

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CAMERINO

**Scuola di Scienze e Tecnologie**

*Corso di Laurea in Informatica*



**Big Data**

**Tecniche e tool di analisi**

**Elaborato Finale**

*Laureando*

**Emanuele Gentiletti**

*Relatore*

**Prof. Diletta Romana  
Cacciagrano**

**Matricola: 090150**



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>4</b>
<b>1 Big Data e Paradigmi di Elaborazione</b>	<b>6</b>
Batch e Streaming Processing . . . . .	7
<i>Data at Rest</i> e <i>Data in Motion</i> . . . . .	7
Architetture di sistemi Big Data . . . . .	8
<b>2 Hadoop</b>	<b>10</b>
Installazione e Configurazione . . . . .	12
Esecuzione di software in Hadoop . . . . .	13
HDFS . . . . .	15
Principi architetturali . . . . .	16
Replicazione e fault-tolerance . . . . .	18
Comunicare con HDFS . . . . .	18
NameNode . . . . .	21
Processo di lettura di file in HDFS . . . . .	24
YARN . . . . .	26
<b>3 Batch Processing</b>	<b>28</b>
MapReduce . . . . .	29
Esempio di un programma MapReduce . . . . .	30
Efficienza di MapReduce . . . . .	37
Spark . . . . .	37
Interfaccia di Spark . . . . .	38
<b>4 Stream Processing</b>	<b>40</b>
Kafka . . . . .	40
Spark Streaming . . . . .	40
Storm . . . . .	40
<b>Bibliografia</b>	<b>41</b>

# Introduzione

Negli ultimi decenni, i Big Data hanno preso piede in modo impetuoso in una grande varietà di ambiti. Settori come medicina, finanza, business analytics e marketing sfruttano i Big Data per guidare lo sviluppo, utilizzando tecnologie che riescono a ricavare valore da grandi dataset in tempi eccezionalmente brevi rispetto al passato.

L'innovazione che rende possibili questi risultati è stata guidata dal software molto più che dall'hardware. Sono stati i cambiamenti nel modo di pensare alla computazione e all'organizzazione dei suoi processi che hanno portato a risultati notevoli nell'efficienza di elaborazione di grandi quantità di dati.

Uno dei fattori più importanti ad aver dato slancio a questo fenomeno è stato lo sviluppo di Hadoop, un framework open source progettato per la computazione batch di dataset di grandi dimensioni. Utilizzando un'architettura ben congeniata, Hadoop ha permesso l'analisi in tempi molto rapidi di interi dataset di dimensioni nell'ordine dei terabyte, fornendo una capacità di sfruttamento di questi, e conseguentemente un valore molto più alti.

Una delle conseguenze più importanti di Hadoop è stata una democratizzazione delle capacità di analisi dei dati:

- Hadoop è sotto licenza Apache, permettendo a chiunque di utilizzarlo a scopi commerciali e non;
- Hadoop non richiede hardware costoso ad alta affidabilità, e incoraggia l'adozione di macchine più generiche e prone al fallimento per il suo uso, che possono essere ottenute a costi inferiori;
- Il design di Hadoop permette la sua esecuzione in cluster di macchine eterogenee nel software e nell'hardware che possono essere acquisite da diversi rivenditori, un altro fattore che permette l'abbattimento dei costi;
- I vari modelli di programmazione in Hadoop hanno in comune l'astrazione della computazione distribuita e dei problemi intricati che questa comporta, abbassando la barriera in entrata in termini di conoscenze e lavoro richiesti per creare programmi che necessitano di un altro grado di parallelismo.

Questi fattori hanno spinto a una vasta adozione di Hadoop e dell'ecosistema software che lo circonda, in ambito aziendale e scientifico. L'adozione di Hadoop, secondo un sondaggio fatto a maggio 2015[1], si aggira al 26% delle imprese negli Stati Uniti, e si prevede che il mercato attorno ad Hadoop sorpasserà i 16 miliardi di dollari nel 2020 [2].

Tutto questo accade in un'ottica in cui la produzione di informazioni aumenta ad una scala senza precedenti: secondo uno studio di IDC[3], la quantità di informazioni nell'“Universo Digitale” ammontava a 4.4 TB nel 2014, e la sua dimensione stimata nel 2020 è di 44 TB. Data la presenza di questa vasta quantità di informazioni, il loro sfruttamento efficace può essere fonte di grandi opportunità.

In questo documento si analizzano le varie tecniche che sono a disposizione per l'utilizzo effettivo dei Big Data, come queste differiscono tra di loro, e quali strumenti le mettono a disposizione. Si parlerà inoltre di come gli strumenti possano essere integrati in sistemi di produzione esistenti, le possibili architetture di un sistema di questo tipo e come ...

La gestione di sistemi per l'elaborazione di Big Data richiede una configurazione accurata per ottenere affidabilità e fault-tolerance. Pur sottolineando che l'importanza di questi aspetti non è da sottovalutare, questa tesi si concentrerà più sul modello computazionale e di programmazione che gli strumenti offrono.

# Parte 1

## Big Data e Paradigmi di Elaborazione

Per Big Data si intendono collezioni di dati con caratteristiche tali da richiedere strumenti innovativi per poterli gestire e analizzare. Uno dei modelli tradizionali e più popolari per descrivere le caratteristiche dei Big Data si chiama **modello delle 3V**. Il modello identifica i Big Data come collezioni di informazione che presentano grande abbondanza in una o più delle seguenti caratteristiche:

- Il **volume** delle informazioni, che può aggirarsi dalle decine di terabyte per arrivare fino ai petabyte;
- La **varietà**, intesa come la varietà di *fonti* e di *possibili strutturazioni* delle informazioni di interesse;
- La **velocità** di produzione delle informazioni di interesse.

Ognuno dei punti di questo modello deriva da esigenze che vanno ad accentuarsi andando avanti nel tempo, in particolare:

- Il volume delle collezioni dei dati è aumentato esponenzialmente in tempi recenti, con l'avvento dei Social Media, dell'IOT, e degli smartphone. Generalizzando, i fattori che hanno portato a un grande incremento del volume dei data set sono un aumento della generazione automatica di dati da parte dei dispositivi e dei contenuti prodotti dagli utenti.
- L'aumento dei dispositivi e dei dati generati dagli utenti portano conseguentemente a un aumento delle fonti, gestite da enti e persone diverse. Per questa ragione, le strutture dei dati ricavati difficilmente saranno uniformi. Inoltre, l'utilizzo di dati non strutturati rigidamente è prevalente nelle tecnologie consumer, business e scientifiche (come documenti JSON, XML e CSV), che sono spesso un obiettivo auspicabile per l'analisi.
- Si possono fare le stesse considerazioni fatte per il volume dei dati per quanto riguarda la velocità. I flussi di dati vengono generati dai dispositivi e dagli utenti, che li producono a ritmi molto più incalzanti rispetto agli operatori.

Per l'elaborazione di dataset con queste caratteristiche sono stati sviluppati molti strumenti, che usano diversi pattern di elaborazione a seconda delle esigenze dell'utente e del tipo di dati

con cui si ha a che fare. I modelli di elaborazione più importanti e rappresentativi sono il *batch processing* e lo *stream processing*.

## Batch e Streaming Processing

Il batch processing è il pattern di elaborazione generalmente più efficiente, e consiste nell'elaborare un intero dataset in un'unità di lavoro, per poi ottenere i risultati al termine di questa.

Questo approccio è ottimale quando i dati da elaborare sono disponibili a priori, e non c'è necessità di ottenere i risultati in tempi immediati o con bassa latenza. Tuttavia, questo approccio ha dei limiti.

- Le fasi del batch processing richiedono la schedulazione dei lavori da parte dell'utente, con un conseguente overhead dovuto alla schedulazione in sé o alla configurazione di strumenti automatizzati che se ne occupino;
- Non è possibile accedere ai risultati prima del termine del job, che può avere una durata eccessiva rispetto alle esigenze dell'applicazione o dell'utente.

Per use case in cui questi fattori sono rilevanti, lo **stream processing** si presta come più adatto. In questo paradigma, i dati da elaborare vengono ricevuti da *stream*, che rappresentano flussi di dati contigui provenienti da origini non necessariamente controllate. Gli stream forniscono nuovi dati in modo *asincrono*, e la loro elaborazione avviene a ogni nuovo evento di ricezione. I job in streaming molto spesso non hanno un termine prestabilito, ma vengono terminati dall'utente, e i risultati dell'elaborazione possono essere disponibili mano a mano che l'elaborazione procede, permettendo quindi un feedback più rapido rispetto ai lavori batch.

## Data at Rest e Data in Motion

I due paradigmi si differenziano anche per il modo in cui i dati sono disponibili. Il processing batch richiede che l'informazione sia *data at rest*, ovvero informazioni completamente accessibili a priori dal programma. I dati di input in una computazione batch sono determinati al suo inizio, e non possono cambiare durante il suo corso. Questo significa che se si rende desiderabile dare in input una nuova informazione in un lavoro batch, l'unico modo per farlo è rieseguire interamente il lavoro.

Lo **stream processing**, invece, è progettato per *data in motion*, dati in arrivo continuo non necessariamente disponibili prima dell'inizio dell'elaborazione. Esempi di data in motion possono essere rappresentati dai dati ricevuti in un socket TCP inviati da reti di sensori IOT, o dall'ascolto di servizi di social media.

È possibile utilizzare strumenti di processing in streaming anche per *data at rest*, rappresentando il dataset come uno stream. Questa proprietà è desiderabile, perché permette di utilizzare

le stesse applicazioni per elaborazioni che riguardano dataset disponibili a priori e stream di cui non si ha completo controllo.

Tabella 1.1: Differenze tra elaborazione batch e streaming

Caratteristiche	Batch	Streaming
Ottimizzazione	Alto throughput	Bassa latenza
Tipo di informazione	<i>Data at rest</i>	<i>Data in motion</i> e <i>Data at rest</i>
Accesso ai dati	Stabilito all'inizio	Dipendente dallo stream
Accesso ai risultati	Fine job	Continuo

Un esempio di *data at rest* sono i resoconti delle vendite di un'azienda, su cui si possono cercare pattern per identificare quali prodotti sono in trend nelle vendite. Per *data in motion* si può considerare l'invio di dati da parte di sensori IoT o le pubblicazioni degli utenti nei social media, che sono continui e senza una fine determinata.

## Architetture di sistemi Big Data

I paradigmi di Batch e Stream processing presentano differenze notevoli nelle astrazioni, nei tool e nelle API utilizzate. Il loro utilizzo è condizionat

Ad oggi, le architetture dei sistemi che sfruttano i Big Data si basano principalmente su due modelli, la **lambda** e la **kappa** architecture.

