Librería Distribuida para Arrays

Procesamiento Concurrente y Distribuido

CC4P1 Programación Concurrente y Distribuida

André Pacheco, Arbues Perez, Sergio Pezo

Julio 2025

Agenda

o

- Objetivo del Proyecto
- Arquitectura y Diseño
- Implementación
- Protocolo de Comunicación
- Ejemplos de Operaciones
- Replicación y Recuperación
- Tolerancia a Fallos
- Demostración
- Conclusiones

Objetivo del Proyecto

o

Desarrollar una librería distribuida

- Arrays distribuidos: `DArrayInt` y `DArrayDouble`

Objetivo del Proyecto

o

Desarrollar una librería distribuida

- Arrays distribuidos: `DArrayInt` y `DArrayDouble`
- Procesamiento concurrente y paralelo

Objetivo del Proyecto

o

Desarrollar una librería distribuida

- Arrays distribuidos: `DArrayInt` y `DArrayDouble`
- Procesamiento concurrente y paralelo
- Comunicación por sockets TCP nativos

Objetivo del Proyecto

o

Desarrollar una librería distribuida

- Arrays distribuidos: `DArrayInt` y `DArrayDouble`
- Procesamiento concurrente y paralelo
- Comunicación por sockets TCP nativos
- Sin frameworks externos

Objetivo del Proyecto

o

Desarrollar una librería distribuida

- Arrays distribuidos: `DArrayInt` y `DArrayDouble`
- Procesamiento concurrente y paralelo
- Comunicación por sockets TCP nativos
- Sin frameworks externos
- Tolerancia a fallos básica

Objetivo del Proyecto

Desarrollar una librería distribuida

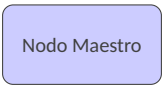
- Arrays distribuidos: `DArrayInt` y `DArrayDouble`
- Procesamiento concurrente y paralelo
- Comunicación por sockets TCP nativos
- Sin frameworks externos
- Tolerancia a fallos básica

Implementaciones

- Java 8+
- Python 3.6+
- TypeScript (Cliente)

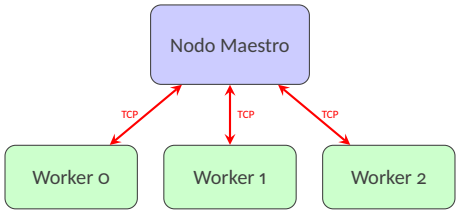
Arquitectura del Sistema

- o



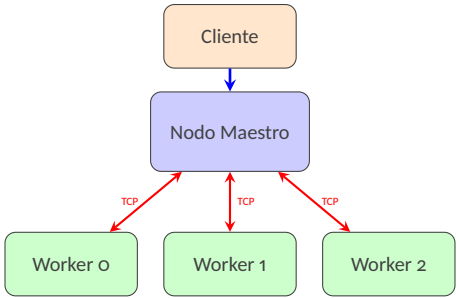
Arquitectura del Sistema

o



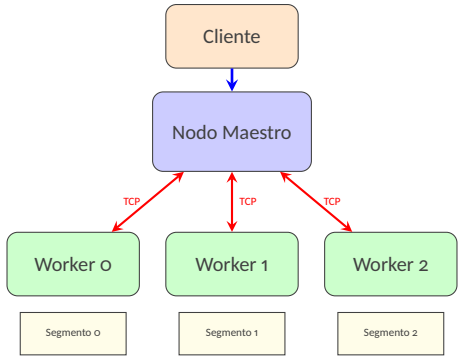
Arquitectura del Sistema

o



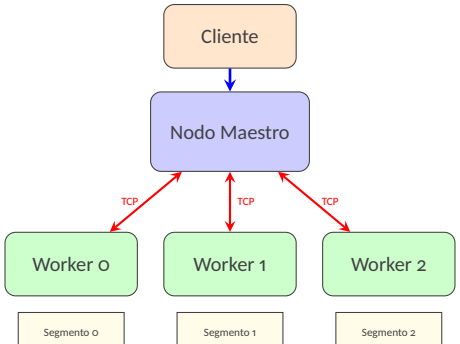
Arquitectura del Sistema

o



Arquitectura del Sistema

o



Características

- Arquitectura maestro-trabajador
- Distribución automática de datos
- Comunicación bidireccional

