuare un clone locale dei file presenti nella repository e di avviare il progetto Gradle associato al particolare nodo che si intende inizializzare tramite i parametri specificati all'avvio. Per impostare dei parametri di avvio è necessario aggiungere il comando `"[arguments]"` dopo il percorso dello script d'avvio interessato, dove `[arguments]` rappresenta appunto i parametri da impostare.

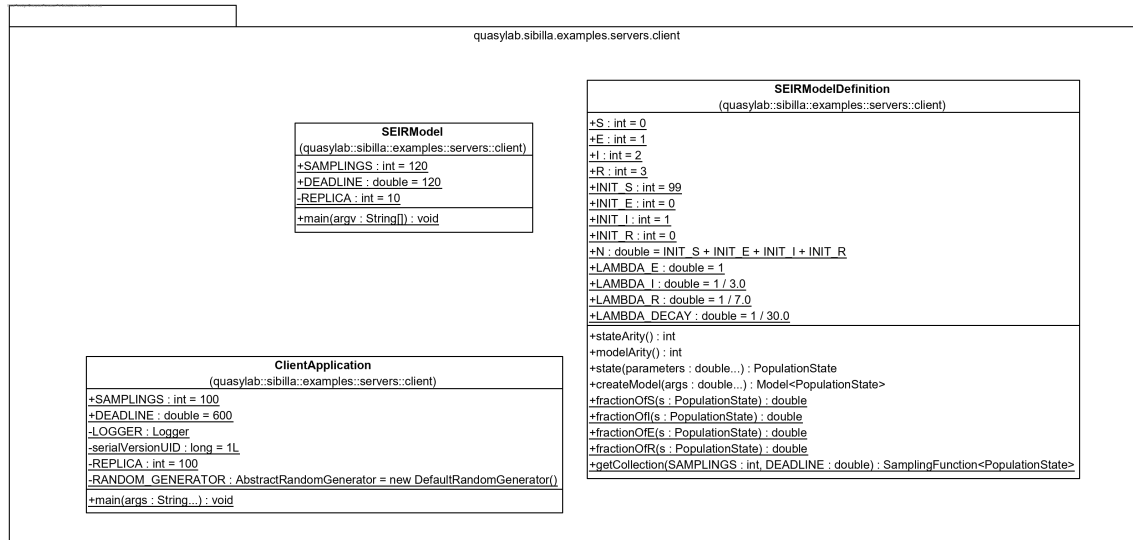
1.4.1 Classi d'esempio e parametri per l'avvio

Ogni componente del progetto permette di impostare dei parametri di avvio, visualizzabili anche eseguendo lo script in bash passando come parametro `-h`.

1.4.1.1 `quasylab.sibilla.examples.servers.client`

L'inizializzazione di un nuovo Client è demandata alla classe `ClientApplication`, all'interno della quale viene inizializzata un'istanza di `ClientSimulationEnvironment` e vengono trattati i parametri di avvio specificati. Oltre alla specifica classe di avvio sono presenti anche le classi `SeirModel` e `SeirModelDefinition`, mirate a definire un modello di simulazione da poter sottomettere al server Master che verrà contattato dal Client. In aggiunta, nella cartella *resources* sono presenti i file `clientKeyStore.jks` e `clientTrustStore.jks`, relativi rispettivamente al keystore di chiavi private e al truststore delle chiavi pubbliche fidate associate al Client che si intende avviare. Tali file sono caricati dinamicamente da Gradle e consentono di impostare correttamente una connessione sicura tramite TLS, quando richiesta dall'utente all'avvio, senza ulteriori configurazioni.