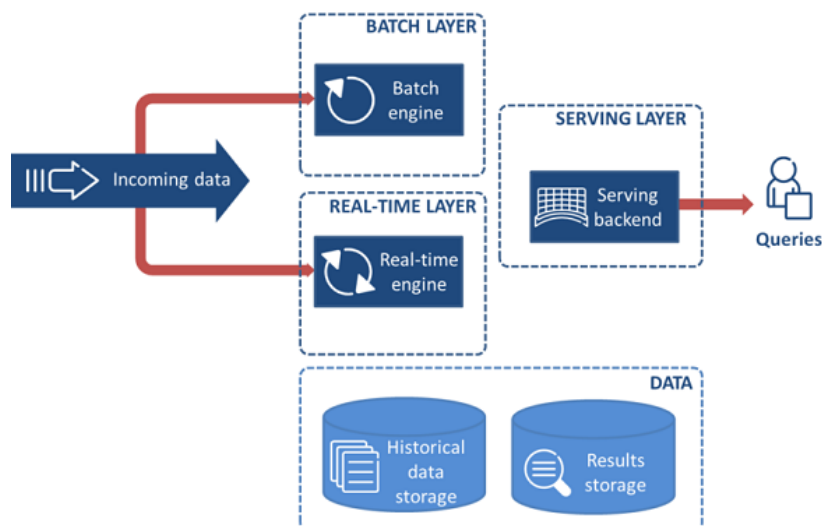


Figura 1.1: Diagramma della Lambda Architecture

La lambda architecture utilizza tre unità logiche, il **batch layer**, lo **speed layer** e il **serving layer**. Il serving layer è un servizio o un insieme di servizi che permettono di eseguire query sui dati elaborati dagli altri due layer. Il batch layer esegue framework per computazioni batch, mentre



lo speed layer esegue computazioni stream. Questi due layer rendono disponibili i risultati delle loro computazioni al serving layer per la consultazione da parte degli utenti.

Il **batch layer** opera sui dati archiviati storicamente, e riesegue le computazioni periodicamente per integrare i nuovi dati ricevuti. Questo layer può eseguire velocemente computazioni sulla totalità dei dati. Lo **speed layer** invece elabora i dati asincronamente alla loro ricezione, e offre risultati con una bassa latenza.

Questo approccio è il più versatile, perché permette l'utilizzo di entrambi i paradigmi e della totalità degli strumenti progettati per batch e stream processing. Tuttavia, i layer batch e speed richiedono una gestione separata, e il mantenimento di due basi di codice scritte con API e potenzialmente linguaggi diversi, anche per applicazioni che eseguono le stesse funzioni. I sistemi che implementano architetture lambda sono i più onerosi nello sviluppo e nella manutenzione.

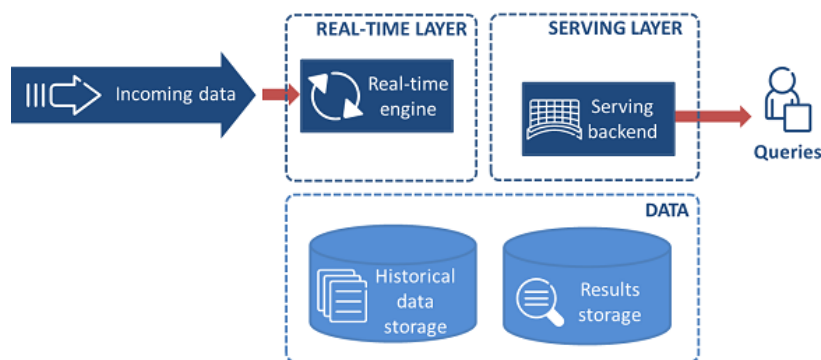


Figura 1.2: Diagramma della Kappa Architecture

In contrapposizione, la kappa architecture non utilizza un batch layer, e la totalità delle computazioni viene eseguita dallo speed layer. Per eseguire elaborazioni sui dati archiviati, questi vengono rappresentati come uno stream, che viene dato in ingestione allo speed layer. In questo modo gli strumenti e le basi di codice possono essere unificate, semplificando l'architettura e rendendo la gestione del sistema meno impegnativa.

Le differenze tra i due approcci sono più visibili quando si mettono a confronto i framework di elaborazione batch e streaming per osservare le differenze nell'uso. Come regola generale, si può definire preferibile la lambda architecture per l'efficienza delle computazioni, superiore nei sistemi di elaborazione batch. La lambda architecture è preferibile quando le elaborazioni che si vogliono eseguire sui dati storici e quelli in arrivo sono identiche o molto simili, o si vuole ottenere un sistema architetturealmente più semplice. Spesso la scelta dipende da un tradeoff tra questi due fattori.

## Parte 2

# Hadoop

Nell'ambito dei Big Data, Hadoop è il perno centrale su cui è basato un *ecosistema* di tool e tecnologie, tant'è che spesso il nome Hadoop viene utilizzato per riferirsi all'intero ecosistema di tool e tecnologie costruiti attorno a questo.

La documentazione ufficiale[4] lo descrive come:

...un framework che abilita l'elaborazione distribuita di grandi dataset in cluster di computer utilizzando semplici modelli di programmazione. **Hadoop** è progettato per essere scalato da server singoli a migliaia di macchine, dove ognuna di queste offre computazione e storage locale. Invece di affidarsi all'hardware per fornire un'alta affidabilità, **Hadoop** è progettato per rilevare e gestire i fallimenti [delle computazioni] a livello applicativo, mettendo a disposizione un servizio ad alta affidabilità su cluster di computer pronti al fallimento.

In questa definizione sono racchiusi dei punti molto importanti:

- **Semplici modelli di programmazione**

Hadoop raggiunge molti dei suoi obiettivi fornendo un'interfaccia di livello molto alto al programmatore, in modo di potersi assumere la responsabilità di concetti complessi e necessari all'efficienza nella computazione distribuita, ma che hanno poco a che fare con il problema da risolvere in sé (ad esempio, la sincronizzazione di task paralleli e lo scambio dei dati tra nodi del sistema distribuito). Questo modello **pone dei limiti alla libertà del programmatore**, che deve adeguare la codifica della risoluzione del problema al modello di programmazione fornito.

- **Computazione e storage locale**

L'ottimizzazione più importante che Hadoop fornisce rispetto all'elaborazione dei dati è il risultato dell'unione di due concetti: **distribuzione dello storage e distribuzione della computazione**.

Entrambi sono importanti a prescindere dell'uso particolare che ne fa Hadoop: la distribuzione dello storage permette di combinare lo spazio fornito da più dispositivi e di

farne uso tramite un'unica interfaccia logica, e di replicare i dati in modo da poter tollerare guasti nei dispositivi. La distribuzione della computazione permette di aumentare il grado di parallelizzazione nell'esecuzione dei programmi.

Hadoop unisce i due concetti utilizzando cluster di macchine che hanno sia lo scopo di mantenere lo storage, che quello di elaborare i dati. Quando Hadoop esegue un lavoro, **quante più possibili delle computazioni richieste vengono eseguite nei nodi che contengono i dati da elaborare**. Questo permette di ridurre la latenza di rete, minimizzando la quantità di dati che devono essere scambiati tra i nodi del cluster. Il meccanismo è trasparente all'utente, a cui basta persistere i dati da elaborare nel cluster per usufruirne. Questo principio viene definito **data locality**.

- **Rack awareness**

Nel contesto di Hadoop, *rack awareness* si riferisce a delle ottimizzazioni sull'utilizzo di banda di rete e sull'affidabilità che Hadoop fa basandosi sulla struttura del cluster.

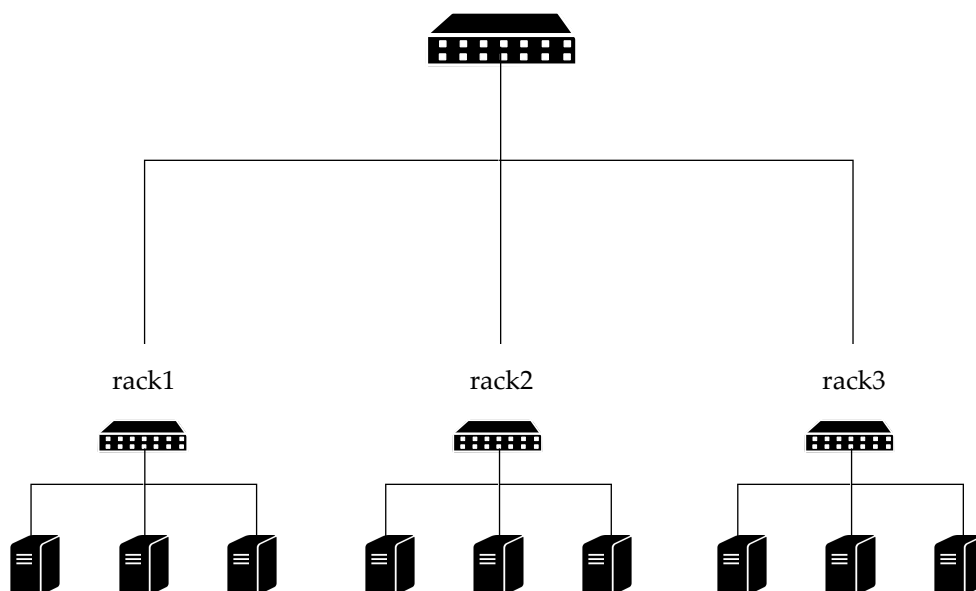


Figura 2.1: Topologia di rete tipica di un cluster Hadoop.

Quando configurato per essere *rack aware*, Hadoop considera il cluster come un insieme di *rack* che contengono i nodi del cluster. Tutti i nodi di un rack sono connessi a uno switch di rete (o dispositivo equivalente), e tutti gli switch sono a loro volta connessi a uno switch centrale.

A partire da questa struttura si può fare un'assunzione importante: la comunicazione tra nodi in uno stesso rack è meno onerosa in termini di banda rispetto alla comunicazione tra nodi in rack diversi, perché la comunicazione può essere commutata tramite un solo switch.

Quando possibile, Hadoop utilizza questo principio per minimizzare l'uso di banda tra nodi del cluster. Come si vedrà, i vari componenti di Hadoop fanno uso della configurazione di rete per raggiungere diversi risultati, tra cui l'ottimizzazione dell'uso di banda di rete e una migliore fault-tolerance.

- **Scalabilità**

Hadoop è in grado di scalare linearmente in termini di velocità di computazione e storage, ed è in grado di sostenere cluster composti da un gran numero di macchine. Il più grande cluster Hadoop conosciuto dal punto di vista dello storage è gestito da Facebook, che secondo gli ultimi dati disponibili nell'anno 2011 conteneva 21 petabyte di dati ed è composto da più di 2000 nodi.

- **Hardware non necessariamente affidabile**

I cluster di macchine che eseguono Hadoop non hanno particolari requisiti di affidabilità rispetto ad hardware consumer. Il framework è progettato per tenere in conto dell'alta probabilità di fallimento dell'hardware, e per attenuarne le conseguenze, sia dal punto di vista dello storage e della potenziale perdita di dati, che da quello della perdita di risultati intermedi e parziali nel corso dell'esecuzione di lavori computazionalmente costosi. In questo modo l'utente è sgravato dal compito generalmente difficile di gestire fallimenti parziali nel corso delle computazioni.

Hadoop è composto da diversi moduli:

- **HDFS**, un filesystem distribuito ad alta affidabilità, che fornisce replicazione automatica all'interno dei cluster e accesso ad alto throughput ai dati
- **YARN**, un framework per la schedulazione di lavori e per la gestione delle risorse all'interno del cluster
- **MapReduce**, un framework e un modello di programmazione fornito da Hadoop per la scrittura di programmi paralleli che processano grandi dataset.