Implementación - Estructura

o

Java

- `MasterNode.java`

Python / TypeScript

- `master_node.py`

Implementación - Estructura

o

Java

- `MasterNode.java`
- `WorkerNode.java`

Python / TypeScript

- `master_node.py`
- `worker_node.py`

Implementación - Estructura

o

Java

- `MasterNode.java`
- `WorkerNode.java`
- `DArrayInt.java`
- `DArrayDouble.java`

Python / TypeScript

- `master_node.py`
- `worker_node.py`
- `darray.py`

Implementación - Estructura

o

Java

- `MasterNode.java`
- `WorkerNode.java`
- `DArrayInt.java`
- `DArrayDouble.java`
- `Message.java`

Python / TypeScript

- `master_node.py`
- `worker_node.py`
- `darray.py`
- `message.py`

Implementación - Estructura

o

Java

- `MasterNode.java`
- `WorkerNode.java`
- `DArrayInt.java`
- `DArrayDouble.java`
- `Message.java`
- `DistributedArrayClient.java`

Python / TypeScript

- `master_node.py`
- `worker_node.py`
- `darray.py`
- `message.py`
- `distributed_array_client.py`

Implementación - Estructura

o

Java

- MasterNode.java
- WorkerNode.java
- DArrayInt.java
- DArrayDouble.java
- Message.java
- DistributedArrayClient.java

Python / TypeScript

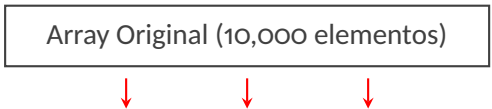
- master_node.py
- worker_node.py
- darray.py
- message.py
- distributed_array_client.py
- DistributedArrayClient.ts

Segmentación de Arrays

- Array Original (10,000 elementos)

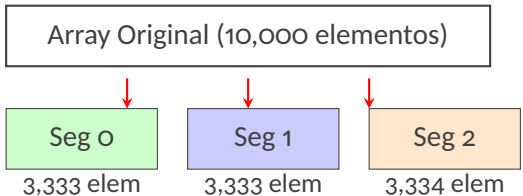
Segmentación de Arrays

- o



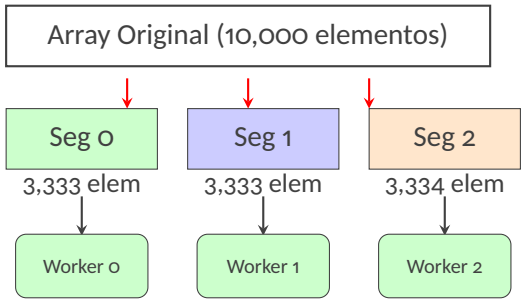
Segmentación de Arrays

o



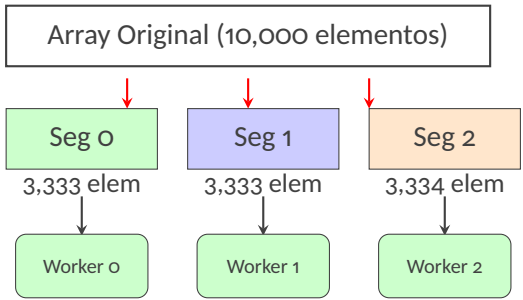
Segmentación de Arrays

o



Segmentación de Arrays

o



Algoritmo de Segmentación

- División equitativa: $\frac{\text{total}}{\text{workers}}$
- Manejo de residuo distribuido
- Asignación round-robin

Protocolo de Comunicación

o

Formato JSON

```
{
  type: MESSAGE_TYPE,
  from: NODE_ID,
  to: NODE_ID,
  timestamp: 1234567890,
  data: {},
  status: OK
}
```

Protocolo de Comunicación

o

Formato JSON

```
{
  type: MESSAGE_TYPE,
  from: NODE_ID,
  to: NODE_ID,
  timestamp: 1234567890,
  data: {},
  status: OK
}
```

Tipos de Mensajes

- `REGISTER_WORKER` - Registro de trabajador

Protocolo de Comunicación

o

Formato JSON

```
{
  type: MESSAGE_TYPE,
  from: NODE_ID,
  to: NODE_ID,
  timestamp: 1234567890,
  data: {},
  status: OK
}
```

Tipos de Mensajes

- `REGISTER_WORKER` - Registro de trabajador
- `DISTRIBUTE_ARRAY` - Distribución de segmentos