¹<https://github.com/quasylab/sibilla/tree/working>

Figura 1.9: Diagramma delle classi del package `quasylab.sibilla.examples.servers.client`

<code>-keyStoreType</code>	Il formato del keyStore per la connessione TLS
<code>-keyStorePath</code>	Il path del keyStore per la connessione TLS
<code>-keyStorePass</code>	La password del keystore per la connessione TLS
<code>-trustStoreType</code>	Il formato del trustStore per la connessione TLS
<code>-trustStorePath</code>	Il path del trustStore per la connessione TLS
<code>-trustStorePass</code>	La password del trustStore per la connessione TLS
<code>-masterAddress</code>	L'indirizzo del server Master
<code>-masterPort</code>	La porta su cui contattare il server Master
<code>-masterCommunicationType</code>	Il tipo di comunicazione utilizzata per comunicare con il server Master [DEFAULT/SECURE]

Tabella 1.4: Parametri di avvio nel Client d'esempio

1.4.1.2 `quasylab.sibilla.examples.servers.master`

L'inizializzazione di un nuovo server Master è demandata alla classe `MasterApplication`, all'interno della quale viene inizializzata un'istanza di `MasterServerSimulationEnvironment` e vengono trattati i parametri di avvio specificati. Oltre alla specifica classe di avvio sono presenti anche le classi `WebConfig`, `MasterController` e `MonitoringServerComponent`, mirate alla creazione e alla gestione di un server web tramite il quale fornire dei dati di monitoraggio utile grazie a delle *Rest API*. L'unica chiamata API presente al momento risponde alla porta `8080` della macchina su cui è inizializzato il server Master e all'indirizzo `/master/state`. Tale chiamata fornisce una rappresentazione in formato `JSON` dell'istanza della classe `MasterState` associata al server Master in esecuzione. La piccola implementazione del sistema di monitoraggio tramite chiamate web alle API grazie al framework *Spring* e alle relative librerie `org.springframework`. In aggiunta, nella cartella `resources` sono presenti i file `masterKeyStore.jks` e `masterTrustStore.jks`, relativi rispettivamente al keystore di chiavi private e al truststore delle chiavi pubbliche fidate associate al server Master che si intende avviare. Tali file sono caricati dinamicamente da Gradle e consentono di impostare correttamente una connessione sicura tramite TLS, quando richiesta dall'utente all'avvio, senza ulteriori configurazioni.