## Installazione e Configurazione

Ogni versione di Hadoop viene distribuita in tarball, una con i sorgenti, da cui si può eseguire una build manuale, e una binaria, che può essere estratta e utilizzata così com'è. Per un approccio più strutturato, sono disponibili repository che forniscono versioni pacchettizzate di Hadoop, come il PPA per Ubuntu[5] e i pacchetti AUR per Arch Linux[6].

Ci sono anche distribuzioni di immagini virtuali Linux create appositamente con lo scopo di fornire un ambiente preconfigurato con Hadoop e vari componenti del suo ecosistema. I due ambienti più utilizzati di questo tipo sono Cloudera QuickStart e HortonWorks Sandbox, disponibili per VirtualBox, VMWare e Docker. Gli esempi di questo documento sono eseguiti prevalentemente da Arch Linux e dalla versione Docker di HortonWorks Sandbox.

Hadoop è configurabile tramite file XML, che si trovano rispetto alla cartella d'installazione in `etc/hadoop`. Ogni componente di Hadoop (HDFS, MapReduce, Yarn) ha un file di configurazione apposito che contiene impostazioni relative al componente stesso, mentre un altro file di configurazione contiene proprietà comuni a tutti i componenti.

Tabella 2.1: Nomi dei file di configurazione per i componenti di Hadoop

Comuni	HDFS	YARN	MapReduce
<code>core-site.xml</code>	<code>hdfs-site.xml</code>	<code>yarn-site.xml</code>	<code>mapred-site.xml</code>

```
<?xml version="1.0"?>
<configuration>
  <property>
    <name>fs.defaultFS</name>
    <value>hdfs://namenode/</value>
  </property>
  <property>
    <name>mapreduce.framework.name</name>
    <value>yarn</value>
  </property>
  <property>
    <name>yarn.resourcemanager.address</name>
    <value>resourcemanager:8032</value>
  </property>
</configuration>
```

Listato 2.1: Esempio di file di configurazione personalizzato di Hadoop.

È anche possibile selezionare un'altra cartella da cui prendere i file di configurazione, impostandola come valore della variabile d'ambiente `HADOOP_CONF_DIR`. Un approccio comune alla modifica dei file di configurazione consiste nel copiare il contenuto di `etc/hadoop` in un'altra posizione, specificare questa in `HADOOP_CONF_DIR` e fare le modifiche nella nuova cartella. In questo modo si evita di modificare l'albero d'installazione di Hadoop.

Per molti degli eseguibili inclusi in Hadoop, è anche possibile specificare un file che contiene ulteriori opzioni di configurazione, che possono sovrascrivere quelle in `HADOOP_CONF_DIR` tramite lo switch `-conf`.

## Esecuzione di software in Hadoop

I programmi che sfruttano il runtime di Hadoop sono generalmente sviluppati in Java (o in un linguaggio che ha come target di compilazione la JVM), e vengono avviati tramite l'eseguibile

hadoop. L'eseguibile richiede che siano specificati il classpath del programma, e una classe contenente un metodo `main` che si desidera eseguire (analogo all'entry point dei programmi Java).

Il classpath può essere specificato tramite la variabile d'ambiente `HADOOP_CLASSPATH`, che può essere il percorso di una directory o di un file `jar`. La classe con il metodo `main` da invocare viene messa tra i parametri del comando `hadoop`, seguita dagli argomenti che si vogliono passare in `args[]`.

- (1) Volendo eseguire il seguente programma in Hadoop:

```
public class SayHello {  
    public static void main(String args[]) {  
        System.out.println("Hello " + args[0] + "!");  
    }  
}
```

Lo si può compilare e pacchettizzare in un file `jar`, per poi utilizzare i seguenti comandi:

```
$~ export HADOOP_CLASSPATH=say_hello.jar  
$~ hadoop SayHello Josh
```

Hello Josh!

- (2) In alternativa, si può eseguire il comando `hadoop jar`, e specificare il file `jar` direttamente nei suoi argomenti:

```
$~ hadoop jar say_hello.jar SayHello Josh
```

Hello Josh!

In generale, i programmi eseguiti in Hadoop fanno uso della sua libreria client. La libreria fornisce accesso al package `org.apache.hadoop`, che contiene le API necessarie per interagire con Hadoop. Non è necessario che la libreria client si trovi nel classpath finale, in quanto il runtime di Hadoop fornisce le classi della libreria a runtime.

Per gestire le dipendenze e la pacchettizzazione dei programmi per Hadoop è pratico utilizzare un tool di gestione delle build. Negli esempi in questo documento si utilizza Maven a questo scopo, che permette di specificare le proprietà di un progetto, tra cui le sue dipendenze, in un file XML chiamato POM (Project Object Model). A partire dal POM, Maven è in grado di scaricare automaticamente le dipendenze del progetto, e di pacchettizzarle correttamente negli artefatti `jar` a seconda della configurazione fornita.

Maven è in grado di gestire correttamente la dipendenza della libreria client di Hadoop, attraverso un meccanismo chiamato *dependency scope*. Per ogni dipendenza è possibile specificare una proprietà *scope*, che indica in che modo la dipendenza debba essere gestita a tempo di build (in particolar modo, se debba essere inclusa nel classpath). Se non specificato, lo scope

```

1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2 <project xmlns="..." >
3     <modelVersion>4.0.0</modelVersion>
4
5     <groupId>com.example</groupId>
6     <artifactId>say_hello</artifactId>
7     <version>1.0</version>
8
9     <dependencies>
10
11         <!-- Libreria client di Hadoop -->
12         <dependency>
13             <groupId>org.apache.hadoop</groupId>
14             <artifactId>hadoop-client</artifactId>
15             <version>2.8.1</version>
16             <scope>provided</scope>
17         </dependency>
18
19     </dependencies>
20 </project>

```

Listato 2.2: Un esempio semplificato di un POM per il programma SayHello.

è impostato a `compile`, che indica che la dipendenza è resa disponibile nel classpath dell'artefatto. Per gestire correttamente la dipendenza dalla libreria client di Hadoop, è opportuno impostare lo scope della dipendenza a `provided`, che indica che le classi della libreria sono fornite dal container in cui è eseguito il programma.

## HDFS

HDFS è un filesystem distribuito che permette l'accesso ad alto throughput ai dati. HDFS è scritto in Java, e viene eseguito nello userspace. Lo storage dei dati passa per il filesystem del sistema che lo esegue.

I dati contenuti in HDFS sono organizzati, a livello di storage, in unità logiche chiamate *blocchi*, nel senso comune del termine nel dominio dei filesystem. I blocchi di un singolo file possono essere distribuiti all'interno di più macchine all'interno del cluster, permettendo di avere file più grandi della capacità di storage di ogni singola macchina nel cluster. Rispetto ai filesystem comuni la dimensione di un blocco è molto più grande, 128 MB di default. La ragione per cui HDFS utilizza blocchi così grandi è minimizzare il costo delle operazioni di seek, dato il fatto che se i file sono composti da meno blocchi, si rende necessario trovare l'inizio di un blocco un

minor numero di volte. Questo approccio riduce anche la frammentazione dei dati, rendendo più probabile che questi vengano scritti contigualmente all'interno della macchina<sup>1</sup>.

HDFS è basato sulla specifica POSIX, e ha quindi una struttura gerarchica. L'utente può strutturare i dati salvati in directory, e impostare permessi di accesso in file e cartelle. Tuttavia, l'adesione a POSIX non è rigida, e alcune operazioni non sono rese possibili, come la modifica dei file in punti arbitrari. Queste restrizioni permettono ad HDFS di implementare efficientemente funzioni specifiche del suo dominio (come il batch processing), e di semplificare la sua architettura.

## Principi architetturali

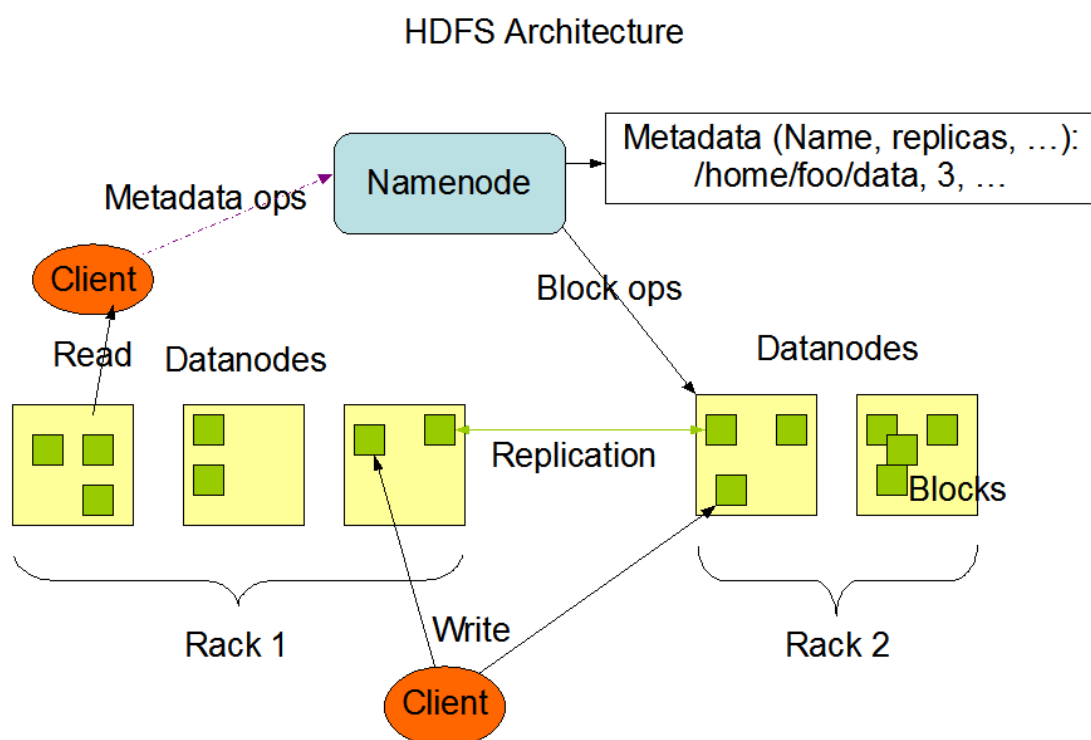


Figura 2.2: Schema di funzionamento dell'architettura di HDFS

La documentazione di Hadoop descrive i seguenti come i principi architetturali alla base della progettazione di HDFS:

- **Fallimento hardware come regola invece che come eccezione**

Un sistema che esegue HDFS è composto da molti componenti, con probabilità di fallimento non triviale. Sulla base di questo principio, HDFS dà per scontato che **ci sia sempre un numero di componenti non funzionanti**, e si pone di rilevare errori e guasti e di fornire un recupero rapido e automatico da questi.

<sup>1</sup>Non è possibile essere certi della contiguità dei dati, perché HDFS non è un'astrazione diretta sulla scrittura del disco, ma sul filesystem del sistema operativo che lo esegue. Per cui la frammentazione effettiva dipende da come i dati vengono organizzati dal filesystem del sistema operativo.