Protocolo de Comunicación

o

Formato JSON

```
{
  type: MESSAGE_TYPE,
  from: NODE_ID,
  to: NODE_ID,
  timestamp: 1234567890,
  data: {},
  status: OK
}
```

Tipos de Mensajes

- `REGISTER_WORKER` - Registro de trabajador
- `DISTRIBUTE_ARRAY` - Distribución de segmentos
- `PROCESS_SEGMENT` - Orden de procesamiento

Protocolo de Comunicación

o

Formato JSON

```
{
  type: MESSAGE_TYPE,
  from: NODE_ID,
  to: NODE_ID,
  timestamp: 1234567890,
  data: {},
  status: OK
}
```

Tipos de Mensajes

- `REGISTER_WORKER` - Registro de trabajador
- `DISTRIBUTE_ARRAY` - Distribución de segmentos
- `PROCESS_SEGMENT` - Orden de procesamiento
- `HEARTBEAT` - Verificación de salud

Protocolo de Comunicación

o

Formato JSON

```
{
  type: MESSAGE_TYPE,
  from: NODE_ID,
  to: NODE_ID,
  timestamp: 1234567890,
  data: {},
  status: OK
}
```

Tipos de Mensajes

- `REGISTER_WORKER` - Registro de trabajador
- `DISTRIBUTE_ARRAY` - Distribución de segmentos
- `PROCESS_SEGMENT` - Orden de procesamiento
- `HEARTBEAT` - Verificación de salud
- `REPLICATE_DATA` - Replicación de segmento

Protocolo de Comunicación

o

Formato JSON

```
{
  type: MESSAGE_TYPE,
  from: NODE_ID,
  to: NODE_ID,
  timestamp: 1234567890,
  data: {},
  status: OK
}
```

Tipos de Mensajes

- `REGISTER_WORKER` - Registro de trabajador
- `DISTRIBUTE_ARRAY` - Distribución de segmentos
- `PROCESS_SEGMENT` - Orden de procesamiento
- `HEARTBEAT` - Verificación de salud
- `REPLICATE_DATA` - Replicación de segmento
- `RECOVER_DATA` - Recuperación de fallo

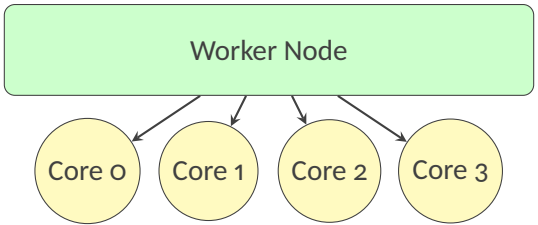
Procesamiento Paralelo

- o

Worker Node

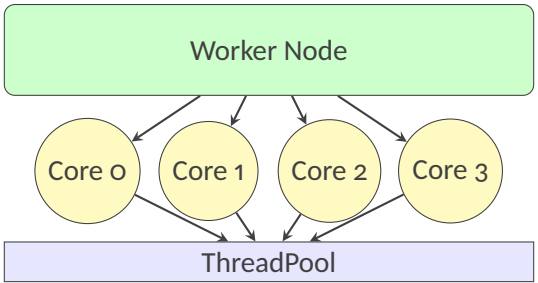
Procesamiento Paralelo

o



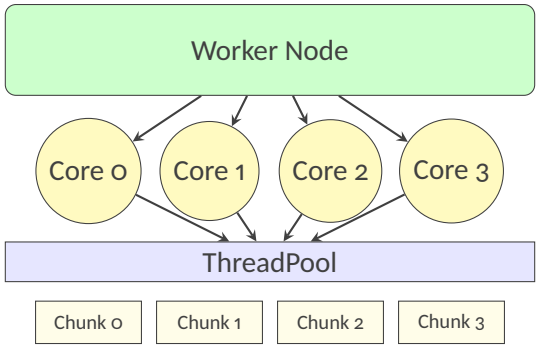
Procesamiento Paralelo

o



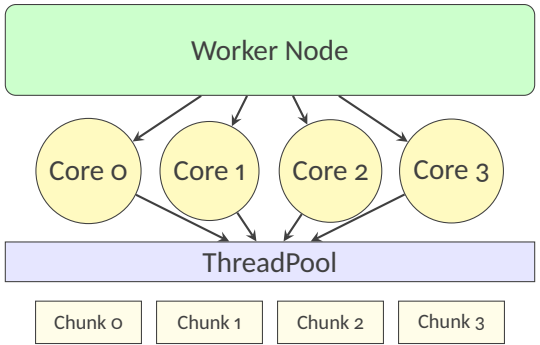
Procesamiento Paralelo

o



Procesamiento Paralelo

o



Estrategia

- Detección automática de núcleos: `Runtime.availableProcessors()`
- División del segmento en chunks
- Procesamiento concurrente con ThreadPool
- Sincronización mediante `Future<T>`