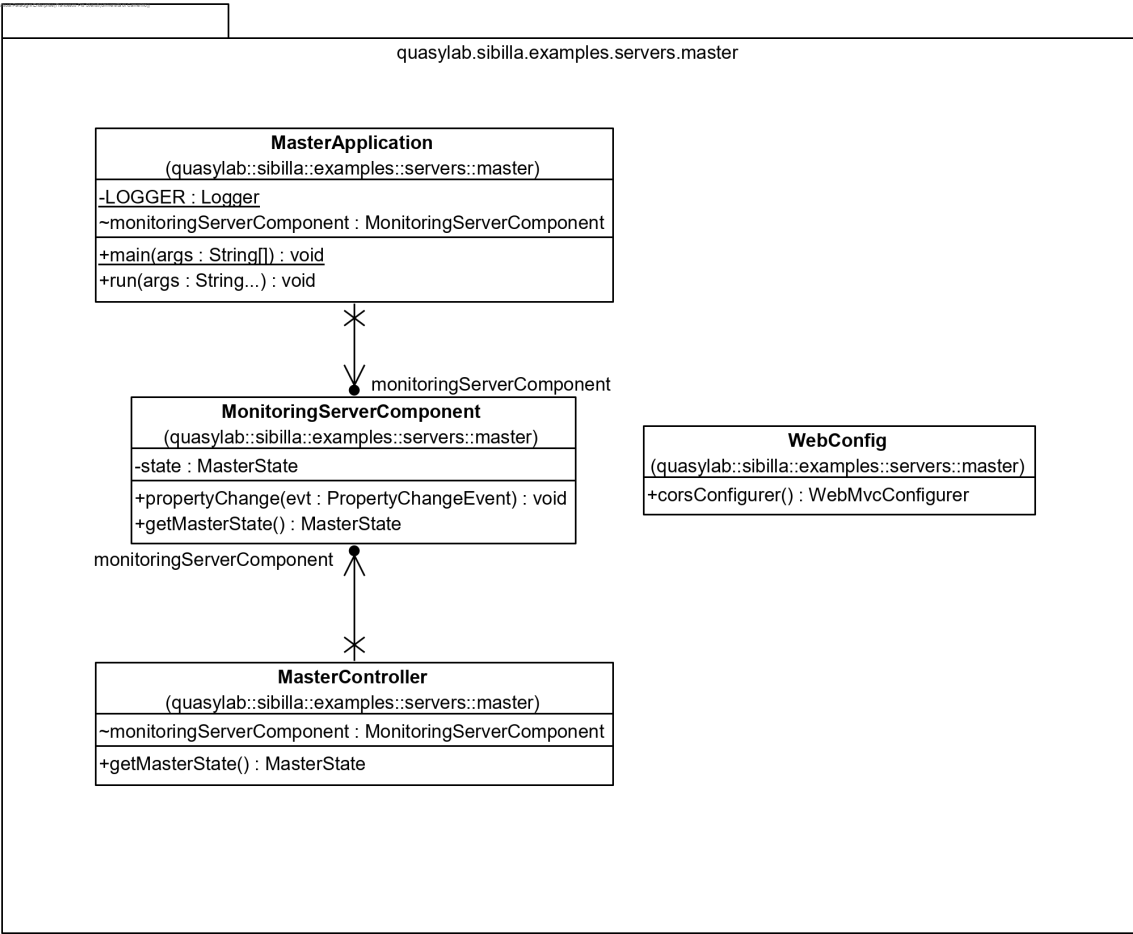


Figura 1.10: Diagramma delle classi del package `quasylab.sibilla.examples.servers.master`

<code>-keyStoreType</code>	Il formato del keyStore per la connessione TLS
<code>-keyStorePath</code>	Il path del keyStore per la connessione SSL
<code>-keyStorePass</code>	La password del keystore per la connessione TLS
<code>-trustStoreType</code>	Il formato del trustStore per la connessione TLS
<code>-trustStorePath</code>	Il path del trustStore per la connessione TLS
<code>-trustStorePass</code>	La password del trustStore per la connessione TLS
<code>-masterDiscoveryPort</code>	La porta locale utilizzata per il discovery dei server Slave
<code>-slaveDiscoveryPort</code>	La porta remota utilizzata per il discovery dei server Slave
<code>-masterSimulationPort</code>	La porta locale utilizzata per gestire le simulazioni
<code>-slaveDiscoveryCommunicationType</code>	Il tipo di comunicazione UDP utilizzata per il discovery dei server Slave [DEFAULT]
<code>-clientSimulationCommunicationType</code>	Il tipo di comunicazione TCP utilizzata per gestire le simulazioni tramite i server Slave [DEFAULT/SECURE]

Tabella 1.5: Parametri di avvio nel server Master d’esempio

1.4.1.3 quasylib.sibilla.examples.servers.slave

L’inizializzazione di un nuovo server Slave è demandata alla classe `SlaveApplication`, all’interno della quale viene inizializzata un’istanza di `DiscoverableBasicSimulationServer` e vengono trattati i parametri di avvio specificati. In aggiunta, nella cartella *resources* sono presenti i file `slaveKeyStore.jks` e `slaveTrustStore.jks`, relativi rispettivamente al keystore di chiavi private e al truststore delle chiavi pubbliche fidate associate allo server Slave che si intende avviare. Tali file sono caricati dinamicamente da Gradle e consentono di impostare correttamente una connessione sicura tramite TLS, quando richiesta dall’utente all’avvio, senza ulteriori configurazioni.