Il meccanismo principale con cui HDFS raggiunge questo obiettivo è la replicazione: in un cluster, ogni blocco di cui un file è composto è replicato in più macchine (3 di default). Se un blocco non è disponibile in una macchina, o se non supera i controlli di integrità, una sua copia può essere letta da un'altra macchina in modo trasparente per il client.

Il numero di repliche per ogni blocco è configurabile, e ci sono più criteri con cui viene deciso in quali macchine il blocco viene replicato, principalmente orientati al risparmio di banda di rete.

- **Modello di coerenza semplice**

Per semplificare l'architettura generale, HDFS fa delle assunzioni specifiche sul tipo di dati che vengono salvati in HDFS e pone dei limiti su come l'utente possa lavorare sui file. In particolare, **non è possibile modificare arbitrariamente file già esistenti**, e le modifiche devono limitarsi a operazioni di troncamento e di aggiunta a fine file. Queste supposizioni permettono di semplificare il modello di coerenza, perché i blocchi di dati, una volta scritti, possono essere considerati immutabili, evitando una considerevole quantità di problemi in un ambiente dove i blocchi di dati sono replicati in più posti:

- Per ogni modifica a un blocco di dati, bisognerebbe verificare quali altre macchine contengono il blocco, e rieseguire la modifica (o rireplicare il blocco modificato) in ognuna di queste.
- Queste modifiche dovrebbero essere fatte in modo atomico, o richieste di lettura su una determinata replica di un blocco invece che in un'altra potrebbe portare a risultati inconsistenti o non aggiornati.

Le limitazioni che Hadoop impone sono ragionevoli per lo use-case per cui HDFS è progettato, caratterizzato da grandi dataset che vengono copiati nel filesystem e letti in blocco.

- **Dataset di grandi dimensioni**

I filesystem distribuiti sono generalmente necessari per aumentare la capacità di storage disponibile oltre quella di una singola macchina. La distribuzione di HDFS, assieme alla grande dimensione dei blocchi

- **Accesso in streaming**

HDFS predilige l'accesso ai dati in streaming, per permettere ai lavori batch di essere eseguiti con grande efficienza. Questo approccio va a discapito del tempo di latenza della lettura dei file, ma permette di avere un throughput in lettura molto vicino ai tempi di lettura del disco.

- **Portabilità su piattaforme software e hardware eterogenee**

HDFS è scritto in Java, ed è portabile in tutti i sistemi che ne supportano il runtime.

L'architettura di HDFS è di tipo master/slave, dove un nodo centrale, chiamato **NameNode**, gestisce i metadati e la struttura del filesystem, mentre i nodi slave, chiamati **DataNode**, con-

tengono i blocchi di cui file sono composti. Tipicamente, viene eseguita un'istanza del software del DataNode per macchina del cluster, e una macchina dedicata esegue il NameNode.

I *client* del filesystem interagiscono sia con il NameNode che con i DataNode per l'accesso ai file. La comunicazione tra il client e i nodi avviene tramite socket TCP ed è coordinata dal NameNode, che fornisce ai client tutte le informazioni sul filesystem e su quali nodi contengono i DataBlock dei file richiesti.

## Replicazione e fault-tolerance

Il blocco è un'astrazione che si presta bene alla replicazione dei dati nel filesystem all'interno del cluster: per replicare i dati, HDFS persiste ogni blocco all'interno di più macchine nel cluster. HDFS utilizza le informazioni sulla configurazione di rete del cluster per decidere il posizionamento delle repliche di ogni blocco: considerando che i tempi di latenza di rete sono più bassi tra nodi in uno stesso rack, HDFS salva due copie del blocco in due nodi che condividono il rack. In questo modo, nell'eventualità in cui una delle copie del blocco non fosse disponibile, una sua replica può essere recuperata in un nodo che si trova all'interno del rack, minimizzando l'overhead di rete.

Per aumentare la fault-tolerance, HDFS salva un'ulteriore copia del blocco al di fuori del rack in cui ha memorizzato le prime due. Questa operazione salvaguarda l'accesso al blocco in caso di fallimento dello switch di rete del rack che contiene le prime due copie, che renderebbe inaccessibili tutte le macchine che contiene.

Il numero di repliche create da HDFS per ogni blocco è definito *replication factor*, ed è configurabile tramite l'opzione `dfs.replication`. Quando il numero di repliche di un certo file scende sotto la soglia di questa proprietà (eventualità che accade in caso di fallimento dei nodi) HDFS riesegue trasparentemente la replicazione dei blocchi per raggiungere la soglia definita nella configurazione.

## Comunicare con HDFS

Hadoop fornisce tool e librerie che possono agire da client nei confronti di HDFS. Il tool più diretto è la CLI, accessibile nelle macchine in cui è installato Hadoop tramite il comando `hadoop fs`.

```
% hadoop fs -help
```

```
Usage: hadoop fs [generic options]
```

```
    [-appendToFile <localsrc> ... <dst>]
```

```
    [-cat [-ignoreCrc] <src> ...]
```

```
    [-checksum <src> ...]
```

```
    [-chgrp [-R] GROUP PATH...]
```

```
    [-chmod [-R] <MODE[,MODE]... | OCTALMODE> PATH...]
```

```
    [-chown [-R] [OWNER][:[GROUP]] PATH...]
```

```

[-copyFromLocal [-f] [-p] [-l] [-d] <localsrc> ... <dst>]
[-copyToLocal [-f] [-p] [-ignoreCrc] [-crc] <src> ... <localdst>]
[-count [-q] [-h] [-v] [-t [<storage type>]] [-u] [-x] <path> ...]
[-cp [-f] [-p | -p[topax]] [-d] <src> ... <dst>]
...

```

La CLI fornisce alcuni comandi comuni nei sistemi POSIX, come `cp`, `rm`, `mv`, `ls` e `chown`, e altri che riguardano specificamente HDFS, come `copyFromLocal` e `copyToLocal`, utili a trasferire dati tra la macchina su cui si opera e il filesystem.

I comandi richiedono l'URI che identifica l'entità su cui si vuole operare. Per riferirsi a una risorsa all'interno di un'istanza di HDFS, si usa l'URI del namenode, con schema `hdfs`<sup>2</sup>, e con il path corrispondente al percorso della risorsa nel filesystem. Ad esempio, è possibile creare una cartella `foo` all'interno della radice del filesystem con il seguente comando:

```
hadoop fs -mkdir hdfs://localhost:8020/foo
```

Per diminuire la verbosità dei comandi è possibile utilizzare percorsi relativi, e specificare l'opzione `dfs.defaultFS` nella configurazione di Hadoop all'URI del filesystem ai cui i percorsi relativi si riferiscono. In questo modo, si può accorciare l'esempio precedente a:

```
hadoop fs -mkdir foo
```

Ad esempio, data la seguente cartella:

```
[root@sandbox example_data]# ls
example1.txt example2.txt example3.txt
```

Si possono copiare i file dalla cartella locale della macchina al filesystem distribuito con il seguente comando:

```
[root@sandbox example_data]# hadoop fs -copyFromLocal example*.txt /example
```

Per verificare che l'operazione sia andata a buon fine, si può ottenere un listing della cartella in cui si sono trasferiti i file con il comando `ls`:

```

[root@sandbox example_data]# hadoop fs -ls /example
Found 3 items
-rw-r--r--  1 root hdfs          70 2017-06-30 03:58 /example/example1.txt
-rw-r--r--  1 root hdfs          39 2017-06-30 03:58 /example/example2.txt
-rw-r--r--  1 root hdfs          43 2017-06-30 03:58 /example/example3.txt

```

---

<sup>2</sup>Hadoop è abbastanza generale da poter lavorare con diversi filesystem, con lo schema definisce il protocollo di comunicazione, che non deve essere necessariamente `hdfs`. Ad esempio, un URI con schema `file` si riferisce al filesystem locale, e le operazioni eseguite su URI che utilizzano questo schema vengono effettuate sulla macchina dove viene eseguito il comando. Questo approccio può essere adatto nella fase di testing dei programmi, ma nella maggior parte dei casi è comunque desiderabile lavorare su un filesystem distribuito adeguato alla gestione dei Big Data, e un'alternativa ad HDFS degna di nota è MapR-FS[7].

Il listing è molto simile a quello ottenibile su sistemi Unix. Una differenza importante è la seconda colonna, che non mostra il numero di hard link al file nel filesystem<sup>3</sup>, ma il numero di repliche che HDFS ha a disposizione del file, in questo caso una per file. Il numero di repliche fatte da HDFS può essere impostato settando il fattore di replicazione di default, che per Hadoop in modalità distribuita è 3 di default. Si può anche cambiare il numero di repliche disponibili per determinati file, utilizzando il comando `hdfs dfs`:

```
[root@sandbox ~]# hdfs dfs -setrep 2 /example/example1.txt
Replication 2 set: /example/example1.txt
[root@sandbox ~]# hadoop fs -ls /example
Found 3 items
-rw-r--r--    2 root hdfs          70 2017-06-30 03:58 /example/example1.txt
-rw-r--r--    1 root hdfs          39 2017-06-30 03:58 /example/example2.txt
-rw-r--r--    1 root hdfs          43 2017-06-30 03:58 /example/example3.txt
```

HDFS è anche accessibile tramite *HDFS Web Interface*, un tool che fornisce informazioni sullo stato generale del filesystem e sul suo contenuto. Ci sono anche tool di amministrazione di cluster Hadoop che offrono GUI web più avanzate di quella fornita di default da HDFS. Due esempi sono Cloudera Manager e Apache Ambari, che offrono un file manager lato web con cui è possibile interagire in modo più semplice, permettendo anche a utenti in ambito meno tecnico di lavorare con il filesystem.

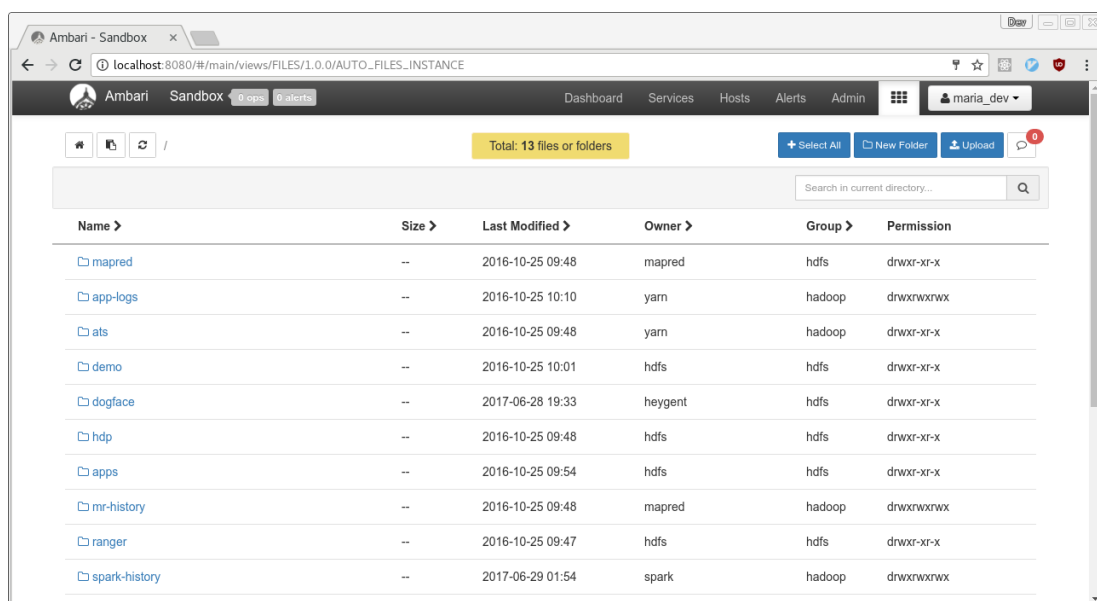


Figura 2.3: Screenshot del file manager HDFS incluso in Ambari

Un'altra interfaccia importante ad HDFS è l'API FileSystem di Hadoop, che permette un accesso programmatico da linguaggi per JVM a tutte le funzioni del filesystem. L'API è generale, in modo che possa essere utilizzata con filesystem diversi da HDFS.