Ejemplo 1: Operaciones Matemáticas

o

Fórmula

$$\text{resultado} = \frac{(\sin(x) + \cos(x))^2}{\sqrt{|x|} + 1}$$

Ejemplo 1: Operaciones Matemáticas

o

Fórmula

$$\text{resultado} = \frac{(\sin(x) + \cos(x))^2}{\sqrt{|x|} + 1}$$

Implementación Java

- Procesamiento paralelo con ThreadPool
- División del segmento en chunks
- Cada thread procesa su chunk independientemente

Ejemplo 1: Operaciones Matemáticas

o

Fórmula

$$\text{resultado} = \frac{(\sin(x) + \cos(x))^2}{\sqrt{|x|} + 1}$$

Implementación Java

- Procesamiento paralelo con ThreadPool
- División del segmento en chunks
- Cada thread procesa su chunk independientemente

Implementación Python

- Uso de ThreadPoolExecutor
- NumPy para operaciones vectorizadas
- Procesamiento concurrente por chunks

Ejemplo 2: Evaluación Condicional

o

Condición

Si $x \bmod 3 = 0$ o $500 \leq x \leq 1000$:

$$\text{resultado} = (x \cdot \log(x)) \bmod 7$$

Ejemplo 2: Evaluación Condicional

o

Condición

Si $x \bmod 3 = 0$ o $500 \leq x \leq 1000$:

$$\text{resultado} = (x \cdot \log(x)) \bmod 7$$

Procesamiento

- Evaluación condicional para cada elemento
- Aplicación de transformación logarítmica
- Preservación de valores que no cumplen condición

Ejemplo 2: Evaluación Condicional

o

Condición

Si $x \bmod 3 = 0$ o $500 \leq x \leq 1000$:

$$\text{resultado} = (x \cdot \log(x)) \bmod 7$$

Procesamiento

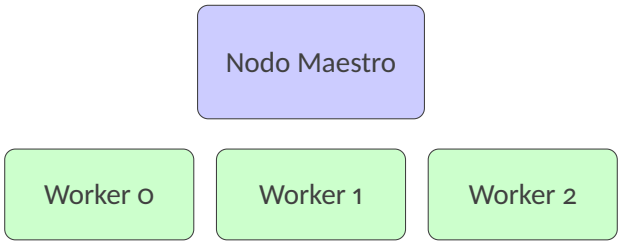
- Evaluación condicional para cada elemento
- Aplicación de transformación logarítmica
- Preservación de valores que no cumplen condición

Resiliencia

- Manejo de excepciones por thread
- Continuación ante fallos parciales
- Consolidación de resultados válidos