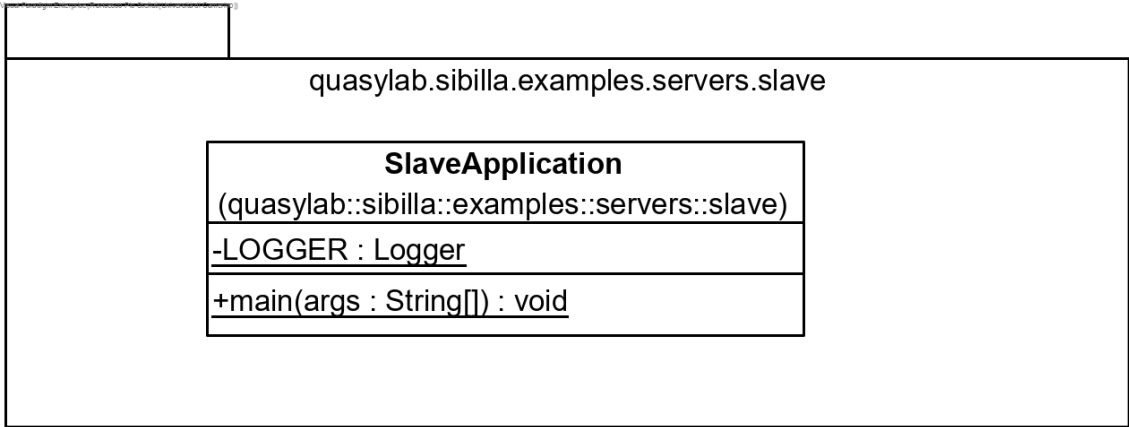


Figura 1.11: Diagramma delle classi del package `quasylib.sibilla.examples.servers.slave`

<code>-keyStoreType</code>	Il formato del keyStore per la connessione TLS
<code>-keyStorePath</code>	Il path del keyStore per la connessione TLS
<code>-keyStorePass</code>	La password del keystore per la connessione TLS
<code>-trustStoreType</code>	Il formato del trustStore per la connessione TLS
<code>-trustStorePath</code>	Il path del trustStore per la connessione TLS
<code>-trustStorePass</code>	La password del trustStore per la connessione TLS
<code>-slaveDiscoveryPort</code>	La porta locale utilizzata per il discovery da parte del server Master
<code>-slaveSimulationPort</code>	La porta locale utilizzata per gestire le simulazioni
<code>-masterDiscoveryCommunicationType</code>	Il tipo di comunicazione UDP utilizzata per il discovery da parte dei server Master [DEFAULT]
<code>-masterSimulationCommunicationType</code>	Il tipo di comunicazione TCP utilizzata per gestire le simulazioni col server Master [DEFAULT/SECURE]

Tabella 1.6: Parametri di avvio nel server Slave d’esempio

1.5 Interfaccia di monitoraggio

Durante lo sviluppo del progetto è stato sviluppato in parallelo un semplice *sistema di monitoring* informazioni riguardo le simulazioni eseguite ed i server Slave collegati. In particolare è stato utilizzato il linguaggio *TypeScript*, con il framework *Angular*. Vengono utilizzati i dati forniti dalla *REST API* implementata all’interno dell’esempio di avvio del progetto del server Master.

Il codice del frontend è contenuto all'interno di una apposita repository di GitHub². Per avviare il progetto bisogna eseguire il *clone della repository* ed eseguire il comando `ng serve` all'interno della cartella di root del progetto. Il frontend richiede che *node.js* e il pacchetto npm *@angular-cli* siano installati nel sistema.