<sup>3</sup>Non è necessario mostrare i link dei file, perché HDFS correntemente non li supporta.

Per linguaggi che non supportano interfacce Java, esiste un'implementazione in C chiamata `libhdfs`, che si appoggia sulla Java Native Interface per esporre l'API di Hadoop.

Esistono poi progetti che permettono il montaggio di HDFS in un filesystem locale. Alcune di queste implementazioni sono basate su FUSE, mentre altre su NFS Gateway. Questo metodo di accesso permette l'utilizzo di utilità native del sistema in uso in HDFS.

## NameNode

Il NameNode è il riferimento centrale per i metadati del filesystem nel cluster, il che vuol dire che se il NameNode non è disponibile il filesystem non è accessibile. Questo rende il NameNode un *single point of failure* del sistema, e per questa ragione HDFS mette a disposizione dei meccanismi per attenuare l'indisponibilità del sistema in caso di non reperibilità del NameNode, e per assicurare che lo stato del filesystem possa essere recuperato a partire dal NameNode.

Il NameNode è anche il nodo a cui i client si connettono alla lettura del file. La connessione ha il solo scopo di fornire le informazioni sui DataNode che contengono i dati effettivi del file. I dati di un file non passano mai per il NameNode.

Tuttavia, il NameNode non salva persistentemente le informazioni sulle posizioni dei blocchi, che vengono invece mantenute dai DataNode. Perché il NameNode possa avere in memoria le informazioni sui file necessarie per essere operativo, questo deve ricevere le liste dei blocchi in possesso dei DataNode, in messaggi chiamati **block report**. Non è necessario che il DataNode conosca la posizione di tutti i blocchi sin dall'inizio, ma basta che per ogni blocco conosca la posizione di un numero minimo di repliche, determinato da un'opzione chiamata `dfs.replication.min.replicas`, di default 1.

Questa procedura avviene quando il NameNode si trova in uno stato chiamato **safe mode**.

### *Namespace image ed edit log*

Le informazioni sui metadati del sistema vengono salvate nello storage del NameNode in due posti, la *namespace image* e l'*edit log*. La *namespace image* è uno snapshot dell'intera struttura del filesystem, mentre l'*edit log* è un elenco di operazioni eseguite nel filesystem a partire dalla *namespace image*. Partendo dalla *namespace image* e applicando le operazioni registrate nell'*edit log*, è possibile risalire allo stato attuale del filesystem. Il NameNode ha una rappresentazione dello stato del filesystem anche nella memoria centrale, che viene utilizzata per servire le richieste di lettura.

Quando HDFS riceve una richiesta che richiede la modifica dei metadati, il NameNode esegue le seguenti operazioni:

1. registra la transazione nell'*edit log*
2. aggiorna la rappresentazione del filesystem in memoria
3. passa all'operazione successiva.

La ragione per cui i cambiamenti dei metadati vengono registrati nell'*edit log* invece che nella *namespace image* è la velocità di scrittura: scrivere ogni cambiamento del filesystem mano a mano che avviene nell'immagine sarebbe lento, dato che questa può avere dimensioni nell'ordine dei gigabyte. Il NameNode esegue un *merge* dell'*edit log* e della *namespace image* a ogni suo avvio, portando lo stato attuale dell'immagine al pari di quello del filesystem.

Dato che la dimensione dell'*edit log* può diventare notevole, è utile eseguire l'operazione di *merge* al raggiungimento di una soglia di dimensione del log. Questa operazione è computazionalmente costosa, e se fosse eseguita dal NameNode potrebbe interferire con la sua operazione di routine.

Per evitare interruzioni nel NameNode, il compito di eseguire periodicamente il *merge* dell'*edit log* è affidato a un'altra entità, il **Secondary NameNode**. Il Secondary NameNode viene solitamente eseguito su una macchina differente, dato che richiede un'unità di elaborazione potente e almeno la stessa memoria del NameNode per eseguire l'operazione di *merge*.

### Avvio del NameNode e *Safe Mode*

Prima di essere operativo, il NameNode deve eseguire alcune operazioni di startup, tra cui attendere di aver ricevuto i block report dai DataNode in modo da conoscere le posizioni dei blocchi. Durante queste operazioni, il NameNode si trova in uno stato chiamato *safe mode*, in cui sono permesse unicamente operazioni che accedono ai metadati del filesystem, e tentativi di lettura e scrittura di file falliscono. Prima di poter permettere l'accesso completo, il NameNode ha bisogno di ricevere le informazioni sui blocchi da parte dei DataNode.

Per ricapitolare, al suo avvio, il NameNode effettua il *merge* della *namespace image* con l'*edit log*. Al termine dell'operazione, il risultato del *merge* viene salvato come la nuova *namespace image*. Il Secondary NameNode non viene coinvolto in questo primo *merge*.

Prima di uscire dalla *safe mode*, il NameNode attende di avere abbastanza informazioni da poter accedere a un numero minimo di repliche di ogni blocco. A questo punto il NameNode esce dalla *safe mode*.

Si possono utilizzare dei comandi per verificare lo stato, attivare e disattivare la *safe mode*.

```
bash-4.1$ hdfs dfsadmin -safemode get
Safe mode is OFF
bash-4.1$ hdfs dfsadmin -safemode enter
Safe mode is ON
bash-4.1$ hdfs dfsadmin -safemode leave
Safe mode is OFF
```

## Startup Progress

Elapsed Time: 31 sec, Percent Complete: 100%

Phase	Completion	Elapsed Time
<b>Loading fsimage</b> /hadoop/hdfs/namenode/current/fsimage_000000000000000000 306 B	100%	0 sec
inodes (0/0)	100%	
delegation tokens (0/0)	100%	
cache pools (0/0)	100%	
<b>Loading edits</b>	100%	0 sec
/hadoop/hdfs/namenode/current/edits_0000000000000000001-0000000000000005850 1 MB (5850/5850)	100%	
<b>Saving checkpoint</b>	100%	0 sec
inodes /hadoop/hdfs/namenode/current/fsimage.ckpt_0000000000000005850 (0/0)	100%	
delegation tokens /hadoop/hdfs/namenode/current/fsimage.ckpt_0000000000000005850 (0/0)	100%	
cache pools /hadoop/hdfs/namenode/current/fsimage.ckpt_0000000000000005850 (0/0)	100%	
<b>Safe mode</b>	100%	30 sec
awaiting reported blocks (0/797)	100%	

Figura 2.4: Lo stato dello startup di un’istanza di HDFS, mostrata da HDFS Web Interface.

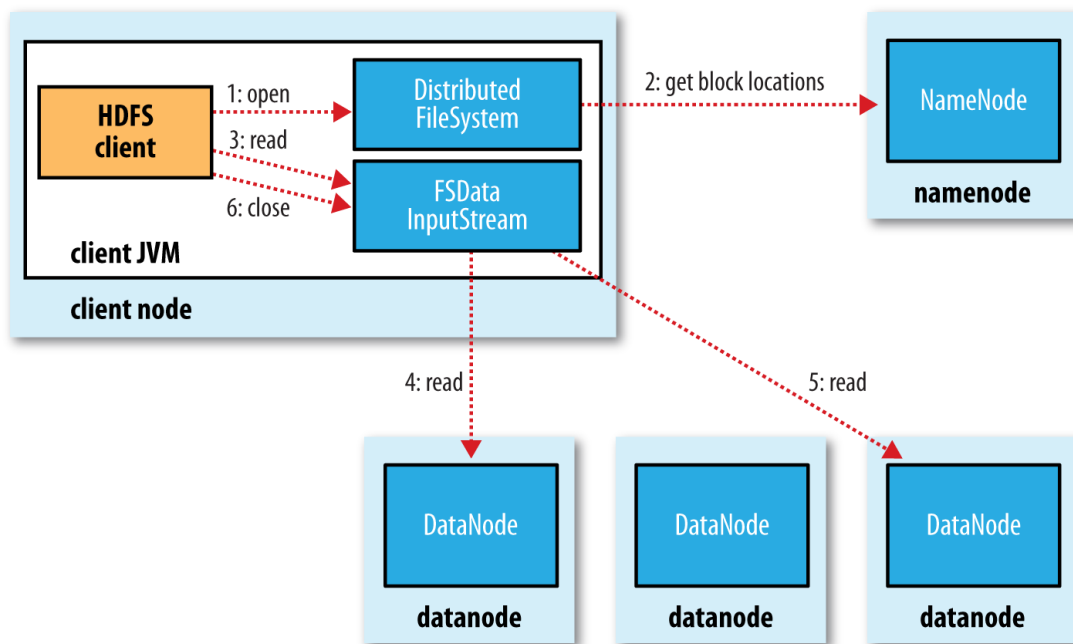


Figura 2.5: Diagramma delle operazioni eseguite nella lettura di un file in HDFS[8]

## Processo di lettura di file in HDFS

Per avere un quadro completo del funzionamento di HDFS, è utile osservare come avvenga il processo di lettura di un file. In questa sezione si prende in esame un programma di esempio che utilizza le API `FileSystem` di Hadoop per reimplementare una versione semplificata del comando `cat`, per poi esaminare come le operazioni specificate nel programma vengano effettivamente portate a termine in un'istanza di HDFS.

```
1  import java.io.InputStream;
2  import java.net.URI;
3
4  import org.apache.hadoop.conf.Configuration;
5  import org.apache.hadoop.fs.FileSystem;
6  import org.apache.hadoop.fs.Path;
7  import org.apache.hadoop.io.IOUtils;
8
9  public class MyCat {
10
11      public static void main(String args[]) throws Exception {
12
13          String source = args[0];
14          Configuration conf = new Configuration();
15
16          try(
17              FileSystem sourcefs = FileSystem.get(URI.create(source), conf);
18              InputStream in = sourcefs.open(new Path(source))
19          ) {
20              IOUtils.copyBytes(in, System.out, 4096, false);
21          }
22      }
23  }
```

Listato 2.3: Programma di esempio che reimplementa il comando `cat`.

