Cloud Computing

Trabalho Prático - Sistemas Distribuídos

Universidade do Minho, Departamento de Informática
Rodrigo Monteiro, Diogo Abreu, Filipa Pinto, e Flávio Silva
{a100706, a100646, a96862, a97352}@alunos.uminho.pt

1. Introdução

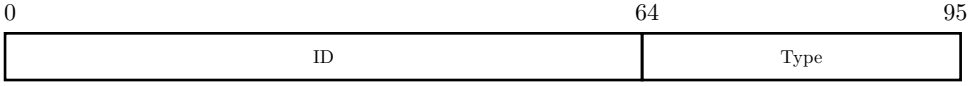
Neste projeto, implementamos um serviço de *cloud computing* com funcionalidade *Function-as-a-Service:* clientes enviam código de tarefas de computação para um servidor principal, que faz uma distribuição para outros servidores, especializados na execução de tarefas, de acordo com a memória necessária para execução, e de acordo com as configurações de memória desses servidores – a que chamamos *workers*.

Para isso, utilizamos a linguagem Java, *threads* e *sockets* TCP, respeitando os seguintes requisitos: uma única conexão entre cada duas máquinas envolvidas; um protocolo de comunicação em formato binário; e cada *thread* do servidor associada a apenas um *socket*. E tendo como objetivos minimizar o número *threads* acordadas, diminuir a contenção e assegurar que não ocorre *starvation*.

Implementamos, também, interfaces simples para o cliente e para os *workers* com o padrão *Model-View-Controller*.

2. Protocolo

Todas as mensagens protocolares definidas começam com dois campos: um identificador, ID, e o tipo de mensagem. Sendo o ID do tipo primitivo `long`, e o tipo da mensagem identificado através de um `int`.



Assim, todas as classes que representam as mensagens protocolares são subclasses de uma classe `Packet`, que possui os atributos `id`, e `PacketType` – uma interface que o tipo de mensagem tem de implementar.

```
public abstract class Packet {
  private final long id;
  private final PacketType type;
    // ...
public interface PacketType {
  int getValue();
  static void serialize(PacketType type, DataOutputStream out)
    {out.writeInt(type.getValue());}
  static <T extends Enum<T> & PacketType> T (DataInputStream in, Class<T> enumType)
    { /* ... */ }
}
```

Decidimos agrupar os métodos de serialização e deserialização em classes próprias. Caso os métodos fossem implementados nas subclasses de `Packet`, estes seriam úteis se fossem `static`, o que não resultaria com herança, e levaria a repetição de código.

```
public class ClientPacketDeserializer implements Deserializer {
  public Packet deserialize(DataInputStream in) throws IOException { ... }
}
```

2.1. **Client packets**

Os clientes enviam pacotes do tipo *Registration, Login, Job,* e *Status*. Podem fazer um registo, fornecendo um nome único e uma palavra-passe, ou podem efetuar login (o login só é permitido, se não houver uma sessão iniciada noutra conexão). Depois disso, podem enviar pedidos de execução de tarefas, verificar pedidos enviados ou recebidos, ou fazer logout.

- Registration e Login
  - *Name:* Nome único do cliente (tamanho variável)
  - *Password:* Palavra-passe relativa ao registo (tamanho variável)
- Logout
- Job request
  - *Required memory:* Memória necessária para executar o código da tarefa (8 bytes)
  - *Data length:* Comprimento do array de bytes (8 bytes)
  - *Data:* Array de bytes que representa o código da tarefa (tamanho variável)
- Status request

2.2. **Server packets**

O servidor principal é responsável por receber e gerir os pedidos de registo, login e logout, tal como gerir uma fila de tarefas, e a distribuição destas através das conexões com os *workers*.