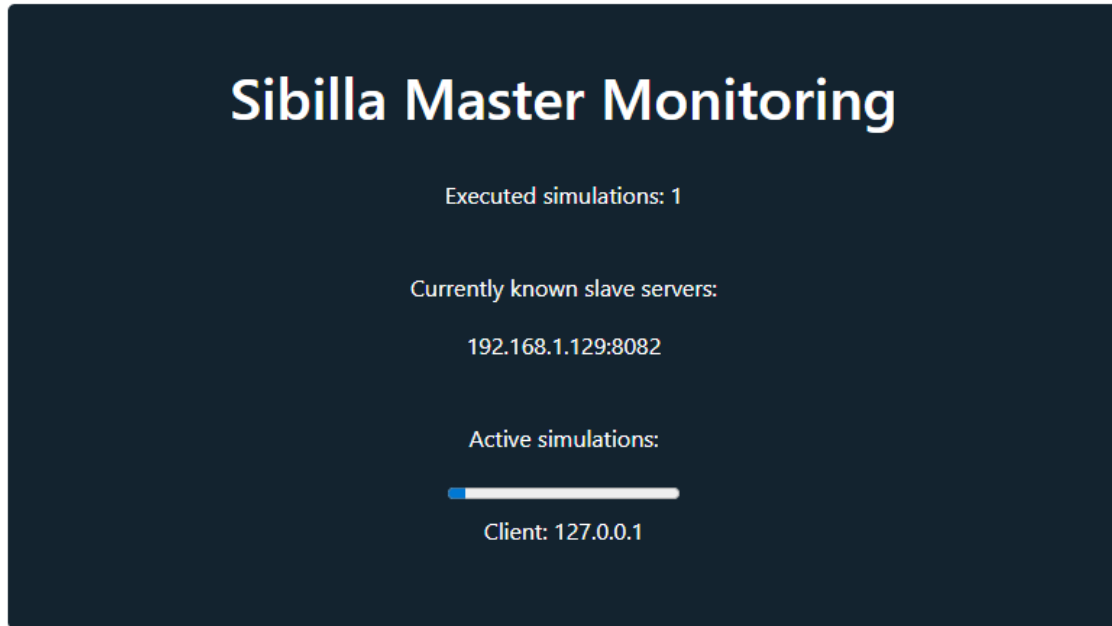


Figura 1.12: Una schermata del frontend che monitora un Master server

1.6 Logging delle attività

All'interno del package di base della libreria è presente la classe *singleton* `HostLoggerSupplier`, la cui istanza di `Logger` è stata impiegata sia all'interno delle classi della libreria che nelle classi d'avvio d'esempio allegate al progetto. Tale istanza fornisce agli utenti una traccia sulle attività, siano esse di comunicazione, di gestione o di simulazione, svolte dagli applicativi riferiti ai nodi dell'architettura e notifica su tutti i possibili errori sollevati a tempo d'esecuzione.

Il sistema di logging comunica con l'utente tramite la console e tramite dei file in formato `.log` che vengono generati all'interno della directory da cui vengono eseguiti gli applicativi costruiti sfruttando la libreria sviluppata.

²<https://github.com/ZamponiMarco/sibilla-frontend>

```

INFO: Starting the Master Server with the params:
-keyStoreType: [JKS]
-keyStorePath: [clientKeyStore.jks]
-trustStoreType: [JKS]
-trustStorePath: [clientTrustStore.jks]
-masterAddress: []
-masterPort: [10001]
-masterCommunicationType: [SECURE]
mag 27, 2020 9:33:26 PM quasylab.sibilla.core.network.communication.TCPSecureNetworkManager buildWithSocket
INFO: SSLSession Started:
  Protocol : TLSv1.2
  Cipher suite : TLS_DHE_DSS_WITH_AES_256_GCM_SHA384
  Peer host : localhost CN=Master Server,OU=Sibilla,O=Unicam,L=Camerino,ST=Italy,C=IT
mag 27, 2020 9:33:26 PM quasylab.sibilla.core.network.client.ClientSimulationEnvironment <init>
INFO: Starting a new client that will submit the simulation to the master: { IP: [localhost] - Port: [10001] - Communication type: [class quasylab.sibilla.core.network.communication.TCPNetworkManagerType - SECURE] }
mag 27, 2020 9:33:26 PM quasylab.sibilla.core.network.client.ClientSimulationEnvironment initConnection
INFO: Loading [quasylab.sibilla.examples.servers.client.SEIRModelDefinition] class bytes to be transmitted over network
mag 27, 2020 9:33:26 PM quasylab.sibilla.core.network.client.ClientSimulationEnvironment initConnection
INFO: [INIT] command sent to the master: { IP: [localhost] - Port: [10001] - Communication type: [class quasylab.sibilla.core.network.communication.TCPNetworkManagerType - SECURE] }
mag 27, 2020 9:33:26 PM quasylab.sibilla.core.network.client.ClientSimulationEnvironment initConnection
INFO: [quasylab.sibilla.examples.servers.client.SEIRModelDefinition] Model name has been sent to the master: { IP: [localhost] - Port: [10001] - Communication type: [class quasylab.sibilla.core.network.communication.TCPNetworkManagerType - SECURE] }
mag 27, 2020 9:33:26 PM quasylab.sibilla.core.network.client.ClientSimulationEnvironment initConnection
INFO: Class bytes have been sent to the master: { IP: [localhost] - Port: [10001] - Communication type: [class quasylab.sibilla.core.network.communication.TCPNetworkManagerType - SECURE] }
mag 27, 2020 9:33:26 PM quasylab.sibilla.core.network.client.ClientSimulationEnvironment initConnection
INFO: Answer received: [INIT_RESPONSE] - Master: { IP: [localhost] - Port: [10001] - Communication type: [class quasylab.sibilla.core.network.communication.TCPNetworkManagerType - SECURE] }
mag 27, 2020 9:33:26 PM quasylab.sibilla.core.network.client.ClientSimulationEnvironment sendSimulationInfo