La reimplementazione del programma `cat` utilizza il primo parametro della linea di comando per ricevere l'URI del file che si vuole stampare nello standard output. L'URI deve contenere il percorso di rete del filesystem HDFS, ed essere quindi del formato `hdfs://[indirizzo o hostname del namenode]/[path del file]`. Di seguito vengono spiegati i passi eseguiti dal programma. Quando non qualificato, l'identificativo `hadoop` si riferisce al package Java `org.apache.hadoop`.

1. Si crea un oggetto `hadoop.conf.Configuration`. Gli oggetti `Configuration` forniscono l'accesso ai parametri di configurazione di Hadoop (impostati in file XML, come descritto in [Installazione e Configurazione](#)).



2. Si ottiene un riferimento `sourcefs` a un `hadoop.fs.FileSystem` (dichiarato come interfaccia Java), che fornisce le API che verranno usate per leggere e manipolare il filesystem. Il riferimento viene ottenuto tramite il metodo statico `FileSystem.get(Uri source, Configuration conf)`, che richiede un URI che possa essere utilizzato per risalire a quale filesystem si vuole accedere. Un overload di `FileSystem.get` permette di specificare solo l'oggetto `Configuration`, e ottiene le informazioni sul filesystem da aprire dalla proprietà di configurazione `dfs.defaultFS`.
3. Si apre il file in lettura, chiamando `sourcefs.open(Path file)`. Il metodo restituisce un oggetto di tipo `hadoop.fs.FSDataInputStream`, una sottoclasse di `java.io.InputStream` che supporta anche l'accesso a punti arbitrari del file. In questo caso l'oggetto è utilizzato per leggere il file sequenzialmente, e il suo riferimento viene salvato nella variabile `InputStream in`.
4. Si copiano i dati dallo stream `in` a `System.out`, di fatto stampando i dati nella console. Questa operazione è eseguita tramite il metodo `hadoop.io.IOUtils.copyBytes(InputStream in, OutputStream out, int bufferSize, boolean closeStream)`. Il metodo copia i dati da uno stream d'ingresso a uno d'uscita, e non ha funzioni specifiche rispetto ad Hadoop, ma viene fornito per la mancanza di un meccanismo simile in Java.
5. Lo stream e l'oggetto `FileSystem` vengono chiusi. L'operazione avviene implicitamente utilizzando il costrutto `try-with-resources` di Java.

L'esecuzione del programma dà il seguente output:

```
$~ hadoop MyCat hdfs://sandbox.hortonworks.com:8020/example/example1.txt
This is the first example file
```

Nel caso di un URI con schema HDFS, l'istanza concreta di `FileSystem` che viene restituita da `FileSystem.get` è di tipo `DistributedFileSystem`, che contiene le funzionalità necessarie a comunicare con HDFS. Con uno schema diverso (ad esempio `file`), l'istanza concreta di `FileSystem` cambia per gestire opportunamente lo schema richiesto (se supportato).

Dietro le quinte, `FSDataInputStream`, restituito da `FileSystem.open(...)`, utilizza chiamate a procedure remote sul namenode per ottenere le posizioni dei primi blocchi del file. Per ogni blocco, il namenode restituisce gli indirizzi dei datanode che lo contengono, ordinati in base alla prossimità del client. Se il client stesso è uno dei datanode che contiene un blocco da leggere, il blocco viene letto localmente.

Alla prima chiamata di `read()` su `FSDataInputStream`, l'oggetto si connette al `DataNode` che contiene il primo blocco del file, e lo richiede (nell'esempio, `read` viene chiamato da `IOUtils.copyBytes`). Il `DataNode` risponde inviando i dati corrispondenti al blocco, fino al termine di questi. Al raggiungimento della fine di un blocco, `FSDataInputStream` termina la connessione con il `DataNode` corrente e ne inizia un'altra con il più prossimo dei `DataNode` che contiene il blocco successivo.

In caso di errore dovuto al fallimento di un DataNode o alla ricezione di un blocco di dati corrotto, il client può ricevere il blocco dal nodo successivo della lista dei DataNode contenenti il blocco ricevuta dal NameNode.

I blocchi del file non vengono inviati tutti insieme, e il client deve periodicamente richiedere al NameNode i dati sui blocchi successivi. Questo avviene trasparentemente rispetto al client, che si limita a chiamare `read` su `DFSInputStream`.

Le comunicazioni di rete, in questo meccanismo, sono distribuite su tutto il cluster. Il NameNode riceve richieste che riguardano solo i metadati dei file, mentre il resto delle connessioni viene eseguito direttamente tra client e DataNode. Questo approccio permette ad HDFS di evitare colli di bottiglia dovuti a un punto di connessione ai client centralizzato, e di distribuire le comunicazioni di rete attraverso i vari nodi del cluster.

## YARN

HDFS è la parte di Hadoop che si occupa di gestire lo storage distribuito. La computazione distribuita è gestita da YARN, in termini di gestione delle risorse e di esecuzione.

YARN è acronimo di Yet Another Resource Negotiator, ed è l'insieme di API su cui sono implementati framework di programmazione distribuita di livello più alto, come MapReduce e Spark. YARN si definisce un "*negotiator*" perché è l'entità che decide quando e come le risorse del cluster debbano essere allocate per l'esecuzione distribuita, e che gestisce le comunicazioni che riguardano le risorse con tutti i nodi coinvolti. Inoltre, YARN ha l'importante ruolo di esporre un'interfaccia che permette di imporre **vincoli di località** sulle risorse richieste dalle applicazioni, permettendo l'implementazione di applicazioni che seguono il principio di *data locality* di Hadoop.

I servizi di YARN sono offerti tramite *demoni* eseguiti nei nodi del cluster. Ci sono due tipi di demoni in YARN:

- i **NodeManager**, che eseguono su richiesta i processi necessari allo svolgimento dell'applicazione nel cluster. L'esecuzione dei processi avviene attraverso *container*, che permettono di limitare le risorse utilizzate da ogni processo eseguito. Il NodeManager viene eseguito in ogni nodo del cluster che prende parte alle computazioni distribuite.
- il **ResourceManager**, di cui è eseguita un'istanza per cluster, e che gestisce le sue risorse. Il ResourceManager è l'entità che comunica con i NodeManager e che decide quali processi questi debbano eseguire e quando.

I container in YARN possono essere rappresentativi di diverse modalità di esecuzione di un processo, configurabili dall'utente tramite la proprietà `yarn.nodemanager.container-executor.class`, il cui valore identifica una classe che stabilisce come i processi debbano essere eseguiti. Di default, l'esecuzione utilizza normali processi UNIX, ma la configurazione permette l'uso di container di virtualizzazione OS-level, come `lxc` e `Docker`.

L'esecuzione di applicazioni distribuite in YARN è richiesta dai client al ResourceManager. Quando il ResourceManager decide di avviare un'applicazione, alloca un container in uno dei NodeManager, e vi esegue il primo processo di ogni programma YARN, che viene definito **application master**.

L'application master è specificato dalle applicazioni, ed ha i seguenti ruoli[9]:

- negoziare l'acquisizione di nuovi container con il ResourceManager nel corso dell'applicazione;
- utilizzare i container per eseguire i processi distribuiti di cui è costituita l'applicazione;
- monitorare lo stato e il progresso dell'esecuzione dei processi nei container.

Il modello di richiesta delle risorse da parte di YARN permette di specificare dettagliatamente le risorse necessarie

## Parte 3

# Batch Processing

Il Batch Processing è la *raison d'être* di Hadoop. Il primo paradigma di programmazione per Hadoop, MapReduce, è stato l'unico per molte release, e ha avuto il grande merito di astrarre la complessità della computazione batch in ambiente distribuito in funzioni che associano chiavi e valori a risultati, una grande semplificazione rispetto ai programmi che gestiscono granularmente l'intricatezza di ambienti distribuiti.

Pur essendo popolare, MapReduce è soggetto a molte limitazioni, che riguardano soprattutto la necessità di esprimere i programmi da eseguire con un modello che non lascia molto spazio alla rielaborazione dei risultati. Come si vedrà, queste limitazioni sono intrinseche al fatto che i risultati intermedi vengano salvati nello storage locale del nodo del cluster, e quelli finali in HDFS. Questi due fattori influenzano pesantemente le prestazioni che si possono ottenere da un algoritmo, perché vi introducono l'overhead della lettura e scrittura nel disco, o peggio in HDFS.

YARN è stato creato proprio per questo motivo: permettere che altri modelli di computazione diversi da MapReduce potessero essere eseguiti sfruttando HDFS. Le nuove versioni di MapReduce sono implementate al di sopra di YARN invece che direttamente in Hadoop, a testimoniare l'effettiva capacità di YARN di generalizzare i modelli di esecuzione nei cluster.

La sua alternativa più popolare, Apache Spark, ha API più espressive e funzionali rispetto a MapReduce, ed è più performante in molti tipi di algoritmi[10]. Tramite astrazioni che offrono un controllo più preciso sul comportamento dei risultati dell'elaborazione, Spark trova applicazioni pratiche in vari ambiti, tra cui machine learning[11], graph processing[12] e elaborazione SQL[13].

In questa sezione si esaminano MapReduce e Spark, quali sono le limitazioni di MapReduce che hanno fatto sentire la necessità di un nuovo modello computazionale, e quali sono le soluzioni offerte da Spark. Si accenneranno anche ad alcune astrazioni fatte al di sopra di MapReduce, come Pig e Hive, che forniscono dei modelli computazionali che vengono tradotti in job MapReduce.

## MapReduce

Il modello computazionale di MapReduce è composto, nella sostanza, da due componenti, il Mapper e il Reducer. Questi componenti sono specificati dall'utilizzatore del framework, e possono essere descritti come due funzioni.

$$Map(K_1, V_1) \mapsto Sequence[(K_2, V_2)]$$

La funzione *Map* è eseguita nello stadio iniziale della computazione su valori di input esterni. L'input della funzione *Map* è una coppia chiave-valore  $K_1$  e  $V_1$ , i cui valori dipendono dal tipo di input letto. Ad esempio, nei file di testo,  $K_1$  rappresenta il numero di riga di un file e  $V_1$  la riga di testo corrispondente.

A partire da ogni coppia, *Map* elabora e restituisce una sequenza di nuove coppie chiave-valore di tipo  $K_2$  e  $V_2$ . Queste coppie vengono poi rielaborate trasparentemente dal framework, che esegue due operazioni:

1. **ordina** tutte le coppie in base alla chiave;
2. **aggrega** le coppie che condividono la stessa chiave in una nuova coppia  $(K_2, Sequence[V_2])$ .

$$Reduce(K_2, Sequence[V_2]) \mapsto (K_2, V_3)$$

Ognuna delle coppie aggregate dal framework viene poi fornita in input alla funzione *Reduce*, che ha quindi a disposizione una chiave  $K_2$  e tutti i valori restituiti da *Map* che hanno la stessa chiave  $K_2$ . *Reduce* esegue una computazione sui valori di input e restituisce  $(K_2, V_3)$ , che andrà a far parte dell'output finale dell'applicazione assieme al risultato delle altre invocazioni di *Reduce*, una per ogni chiave distinta restituita da *Map*.

Sintetizzando, MapReduce permette di categorizzare l'input in diverse parti e di elaborare un risultato per ognuna di queste.