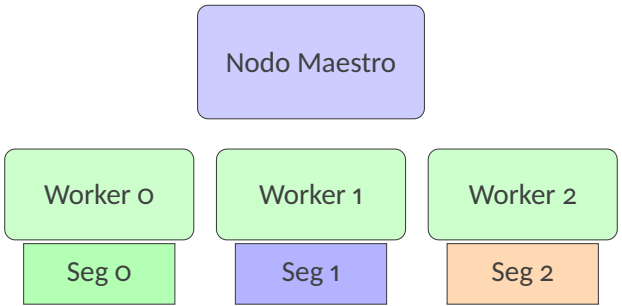
Replicación de Datos

o



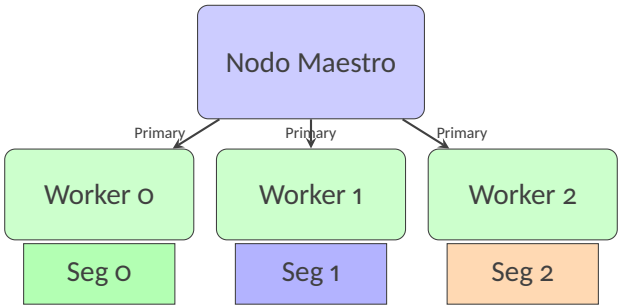
Replicación de Datos

o



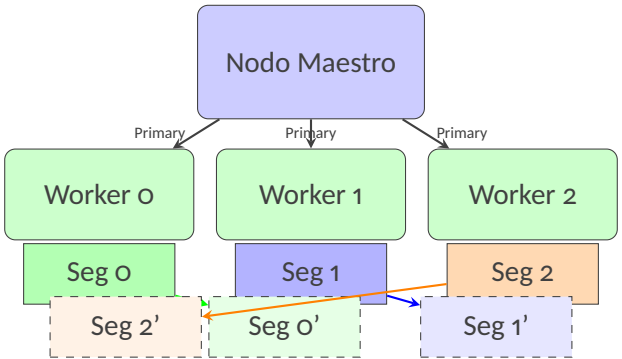
Replicación de Datos

o



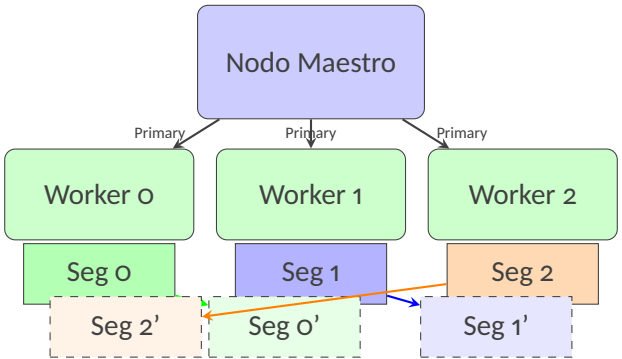
Replicación de Datos

o



Replicación de Datos

o



Factor de replicación = 2 (primario + 1 réplica)

Mecanismo de Recuperación

o

Detección de Fallos

1. Heartbeat timeout (10s)

Mecanismo de Recuperación

o

Detección de Fallos

1. Heartbeat timeout (10s)
2. Worker marcado como caído

Mecanismo de Recuperación

o

Detección de Fallos

1. Heartbeat timeout (10s)
2. Worker marcado como caído
3. Activar proceso de recuperación

Mecanismo de Recuperación

o

Detección de Fallos

1. Heartbeat timeout (10s)
2. Worker marcado como caído
3. Activar proceso de recuperación

Promoción de Réplicas

1. Identificar segmentos afectados
2. Promover réplicas a primarias
3. Actualizar mapeos de segmentos

Mecanismo de Recuperación

o

Detección de Fallos

1. Heartbeat timeout (10s)
2. Worker marcado como caído
3. Activar proceso de recuperación

Creación de Nuevas Réplicas

1. Seleccionar workers disponibles
2. Replicar datos desde primario
3. Mantener factor de replicación

Promoción de Réplicas

1. Identificar segmentos afectados
2. Promover réplicas a primarias
3. Actualizar mapeos de segmentos

Mecanismo de Recuperación

o

Detección de Fallos

1. Heartbeat timeout (10s)
2. Worker marcado como caído
3. Activar proceso de recuperación

Creación de Nuevas Réplicas

1. Seleccionar workers disponibles
2. Replicar datos desde primario
3. Mantener factor de replicación

Promoción de Réplicas

1. Identificar segmentos afectados
2. Promover réplicas a primarias
3. Actualizar mapeos de segmentos

Redistribución

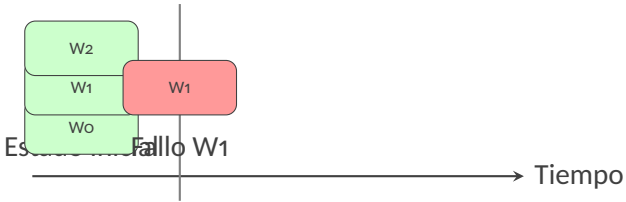
1. Balancear carga entre workers
2. Evitar sobrecarga de nodos
3. Optimizar uso de recursos