```

Figura 1.13: Il log presente in un terminale in cui è stato avviato l'eseguibile del package `quasylab.sibilla.examples.servers.client`

1.7 Documentazione del codice

Il codice della libreria sviluppata è stato documentato tramite *JavaDoc*. A partire dai commenti JavaDoc scritti, la generazione dell'intera documentazione del progetto è stata affidata a *Doxygen*³, tool *standard de facto* per la generazione della documentazione per progetti scritti in molteplici linguaggi di programmazione, tra cui Java. All'interno della cartella root del repository GitHub della libreria Sibilla sono presenti due file che permettono una generazione agevole della documentazione tramite il tool citato. Il primo, `doxygenConfig`, è il file di configurazione sul quale si poggia Doxygen mentre il secondo, `documentation.sh`, è uno script per la bash Unix che avvia Doxygen generando documentazione in formato `.html` e `.pdf` all'interno della cartella `/docs`.

Lo script in bash richiede che Doxygen sia installato nel sistema assieme alle sue dipendenze. Un'alternativa alla generazione della documentazione del codice, indirizzata agli utenti Windows e MacOS, risiede in *DoxyWizard*⁴, frontend che permette di eseguire il tool Doxygen sfruttando il file di configurazione incluso nel progetto e di ottenere il medesimo tipo di documentazione che si otterrebbe tramite la bash Unix.

Per i fini di presentazione della libreria sviluppata, all'interno del repository GitHub di riferimento è possibile trovare una cartella `/docs` all'interno della quale è già presente tutta la documentazione generata a partire dai JavaDoc, sia in formato `.html` che `.pdf`.

³<https://www.doxygen.nl/index.html>

⁴https://www.doxygen.nl/manual/doxywizard_usage.html

Capitolo 2

Conclusioni

La libreria sviluppata ha permesso di regolamentare e coordinare sistematicamente la sottomissione e l'esecuzione, con relativo ottenimento dei risultati, di simulazioni in rete. Inoltre, come gli esempi proposti hanno dimostrato, le classi proposte per poter inizializzare nuovi Client, server Master e server Slave risultano essere di natura *plug and play*, agevolando ulteriormente l'utilizzo e la diffusione del framework originale *Sibilla*.

2.1 Dispositivi su cui è stata testata la libreria

Il corretto funzionamento della libreria è stato comprovato dallo studio dei file di log derivati dall'esecuzione delle classi di avvio su un ampio range di dispositivi. In tutti i dispositivi impiegati sono stati installati *Gradle* e un *Java JDK* in versione *11 o superiore*. Nello specifico, durante lo sviluppo, l'interesse si è concentrato sull'hardware fornito dai dispositivi che sono stati utilizzati come server Master e come server Slave, fondamentale per poter comprendere la natura *plug and play* della libreria e per poter studiare i vantaggi computazionali derivanti dall'utilizzo dell'architettura distribuita rispetto a quella locale presente nel framework originale. Tra i dispositivi impiegati per lo sviluppo e il testing della libreria figurano:

- Laptop, con CPU *Intel Core i7-7700HQ* (4 Core a 2,80 GHz con turbo massimo a 3,80 GHz e 8 thread), RAM da *16 GB* e OS *Ubuntu* eseguito tramite *Windows Subsystem for Linux* su base *Windows 10*.
- Laptop, con CPU *Intel Core i7-7700HQ* (4 Core a 2,80 GHz con turbo massimo a 3,80 GHz e 8 thread), RAM da *16 GB* e OS *Windows 10*.
- Desktop, con CPU *Intel Core i5-3570K* (4 core a 3,40 GHz con turbo massimo a 3,80 GHz e 4 thread), RAM da *8 GB* e OS *Linux Mint*.
- RaspberryPi 3, con CPU *Broadcom BCM2837* (4 core a 1,20 GHz), RAM da *1 GB* e OS *Raspbian Buster Lite*.