- Information (enviado para os clientes)
  - *Memory limit:* Limite máximo de memória que uma tarefa pode ter (8 bytes)
  - *Total memory:* Memória total, isto é, a soma da memória dos servidores conectados (8 bytes)
  - *Used memory:* Memória a ser utilizada pelos servidores (8 bytes)
  - *Queue size:* Tamanho da fila de tarefas (4 bytes)
  - *Nº connections:* Número de clientes conectados (4 bytes)
  - *Nº workers* Número de servidores conectados (4 bytes)
  - *Nº workers waiting:* Número de servidores à espera de tarefas (4 bytes)
- Job request (enviado para os *workers*)
  - *Client name:* Nome do cliente que enviou o pedido de execução da tarefa (tamanho variável)
  - *Required memory:* Memória necessária para executar o código (8 bytes)
  - *Data length:* Comprimento do array de bytes (8 bytes)
  - *Data:* Array de bytes que representa o código da tarefa (tamanho variável)
- Job result (enviado para os clientes)
  - *Result status:* Indica se foi possível executar a tarefa (4 bytes)

  - *Error message:* Caso não tenha sido possível executar a tarefa, é enviada a mensagem de erro produzida (tamanho variável)
  - *Data length:* Tamanho do output produzido (8 bytes)
  - *Data:* Array de bytes do output (tamanho variável)
- Status (enviado para os clientes)
  - *Status:* Identificador do estado de um pedido do cliente (4 bytes)

2.3. Worker packets

Um *worker* envia inicialmente um pedido de *Connection*, e é responsável por receber pedidos de execução de tarefas, executar as tarefas e enviar os resultados para o servidor principal. Por fim, envia um pedido de *Disconnection*, para informar o servidor principal que deixa de estar disponível.

- Connection
  - *Memory:* Memória disponível do servidor para a execução de tarefas. (8 bytes)
  - *Nº threads:* Número de worker threads. (4 bytes)
- Disconnection
- Job Result
  - *Client name:* Nome do cliente que pediu a execução da tarefa (tamanho variável)
  - *Result status:* Identifica se foi possível executar a tarefa (4 bytes)
  - *Error message:* Caso não tenha sido possível executar a tarefa, é enviada a mensagem de erro produzida (tamanho variável)
  - *Data length:* Tamanho do output produzido (8 bytes)
  - *Data:* Array de bytes do output (tamanho variável)

3. Implementação

3.1. Client

A classe `Client` implementa a seguinte interface, *ClientAPI*:

```
public interface ClientAPI {
  void createRegistration(String name, String password);
  long sendRegistration() throws IOException;
  long sendLogin() throws IOException;
  long sendLogout() throws IOException;
  long sendJob(int requiredMemory, byte[] job) throws IOException;
  long sendGetInfo() throws IOException;
  Packet receive(long id) throws IOException, InterruptedException;
  Packet fastReceive(long id) throws IOException, InterruptedException;
  List<Packet> getJobRequests();
  List<Packet> getJobResults();
  void exit() throws IOException;
}
```

Para além disso, possui os atributos: `ClientPacketSerializer` que utiliza para serializar e enviar mensagens para o servidor; `ServerPacketDeserializer` que utiliza para deserializar as mensagens que recebe do servidor; `Demultiplixer` que utiliza para receber mensagens do servidor, organizando-as por ID, permitindo que se espere por uma ou mais mensagens com um ID específico; `JobManager` que utiliza para ler a diretoria com o código das tarefas, e para guardar os resultados recebidos em ficheiros numa dada diretoria; entre outros.

Na implementação, não foi necessário receber mais do que uma mensagem com o mesmo ID. Apesar disso, optamos por utilizar uma `ConditionQueue<Packet>` para cada ID como uma medida proativa para garantir flexibilidade.

3.2. **Server**

3.2.1. Conexões

O servidor principal possui dois tipos de conexões, conexões com clientes, `ClientConnection` e conexões com *workers*, `WorkerConnection`. Ambas são subclasses da classe `Connection`, e, portanto, têm os seguintes atributos e métodos em comum:

```
public abstract class Connection implements Runnable {
  private DataOutputStream out;
  private DataInputStream in;
  private Socket socket;
  private Serializer serializer;
  private Deserializer deserializer;
  protected final SharedState sharedState;
  protected ConditionQueue<Packet> packetsToSend; // output queue
  protected ReentrantLock l;
  protected Thread outputThread; // thread que envia os pacotes da queue
  protected long threadId;
    // ...
  public void sendPackets() { /* ... */}
  public void addPacketToQueue(Packet packet) { /* ... */ }
    // ...
}
```

O método `run` nas subclasses é o que irá receber e tratar devidamente das mensagens.