Ejemplo 3: Recuperación ante Fallos

- o

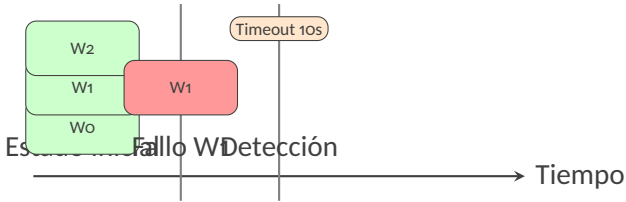
Ejemplo 3: Recuperación ante Fallos

- o



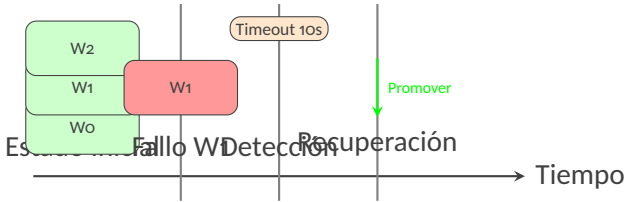
Ejemplo 3: Recuperación ante Fallos

o



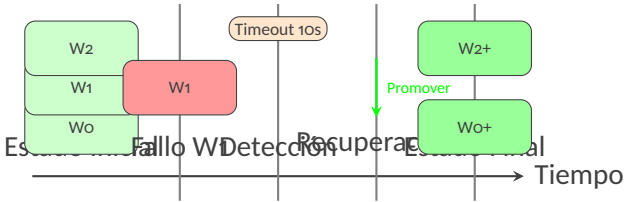
Ejemplo 3: Recuperación ante Fallos

o



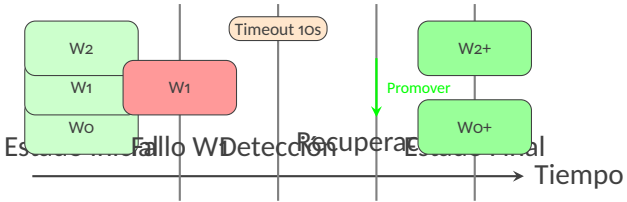
Ejemplo 3: Recuperación ante Fallos

o



Ejemplo 3: Recuperación ante Fallos

o



Proceso Automático

- Sin pérdida de datos
- Continuidad del servicio
- Transparente para el cliente

Demostración - Recuperación Automática

o

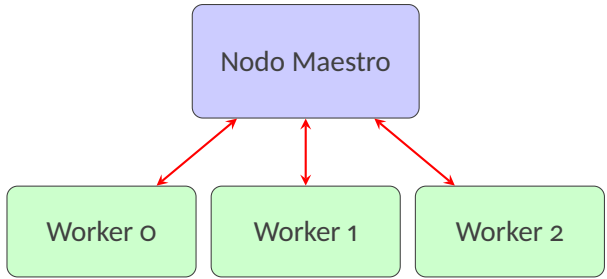
```
$ ./test-recovery.sh
=== Distributed Array Recovery Test ===
Starting Master node on port 5000
Starting Worker-1
Starting Worker-2
Starting Worker-3

=== Creating distributed array ===
Create array response: {status:created,arrayId:myArray}
INFO: Replicated segment 0 to worker-2
INFO: Replicated segment 100 to worker-3
INFO: Replicated segment 200 to worker-1

=== Simulating Worker-2 failure ===
Worker-2 has been terminated!
WARNING: Worker worker-2 failed health check
ERROR: Handling failure of worker: worker-2
```