2.2 Problemi e limiti della libreria

Abbiamo notato come all'interno dell'infrastruttura il processo di serializzazione dei risultati di una simulazione eseguita da un server Slave sia un fattore problematico, in quanto può impiegare una grande quantità di tempo. In particolare va notato che la serializzazione di un risultato non dipende dalla complessità di un modello o dal tempo di computazione, ma dalla sua grandezza in termini di memoria. Questo significa che durante la simulazione di modelli semplici la performance

dell'infrastruttura nel complesso risulta essere molto minore rispetto ad una simulazione su vari thread di un unico dispositivo, dove appunto non è richiesta serializzazione. Tale divario viene sempre più ammortizzato all'aumentare del tempo di computazione di un risultato per un modello, in questo caso il tempo di serializzazione, che non dipende dalla complessità del modello, potrebbe diventare trascurabile.

Un altro limite dell'infrastruttura è la necessità di dover trasferire una grande quantità di dati attraverso la rete. In particolare questo potrebbe provocare ulteriori problemi nel caso in cui alcuni messaggi risultino persi. Inoltre bisogna considerare che durante l'esecuzione di una simulazione da parte di un server Slave, ai tempi di computazione e di serializzazione vanno aggiunti i tempi di trasferimento attraverso la rete dei risultati. Anche questo tempo dipende unicamente dalla grandezza in termini di memoria dei dati scambiati. Bisogna inoltre notare che i risultati vengono spediti al server Master attraverso la rete solo al termine di una simulazione da parte del server Master, questo genera dei picchi di carico molto alti in determinati istanti, mentre in altri non abbiamo alcun pacchetto scambiato sulla rete.

Bisogna inoltre notare che l'intera infrastruttura è stata progettata per essere utilizzata su un cluster di RaspberryPi da utilizzare come server Slave. Tuttavia a causa di limitazioni tecniche non è stato possibile testare tale infrastruttura su questi dispositivi in modo corretto. Non è stato quindi possibile risolvere determinati problemi derivanti dalle specifiche hardware di un RaspberryPi, come la limitata quantità computazionale.

2.3 Sviluppi futuri della libreria

Gli sviluppi futuri della libreria proposta muovono direttamente dai limiti e dalle problematiche riscontrate durante lo sviluppo e sono riassumibili in:

- *Sistema di serializzazione avanzato* che permetta di ridurre significativamente i tempi di serializzazione di risultati di simulazione che presentino dimensioni importanti in termini di memoria.
- *Miglioramento della gestione dell'invio dei risultati* da parte di un server Slave verso un server Master e da parte di un server Master verso un Client per evitare problemi di saturazione della rete con conseguente perdita di pacchetti e ritardi nella comunicazione.
- *Revisione e ottimizzazione del meccanismo di coordinamento e bilanciamento* del carico relativo ai task di simulazione inviati dal server Master al server Slave. Il meccanismo attualmente presente è da attribuire ad un lavoro precedente all'inizio dei lavori sulla libreria presentata.
- *Ottimizzazione orientata a dispositivi dalle limitate risorse di calcolo*, come i RaspberryPi impiegati durante le fasi di sviluppo. Nello specifico si prospetta la possibilità di poter testare il funzionamento della libreria, con conseguenti studi sull'ottimizzazione, su un *cluster di RaspberryPi* impiegati come server Slave.
- *Ulteriore sviluppo dell'interfaccia di monitoraggio* sviluppata a partire dall'esempio di avvio del server Master.