3.2.2. Gestão das tarefas

Abordamos o problema da implementação distribuída de duas maneiras: uma em que as `WorkerConnection` escolhem retirar tarefas da fila, precisando de ter memória disponível e de adquirir uma `lock`, e outra em que a `SharedState` distribui as tarefas pelas `WorkConnection` de acordo com um critério, com o objetivo de aumentar o desempenho e eficiência.

3.2.2.1. Measure Selector Queue

Nesta versão, utilizamos uma `queue` personalizada a que chamamos `MeasureSelectorQueue`: uma lista duplamente ligada, que adiciona elementos no fim e retira do início, tendo em conta uma determinada condição (se o elemento não verificar a condição a lista é percorrida sequencialmente do primeiro ao último elemento até encontrar um elemento correspondente), e que mantém uma `min-heap` para se encontrar o valor mínimo facilmente, o que é útil para o seguinte método:

```
public boolean isEmpty(long max) { return this.length == 0 || this.min > max; }
```

A partir de uma classe `SharedState`, as instâncias de `ClientConnection` adicionam elementos a essa fila, e as instâncias de `WorkerConnection` removem elementos dessa fila, passando como argumento o seu limite de memória. As `WorkerConnection` adquirem uma tarefa quando têm memória suficiente, e quando conseguem obter uma `lock`. Ou seja, se uma `WorkerConnection` não estiver à espera de ficar com memória livre para uma dada tarefa, vai buscar uma tarefa à fila do `SharedState` quando obtém uma `lock` (não ficará sempre à espera de adquirir uma `lock` pois a ordem de obtenção de `locks` é sequencial).

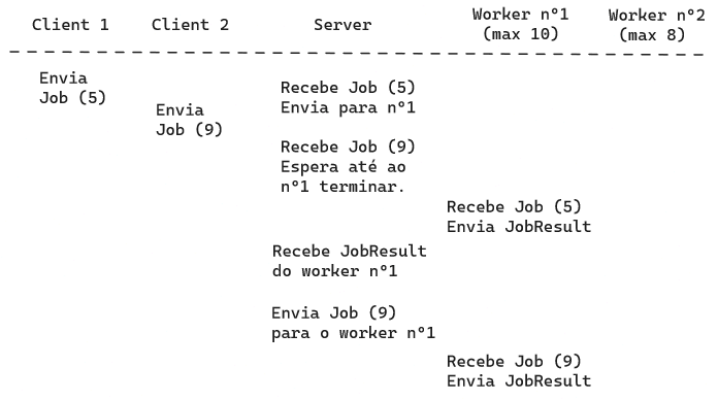
```
// Na classe WorkerConnection
Job job = this.sharedState.dequeueJob(this.maxMemory);
  // ...
while (job.getRequiredMemory() + this.memoryUsed > this.maxMemory)
  this.hasMemory.await();

// Na classe SharedState
public Job dequeueJob(long maxMemory) {
  try {
      this.ljobs.lock();

      while (jobs.isEmpty(maxMemory))
          this.hasJobs.await();

      Job job = this.jobs.poll(maxMemory); // required memory <= max memory
      this.notFull.signal();
        // ...
  } finally { this.ljobs.unlock(); }
}
```

Uma desvantagem desta abordagem, é a obtenção de uma tarefa ser feita pela obtenção da `lock`, podendo acontecer situações deste género:



Uma solução melhor seria o `worker nº2` ficar com a tarefa de memória 5, e o `worker nº1` ficar com a tarefa de memória 9.