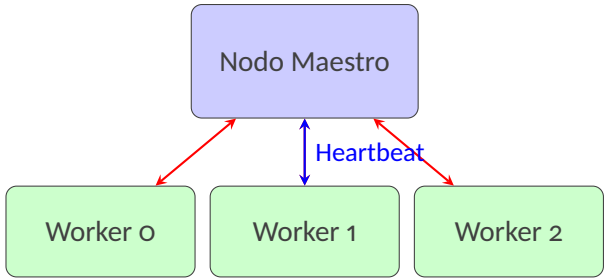
Tolerancia a Fallos

- o



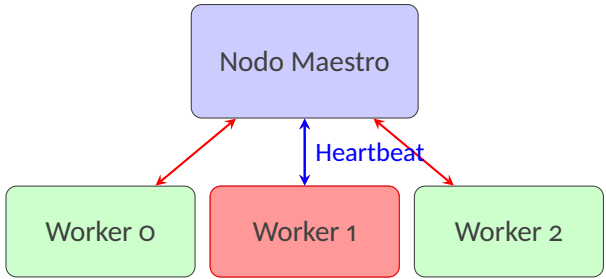
Tolerancia a Fallos

o



Tolerancia a Fallos

o

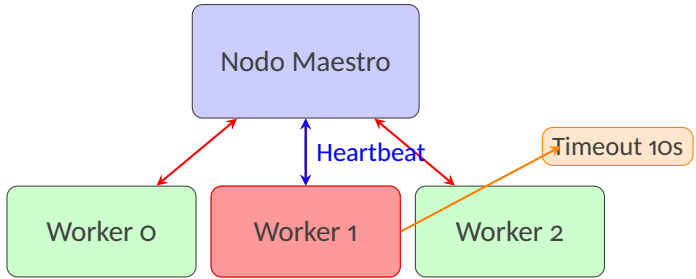


cada 3s

× Sin respuesta

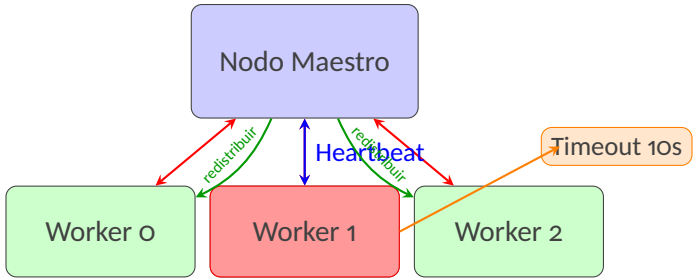
Tolerancia a Fallos

o



Tolerancia a Fallos

o

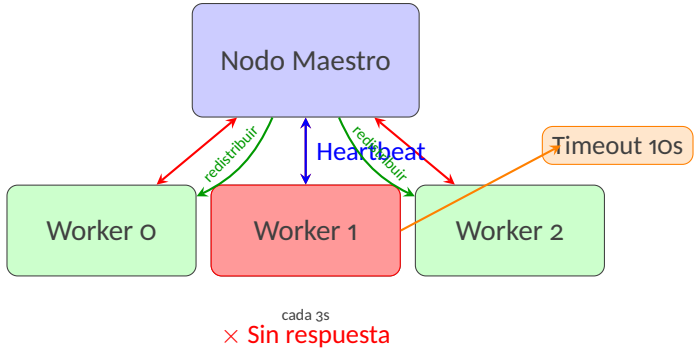


cada 3s

× Sin respuesta

Tolerancia a Fallos

o



Sistema de Tolerancia a Fallos

- Heartbeat: verificación cada 3 segundos
- Detección: timeout de 10 segundos
- Replicación: factor 2 (primario + réplica)

Demostración - Inicio del Cluster

o

```
$ ./start-java-cluster.sh
Starting Java distributed array cluster...
Starting master node on port 5000...
Master node PID: 12345
Starting worker-0...
Worker-0 PID: 12346
Starting worker-1...
Worker-1 PID: 12347
Starting worker-2...
Worker-2 PID: 12348

Java cluster started successfully!
Master node running on port 5000
3 worker nodes connected
```

Cliente TypeScript

o

Características

- Cliente completo en TypeScript/Node.js

Cliente TypeScript

o

Características

- Cliente completo en TypeScript/Node.js
- Compatible con clusters Java y Python

Cliente TypeScript

o

Características

- Cliente completo en TypeScript/Node.js
- Compatible con clusters Java y Python
- Interfaz CLI idéntica

Cliente TypeScript

o

Características

- Cliente completo en TypeScript/Node.js
- Compatible con clusters Java y Python
- Interfaz CLI idéntica
- Comunicación asíncrona con Promises

Cliente TypeScript

o

Características

- Cliente completo en TypeScript/Node.js
- Compatible con clusters Java y Python
- Interfaz CLI idéntica
- Comunicación asíncrona con Promises
- Tipado fuerte con interfaces

Cliente TypeScript

o

Características

- Cliente completo en TypeScript/Node.js
- Compatible con clusters Java y Python
- Interfaz CLI idéntica
- Comunicación asíncrona con Promises
- Tipado fuerte con interfaces

Ejemplo de uso

```
$ npm start -- localhost 5000
Connected to master at localhost:5000
Enter commands (type help for usage, exit to quit):
> create-double ts-array 5000
Create array response:  {status:created}
> apply ts-array example1
Apply operation response:  {status:processing}
```

Demostración - Cliente Interactivo

o

```
$ java -cp out:lib/* client.DistributedArrayClient localhost 5000
Connected to master at localhost:5000
Enter commands (type help for usage, exit to quit):
> create-double math-array 10000
Create array response: {type:OPERATION_COMPLETE,
  data:{arrayId:math-array,status:created}}

> apply math-array example1
Apply operation response: {type:OPERATION_COMPLETE,
  data:{status:processing}}

> get math-array
Get result response: {type:OPERATION_COMPLETE,
  data:{status:complete,result:Operation completed}}
```