MapReduce è quindi un paradigma *funzionale*, dato che il framework richiede di ricevere in input le funzioni utili all'elaborazione dei dati. Per esprimere questo tipo di paradigma in Java si ricorre a classi che incapsulano le funzioni richieste dal framework, che vengono quindi chiamate Mapper e Reducer.

Il Mapper in un'applicazione MapReduce è una classe contenente un metodo `void map`, che riceve in input una chiave e un valore, e un oggetto `Context`, il cui ruolo più importante è fornire il metodo `Context.write(K, V)`, che viene utilizzato per scrivere i valori di output del Mapper.

Le applicazioni MapReduce specificano un proprio Mapper estendendo la classe `Mapper` nella libreria di Hadoop, e compilando i tipi dei parametri generici opportunamente. La firma di `Mapper` è la seguente:

```
public class Mapper<KEYIN, VALUEIN, KEYOUT, VALUEOUT> extends Object
```

Le chiavi e i valori ricevuti in input dal Mapper sono derivati direttamente dall'elemento letto in HDFS. È possibile configurare quali chiavi e valori vengano derivati dalla sorgente e come, creando una classe che implementa l'interfaccia `InputMapper` fornita nella libreria di Hadoop. Nella libreria, Hadoop fornisce diversi `InputMapper` che corrispondono a comportamenti di lettura desiderabili per diversi tipi di file e sorgenti, come file con formati colonnari, o contenuti coppie chiave-valore divise da marcatori.

I tipi ricevuti in input dal Mapper sono specificati nei parametri generici `KEYIN` e `VALUEIN`, e devono corrispondere ai tipi che l'`InputFormat` di riferimento restituisce. `KEYOUT` e `VALUEOUT` sono invece i tipi che il Mapper restituisce rielaborando le chiavi e i valori in input. `map` ha la seguente signature:

```
protected void map(KEYIN key, VALUEIN value, Context context)
    throws IOException, InterruptedException
```

Una volta restituiti dal Mapper, le coppie vengono date in input a una classe `Reducer`, che ha una signature simile a quella del Mapper:

```
public class Reducer<KEYIN, VALUEIN, KEYOUT, VALUEOUT> extends Object
```

Una classe che estende `Reducer` ha un metodo `reduce`, che riceve in input una chiave, e un iterabile di tutti i valori restituiti dai Mapper che hanno quella stessa chiave:

```
protected void reduce(KEYIN key, Iterable<VALUEIN> values, Context context)
    throws IOException, InterruptedException
```

Nella fase di `reduce`, quindi, i valori sono aggregati in base alla chiave e resi disponibili tramite l'interfaccia `Iterable` di Java. I valori a questo punto possono essere combinati a seconda dell'esigenza dell'utente per restituire un risultato finale.

## Esempio di un programma MapReduce

Come esempio di programma per MapReduce, si prende in considerazione l'analisi di log di un web server. Il dataset su cui si esegue l'elaborazione è fornito liberamente dalla NASA[14], e corrisponde ai log di accesso al server HTTP del Kennedy Space Center dal 1/07/1995 al 31/07/1995. Il log è un file di testo con codifica ASCII, dove ogni riga corrisponde a una richiesta e contiene le seguenti informazioni:

1. L'host che esegue la richiesta, sotto forma di hostname quando disponibile o indirizzo IP altrimenti;
2. Timestamp della richiesta, in formato "WEEKDAY MONTH DAY HH:MM:SS YYYY" e fuso orario, con valore fisso -0400;
3. La Request-Line HTTP tra virgolette;
4. Il codice HTTP di risposta;
5. La dimensione in byte della risposta.

```
ntp.almaden.ibm.com - - [24/Jul/1995:12:40:12 -0400]
  "GET /history/apollo/apollo.html HTTP/1.0" 200 3260

fsd028.osc.state.nc.us - - [24/Jul/1995:12:40:12 -0400]
  "GET /shuttle/missions/missions.html HTTP/1.0" 200 8678
```

Listato 3.1: Campione di due righe dal log da analizzare

A partire da questo log, si vuole capire quante richieste siano state ricevute da ogni risorsa HTTP. Un possibile approccio alla risoluzione del problema è eseguire il parsing di ogni riga del log nel Mapper utilizzando un'espressione regolare, per estrarre l'URI dalla richiesta. Il Mapper, per ogni riga, restituisce l'URI come chiave e 1 come valore.

Dopo l'esecuzione dei Mapper, i Reducer riceveranno una coppia formata dall'URI delle richieste come chiave, e da un iterabile di valori 1, uno per ogni richiesta. È sufficiente sommare questi valori per ottenere il numero di richieste finale per l'URI chiave.

Come si può osservare da [lst. 3.2](#), i tipi utilizzati dal Mapper non sono tipi standard Java, ma sono forniti dalla libreria. Hadoop utilizza un suo formato di serializzazione per lo storage e per la trasmissione dei dati in rete, diverso dalla serializzazione integrata in Java. In questo modo il framework ha controllo preciso sulla fase di serializzazione, un fattore importante data la crucialità in termini di efficienza di elaborazione che questa può avere. Le funzionalità di serializzazione di Hadoop sono rese accessibili dagli oggetti serializzabili tramite l'interfaccia `hadoop.io.Writable`. Le classi `LongWritable` e `Text` sono dei wrapper sui tipi `long` e `String` che implementano l'interfaccia `Writable`, e i valori contenuti in questi tipi possono essere ottenuti rispettivamente con `LongWritable.get()` e `Text.toString()`<sup>1</sup>.

Nel Mapper, si utilizza l'espressione regolare `/.*" [A-Z]+ (.*) HTTP.*/` per ottenere il token contenente l'URI della richiesta, e tramite `context.write` si restituisce la coppia URI e 1.

Il Reducer, mostrato in [lst. 3.3](#), prende in input nel suo metodo `reduce` i valori aggregati in base alla chiave. Una volta sommati in una variabile accumulatore, questi vengono scritti in output in una coppia URI-accumulatore. L'insieme di tutte le coppie restituite dal Reducer costituiscono l'output finale del programma, che vengono scritte in un file di testo separando le chiavi dai valori con caratteri di tabulazioni, e ogni valore di restituzione con un nuova riga.

Prima di poter eseguire l'applicazione, è necessario creare un esecutore, ovvero una classe contenente un punto d'entrata `main` che utilizzi le API di Hadoop per eseguire il programma, analogamente a come descritto in [Esecuzione di software in Hadoop](#). I lavori MapReduce sono configurati tramite l'oggetto `hadoop.mapreduce.Job`, che richiede di specificare le classi da utilizzare come Mapper e Reducer, assieme ai percorsi dei file da elaborare. L'esecutore dell'analizzatore di log è mostrato in [lst. 3.4](#).

---

<sup>1</sup>Le classi definite dagli utenti possono implementare a loro volta l'interfaccia `Writable` per essere supportate come tipi di chiavi e valori nei Mapper e nei Reducer.

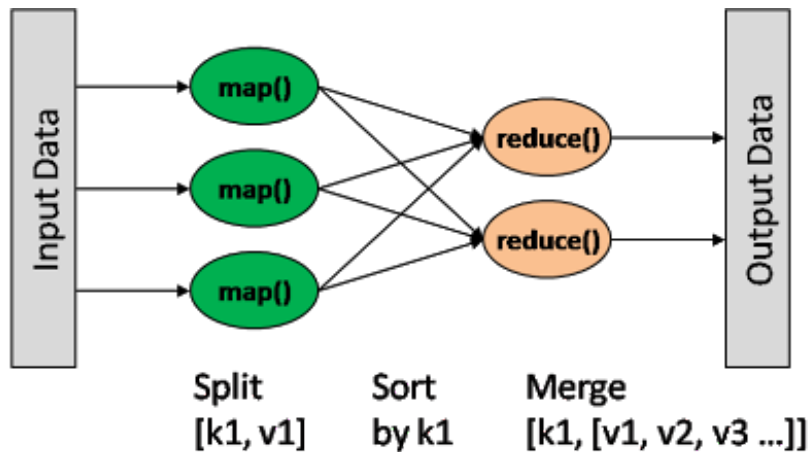


Figura 3.1: Diagramma di funzionamento di MapReduce[15]

L'oggetto `job` è il centro della configurazione del programma MapReduce. Tramite questo si specificano il `jar` contenente le classi dell'applicazione, il nome del Job, utilizzato per mostrare descrittivamente nei log e nell'interfaccia web lo stato di completamento di questo, le classi Mapper e Reducer e i tipi dei valori di output del Reducer. Vengono impostati anche i path del file di input e dei file di output, utilizzando i valori ricevuti come parametri in `args`. Il job viene effettivamente eseguito alla chiamata di `job.waitForCompletion(bool verbose)`, che restituisce `true` quando questo va a buon fine.

Al termine della compilazione e pacchettizzazione, il programma può essere eseguito con il comando `hadoop`:

```
$ hadoop LogAnalyzer /example/NASA_access_log_Jul95 /example/LogAnalyzerOutput
```

Il metodo `job.waitForCompletion` è stato invocato con il parametro `verbose` impostato a `true`, per cui l'esecuzione stampa in output un log sul job in esecuzione. Lo stato di esecuzione dei job è anche consultabile tramite un'interfaccia web fornita dal framework.

```
17/07/03 18:17:47 INFO Configuration.deprecation: session.id is deprecated.
    Instead, use dfs.metrics.session-id
17/07/03 18:17:47 INFO jvm.JvmMetrics: Initializing JVM Metrics with
    processName=JobTracker, sessionId=
17/07/03 18:17:47 WARN mapreduce.JobResourceUploader: Hadoop command-line
    option parsing not performed. Implement the Tool interface and execute
    your application with ToolRunner to remedy this.
17/07/03 18:17:48 INFO input.FileInputFormat: Total input files to process : 1
17/07/03 18:17:48 INFO mapreduce.JobSubmitter: number of splits:2
17/07/03 18:17:48 INFO mapreduce.JobSubmitter: Submitting tokens for
    job: job_local954245035_0001
17/07/03 18:17:48 INFO mapreduce.Job: The url to track the job: http://localhost:8080/
17/07/03 18:17:48 INFO mapreduce.Job: Running job: job_local954245035_0001
17/07/03 18:17:48 INFO mapred.LocalJobRunner: OutputCommitter set in config null
```



...

Al termine dell'esecuzione, i risultati sono disponibili in HDFS nella cartella `/example/LogAnalyzerOutput`, come specificato nei parametri d'esecuzione. I risultati si trovano in una cartella perché questi sono composti da più file, uno per ogni Reducer eseguito parallelamente dal framework. In questo caso, il job è stato eseguito da un solo reducer, per cui i risultati si trovano in un unico file.

Eseguendo `ls` nella cartella di output si può effettivamente verificare la presenza del file prodotto dal Reducer.

```
$ hadoop fs -ls /example/LogAnalyzerOutput
```

```
Found 2 items
```

```
-rw-r--r--  3 heygent hdfs          0 2017-07-03 18:17 /example/.../_SUCCESS
-rw-r--r--  3 heygent hdfs    804597 2017-07-03 18:17 /example/.../part-r-0000
```

Assieme al risultato della computazione, MapReduce salva un file vuoto chiamato `_SUCCESS`, di cui si può verificare la presenza in HDFS per capire se il job è andato a buon fine. Consultando il file, si può osservare il risultato della computazione eseguita.