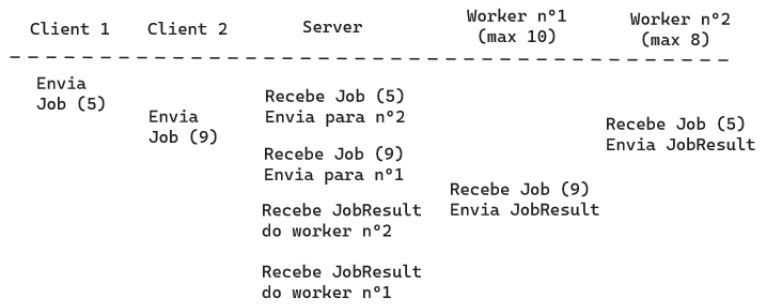
3.2.2.2. Ordered WorkerConnection List

Assim, decidimos que a ordem de obtenção de tarefas seria pela memória limite dos *workers*, isto é, percorre-se uma lista dos *workers* ordenados, parando quando se encontrar um que satisfaça a condição.

```
// Na classe SharedState
private class Entry implements Comparable<Entry> {
  long availableMemory;
  long threadId;
  long availableThreads;
  // ...
}
// ...
public void distributeJobs() {
    // ...
  while (entry == null) {
      for (Entry e : this.sortedEntries)
          if (e.availableMemory >= requiredMemory && e.availableThreads > 0) {
              entry = e;
              break;
          }
      if (entry == null) this.hasMem.await();
  }
    // ...
  connection.enqueueJob(job);
}
```

Cada `WorkerConnection` passou a ter uma `queue` própria, sendo a classe `SharedState` responsável por atribuir as tarefas aos *workers* de acordo com o critério definido. Para além disso, como é possível verificar, tem-se em conta o número de *worker threads* de cada *worker* de modo a não ocorrer sobrecarga, principalmente dos *workers* com pouca memória, isto é, aqueles que são verificados primeiro.

Exemplo anterior, mas com esta abordagem:



3.3. **Worker**

O *worker* é implementado com o padrão MVC, tal como o cliente, e possui uma thread para receber mensagens do servidor, e *worker threads para executar as tarefas recebidas.*

```
while(this.jobs.isEmpty() && this.running) this.hasJobs.await();
packet = this.jobs.poll();
```

Para além deste, é utilizado outro ciclo que, apesar de não ser necessário, achamos interessante expô-lo neste relatório.

```
while (requiredMemory + this.memoryUsed > this.maxMemory
      && this.running && (this.blocking && !blocking)) {
  if (this.blocking) this.hasBlocking.await();
```

```
  else this.hasMemory.await();

  timesWaited += 1;
  if (!this.blocking && timesWaited > this.maxTimesWaited) {
      blocking = true;
      this.blocking = true;
  }
}
```

Não é estritamente necessário pois o servidor apenas envia *packets* quando o *worker* tem memória suficiente. Assim, na implementação atual, é improvável um cenário em que a memória seja insuficiente para executar uma tarefa. No entanto, se a lógica do servidor mudar no futuro, manter esta verificação garante que o trabalhador continue a funcionar corretamente, evitando *starvation* através de `maxTimesWaited` e `blocking`, que impedem que uma tarefa ultrapassada muitas vezes (cenário em que tarefas que requerem menos memória conseguem passar à frente de uma que requere mais memória).

4. **Funcionamento**

– Inicialização do `Client` e do `Worker`

```
 > Enter job directory path:
/home/core/SD/JobExamples
 > Enter job result directory path:
/home/core/SD/JobResults
 > Enter server address:
10.4.4.1
 > Enter server port:
8888
```

```
Enter memory limit:
30
Enter server address:
10.4.4.1
Enter server port:
8888
```

– Registo/ login e listagem de tarefas

```
---------------------------------
  1. Register
  2. Login
  0. Exit
---------------------------------
1
 > Enter username:
Thom Yorke
 > Enter password:
225

Waiting for server response ...
Server response: SUCCESS

---------------------------------
  1. List jobs
  2. List job results
  3. List job requests sent
  4. Get info
  0. Logout
---------------------------------
```

```
1. FibonacciGenerator.class
2. MatrixMultiplication.class
3. PrimeChecker.class

 > Select job to send: [0 - exit]
2
 > Enter required memory:
20
```

– Resultados e status do servidor

```
2

1. Packet { 1, JOB_RESULT, 891 bytes }
```

```
4

Waiting for server response ...
ServerInfoPacket{jobMemoryLimit=30, totalMemory=40, memoryUsed=0, queueSize=0,
 nConnections=1, nWorkers=2, nWorkersWaiting=2}
```

5. Conclusões e trabalho futuro

References

1. Coulouris, G., Dollimore, J., Kindberg, T., Blair, G.: Distributed Systems: Concepts and Design. Pearson Education Limited, Edinburgh Gate, Harlow, Essex, CM20 2JE, England (2012)
2. Herlihy, M., Shavit, N.: The Art of Multiprocessor Programming. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA (2012)