Logs del Sistema

o

```
master.log
INFO: Master node started on port 5000
INFO: Worker registered: worker-0 from 127.0.0.1
INFO: Worker registered: worker-1 from 127.0.0.1
INFO: Worker registered: worker-2 from 127.0.0.1
INFO: Received array creation request: math-array (10000 elements)
INFO: Array segmented: 3 segments distributed
INFO: Processing operation: example1 on math-array

worker-0.log
INFO: Registered with master node
INFO: Received double array segment: math-array with 3333 elements
INFO: Processing Example 1 using 4 threads
INFO: Completed Example 1 processing for math-array
INFO: Sent result to master
```

Rendimiento y Escalabilidad

o

Paralelización

- Uso de todos los núcleos

Rendimiento y Escalabilidad

o

Paralelización

- Uso de todos los núcleos
- ThreadPool eficiente

Rendimiento y Escalabilidad

o

Paralelización

- Uso de todos los núcleos
- ThreadPool eficiente
- División automática de trabajo

Rendimiento y Escalabilidad

o

Paralelización

- Uso de todos los núcleos
- ThreadPool eficiente
- División automática de trabajo

Distribución

- Segmentación equitativa
- Comunicación asíncrona
- Procesamiento independiente

Rendimiento y Escalabilidad

o

Paralelización

- Uso de todos los núcleos
- ThreadPool eficiente
- División automática de trabajo

Distribución

- Segmentación equitativa
- Comunicación asíncrona
- Procesamiento independiente

Métricas (10,000 elementos)

- 1 worker: 250ms
- 2 workers: 140ms
- 3 workers: 95ms
- 4 workers: 75ms

Rendimiento y Escalabilidad

o

Paralelización

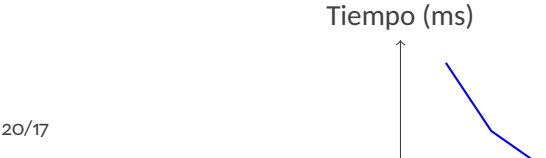
- Uso de todos los núcleos
- ThreadPool eficiente
- División automática de trabajo

Distribución

- Segmentación equitativa
- Comunicación asíncrona
- Procesamiento independiente

Métricas (10,000 elementos)

- 1 worker: 250ms
- 2 workers: 140ms
- 3 workers: 95ms
- 4 workers: 75ms



Conclusiones

o

Logros

- Librería funcional en Java, Python y TypeScript

Conclusiones

o

Logros

- Librería funcional en Java, Python y TypeScript
- Procesamiento verdaderamente distribuido

Conclusiones

o

Logros

- Librería funcional en Java, Python y TypeScript
- Procesamiento verdaderamente distribuido
- Paralelización efectiva por nodo

Conclusiones

o

Logros

- Librería funcional en Java, Python y TypeScript
- Procesamiento verdaderamente distribuido
- Paralelización efectiva por nodo
- Sistema completo de replicación y recuperación

Conclusiones

o

Logros

- Librería funcional en Java, Python y TypeScript
- Procesamiento verdaderamente distribuido
- Paralelización efectiva por nodo
- Sistema completo de replicación y recuperación
- Sin dependencias de frameworks externos

Conclusiones

o

Logros

- Librería funcional en Java, Python y TypeScript
- Procesamiento verdaderamente distribuido
- Paralelización efectiva por nodo
- Sistema completo de replicación y recuperación
- Sin dependencias de frameworks externos
- Interoperabilidad entre lenguajes

Aplicaciones

- Procesamiento de grandes conjuntos de datos
- Cálculos científicos distribuidos
- Análisis de datos en paralelo

Conclusiones

o

Logros

- Librería funcional en Java, Python y TypeScript
- Procesamiento verdaderamente distribuido
- Paralelización efectiva por nodo
- Sistema completo de replicación y recuperación
- Sin dependencias de frameworks externos
- Interoperabilidad entre lenguajes

Aplicaciones

- Procesamiento de grandes conjuntos de datos
- Cálculos científicos distribuidos
- Análisis de datos en paralelo

Características Avanzadas Implementadas

Preguntas

o

Gracias por su atención

GitHub: `https://github.com/A-PachecoT/distributed-array-lib`