...

```
/elv/DELTA/del181.gif  71
/elv/DELTA/del181s.gif 390
/elv/DELTA/deline.gif  84
/elv/DELTA/delseps.jpg 90
/elv/DELTA/delta.gif   1492
/elv/DELTA/delta.htm   267
/elv/DELTA/deprev.htm  71
/elv/DELTA/dsolids.jpg 84
/elv/DELTA/dsolidss.jpg 369
/elv/DELTA/euve.jpg    36
/elv/DELTA/euves.jpg   357
/elv/DELTA/rosat.jpg   38
/elv/DELTA/rosats.jpg  366
/elv/DELTA/uncons.htm  163
```

...

```

import java.io.IOException;
import java.util.regex.Matcher;
import java.util.regex.Pattern;

import org.apache.hadoop.mapreduce.Mapper;
import org.apache.hadoop.io.LongWritable;
import org.apache.hadoop.io.Text;

public class LogMapper extends Mapper<LongWritable, Text, Text, LongWritable> {

    private final static Pattern logPattern = Pattern.compile(
        ".*\"[A-Z]+ (.*) HTTP.*"
    );

    private final static LongWritable one = new LongWritable(1);

    @Override
    protected void map(LongWritable key, Text value, Context context)
        throws IOException, InterruptedException {

        final String request = value.toString();
        final Matcher requestMatcher = logPattern.matcher(request);

        if(requestMatcher.matches()) {
            context.write(
                new Text(requestMatcher.group(1)),
                one
            );
        }
    }
}

```

Listato 3.2: Implementazione del Mapper utilizzato per analizzare il file di log.

```

import org.apache.hadoop.io.LongWritable;
import org.apache.hadoop.io.Text;
import org.apache.hadoop.mapreduce.Reducer;

import java.io.IOException;

public class LogReducer extends Reducer<Text, LongWritable, Text, LongWritable> {
    @Override
    protected void reduce(Text key, Iterable<LongWritable> values, Context context)
        throws IOException, InterruptedException {

        long accumulator = 0;

        for(LongWritable value: values) {
            accumulator += value.get();
        }

        context.write(key, new LongWritable(accumulator));
    }
}

```

Listato 3.3: Implementazione del Reducer per il programma di analisi dei log.

```

import org.apache.hadoop.fs.Path;
import org.apache.hadoop.io.LongWritable;
import org.apache.hadoop.io.Text;
import org.apache.hadoop.mapreduce.Job;
import org.apache.hadoop.mapreduce.lib.input.FileInputFormat;
import org.apache.hadoop.mapreduce.lib.output.FileOutputFormat;

public class LogAnalyzer {

    public static void main(String args[]) throws Exception {
        if(args.length != 2) {
            System.err.println("Usage: LogAnalyzer <input path> <output path>");
        }

        Job job = Job.getInstance();
        job.setJarByClass(LogAnalyzer.class);
        job.setJobName("LogAnalyzer");

        FileInputFormat.addInputPath(job, new Path(args[0]));
        FileOutputFormat.setOutputPath(job, new Path(args[1]));

        job.setMapperClass(LogMapper.class);
        job.setReducerClass(LogReducer.class);

        job.setOutputKeyClass(Text.class);
        job.setOutputValueClass(LongWritable.class);

        System.exit(job.waitForCompletion(true) ? 0 : 1);
    }
}

```

Listato 3.4: Esecutore dell'analizzatore di log.

## Efficienza di MapReduce

Il modello di programmazione di MapReduce è progettato per essere altamente parallelizzabile e in modo che sia possibile processare diverse parti dell'input indipendentemente. Questo dato si riflette nel design del Mapper, che riceve come input piccole porzioni del file letto, permettendo al framework di assegnare l'elaborazione delle operazioni di Map a diversi processi indipendenti.

MapReduce è implementato in YARN, e utilizza le sue astrazioni per avvantaggiarsi della località dei dati, eseguendo i processi che riguardano una certa porzione di input nei nodi che contengono i corrispondenti blocchi HDFS.

I file vengono partizionati da MapReduce in frammenti chiamati *split*, e per ognuno di questi MapReduce esegue un *map task* in un determinato nodo del cluster. Ogni map task può eseguire uno o più processi nel nodo in cui si trova, a seconda delle risorse assegnate da YARN.

La dimensione degli split è configurabile, e non corrisponde necessariamente alla dimensione di un blocco HDFS, pur essendo questa l'opzione di default. Con split della stessa dimensione dei blocchi, la maggior parte dei dati può essere processata dai nodi che contengono il blocco nel loro storage locale. È possibile configurare MapReduce per utilizzare split più grandi, ma se una parte dello split non si trova nel nodo in cui viene eseguito il map task, questa deve essere ricevuta tramite rete da un altro nodo nel cluster che la contiene, con conseguente overhead.

In ogni *map task*, lo split corrispondente viene diviso in più *record*, che corrispondono alle coppie ricevute in input dal Mapper<sup>[7]</sup>. Il map task esegue il Mapper in uno o più processi del nodo in cui si trova, per poi salvare il loro output nello storage locale del nodo che esegue il map task.

Una volta terminati i map task, il framework esegue i *reduce task*. Prima di eseguire l'operazione di reduce,

## Spark

Le astrazioni fornite dal paradigma computazionale di MapReduce tolgono dall'utente l'onere di pensare al dataset in elaborazione, astraendo l'applicazione a una serie di elaborazioni su chiavi e valori. Questa astrazione ha tuttavia un costo: l'utente non ha il controllo sulla gestione del flusso dei dati, che è gestita interamente dal framework.

Il costo della semplificazione diventa evidente quando si cerca di utilizzare MapReduce per eseguire operazioni che richiedono la rielaborazione di risultati. Al termine di ogni job MapReduce, questi vengono salvati in HDFS, ed è quindi necessario rileggerli dal filesystem per poterli riutilizzare.

Di per sé, MapReduce non contiene un meccanismo che permetta la schedulazione consecutiva di job che ricevono in input l'output di un altro job, e per eseguire elaborazioni che richiedono più fasi è necessario utilizzare tool esterni.

Inoltre, l'overhead della lettura e scrittura in HDFS è alto, e MapReduce non fornisce metodi per rielaborare i dati nella memoria centrale prima della scrittura in HDFS.

Il creatore di Spark, Matei Zaharia[16], ha posto questo problema come dovuto alla mancanza di *primitive efficienti per la condivisione di dati* in MapReduce. Per come le interfacce di MapReduce sono poste, sarebbe anche difficile crearne di nuove, data la mancanza di un'API che sia rappresentativa del dataset invece che delle singole chiavi e valori.

Infine, la scrittura dei risultati delle computazioni in HDFS è necessaria per fornire fault-tolerance sui risultati delle computazioni, che andrebbero persi nel caso di un fallimento di un nodo che mantiene i risultati nella memoria centrale. Per poter avere

Spark si propone come alternativa a MapReduce, con l'intenzione di dare una soluzione a questi problemi. Le soluzioni derivano da un approccio funzionale alla computazione, sfruttando strutture dati immutabili per rappresentare i dataset e API che utilizzano funzioni di ordine superiore per esprimere concisamente le computazioni. L'astrazione principale del modello di Spark è il Resilient Distributed Dataset, o RDD, che rappresenta una collezione immutabile di record di cui è composto un dataset distribuito o una sua rielaborazione.

Spark è scritto in Scala, e la sua esecuzione su Hadoop è gestita da YARN. YARN non è l'unico motore di esecuzione di Spark, che può essere eseguito anche su Apache Mesos o in modalità standalone, su cluster Spark dedicati. Le API client di Spark sono disponibili in Scala, Java e Python.

Spark dispone anche di una modalità interattiva, in cui l'utente interagisce con il framework tramite una shell REPL Scala o Python. Questa modalità permette la prototipazione rapida di applicazioni, e abilita l'utilizzo di paradigmi come l'**interactive data mining**, che consiste nell'eseguire analisi sui dataset in via esploratoria, scegliendo quali operazioni intraprendere mano a mano che si riceve il risultato delle elaborazioni precedenti.

## Interfaccia di Spark

I Resilient Distributed Dataset sono degli oggetti che rappresentano un dataset distribuito. Gli RDD possono essere creati a partire da HDFS, sfruttando la data locality per la lettura, o da un qualunque elemento iterabile. La creazione degli RDD è eseguita da un oggetto SparkContext, che

(3)

L'API di Spark consiste di un oggetto SparkSession,

Tabella 3.1: Alcune trasformazioni supportate da Spark

Trasformazione	Risultato
map(fun)	Restituisce un nuovo RDD passando ogni elemento della sorgente a fun.

Trasformazione	Risultato
<code>filter(fun)</code>	Restituisce un RDD formato dagli elementi che fun mappa in true.
<code>union(dataset)</code>	Restituisce un RDD che contiene gli elementi della sorgente uniti con quelli di dataset.
<code>intersection(dataset)</code>	Restituisce un RDD contenente gli elementi comuni alla sorgente e a dataset
<code>distinct([numTasks]))</code>	Restituisce un RDD contenente gli elementi del dataset senza ripetizioni

## **Parte 4**

# **Stream Processing**

**Kafka**

**Spark Streaming**

**Storm**



# Bibliografia

1. Gartner Survey Highlights Challenges to Hadoop Adoption, <http://www.gartner.com/newsroom/id/3051717>
2. Hadoop Market Forecast 2017-2022, <https://www.marketanalysis.com/?p=279>
3. The Digital Universe of Opportunities: Rich Data and the Increasing Value of the Internet of Things, <https://www.emc.com/leadership/digital-universe/2014iview/executive-summary.htm>
4. Apache Hadoop Documentation, <https://hadoop.apache.org/>
5. Hadoop Ubuntu Packagers PPA, <https://launchpad.net/~hadoop-ubuntu/+archive/ubuntu/stable>
6. AUR - Hadoop, <https://aur.archlinux.org/packages/hadoop/>
7. MapR-FS Overview, <https://mapr.com/products/mapr-fs/>
8. White, T.: Hadoop: The Definitive Guide. (2015)
9. HortonWorks - Apache Hadoop YARN, <https://it.hortonworks.com/apache/yarn/>
10. Shi, J., Qiu, Y., Farooq Minhas, U., Jiao, L., Wang, C., Reinwald, B., Ozcan, F.: Clash of the Titans: MapReduce vs. Spark for Large Scale Data Analytics, <http://www.vldb.org/pvldb/vol8/p2110-shi.pdf>
11. Spark MLlib, <https://spark.apache.org/mllib/>
12. Spark GraphX, <https://spark.apache.org/graphx/>
13. Spark SQL, <https://spark.apache.org/sql/>
14. HTTP Logs from the KSC-NASA, <http://ita.ee.lbl.gov/html/contrib/NASA-HTTP.html>
15. How Hadoop Map/Reduce works.
16. Matei, Z.: Resilient Distributed Datasets: A Fault-Tolerant Abstraction for In-Memory Cluster Computing.