Programação Paralela e Distribuída 2025/2
Laboratório II – Chamada de procedimento Remoto

Prof Breno Krohling - brenokrohling@professor.multivix.edu.br

Objetivo

- Experimentar a implementação de sistemas distribuídos baseados na arquitetura Cliente/Servidor usando o conceito de Chamada de Procedimento Remoto (RPC) nas linguagens Python ou C;
- Alternativamente, explorar a implementação do mesmo sistema usando Java e Invocação de Método Remoto (RMI).

1 Concetitos básicos

Sistemas distribuídos em geral são baseados na troca de mensagens entre processos. Dentre os mecanismos de troca disponíveis, as Chamadas de Procedimento Remoto, ou RPC (Remote Procedure Call) são consideradas um pilar básico para a implementação de boa parte dos Sistemas Distribuídos. Por esse motivo, faz-se necessário um estudo mais aprofundado sobre o método de programação usando RPC.

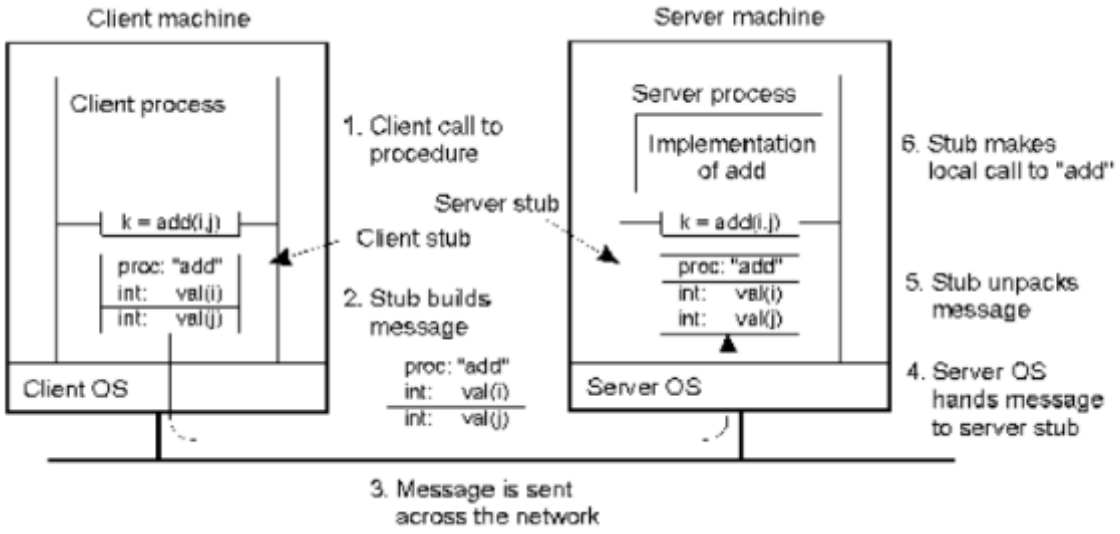
De um modo geral, pode-se dizer que as chamadas de procedimento remoto são idênticas às chamadas de procedimento local, com a exceção de que as funções chamadas ficam residentes em hosts distintos. Nesse contexto, um host executando o programa principal ou cliente aciona uma chamada de procedimento remoto (idêntico ao método de programação estruturada convencional) e ficaria aguardando um resultado. Por outro lado, um outro host, denominado servidor teria as referidas funções em execução no seu espaço de memória e ficaria aguardando requisições para as mesmas. Ao chegar uma requisição, o servidor executa a função identificada e retorna os resultados para o cliente.

Diante do que foi dito, surgem os seguintes questionamentos:

- Como o cliente consegue passar para um outro host seus parâmetros de chamada?
- Como o servidor consegue individualizar cada função e saber qual delas está sendo acionada?
- Que mecanismos os lados cliente e servidor devem possuir para viabilizar chamadas remotas?

2 Princípios da comunicação RPC entre Cliente e Servidor

O objetivo da biblioteca RPC é permitir ao programador uma forma de escrever o seu código de forma similar ao método adotado para a programação convencional. Para isso, a estrutura RPC define um esquema de encapsulamento de todas as funções associadas à conexão remota num pedaço de código chamado de stub. Dessa maneira, o código do usuário terá um comportamento similar ao exemplo que está apresentado na Figura a seguir.



Perceba que, da forma como está apresentado, existirá um stub associado ao código do cliente e outro associado ao código do servidor. Dessa forma, o diálogo dos módulos cliente e servidor acontecerá com ajuda do stub, de acordo com a seguinte sequência:

1. O cliente chama uma função que está implementada no stub do cliente;
2. O stub do cliente constrói uma mensagem e chama o Sistema Operacional local;
3. O sistema operacional do cliente envia a mensagem pela rede para o sistema operacional do host remoto;
4. O sistema operacional remoto entrega a mensagem recebida para o stub instalado no servidor;
5. O stub servidor desempacota os parâmetros e chama a aplicação servidora, mais especificamente, a função associada à função que estava no stub do cliente;
6. O servidor faz o trabalho que deve fazer e retorna o resultado para o stub do servidor;
7. O stub do servidor empacota os dados numa mensagem e chama o sistema operacional local;
8. O sistema operacional do servidor envia a mensagem para o sistema operacional do cliente;

9. O sistema operacional do cliente entrega a mensagem recebida para o stub do cliente;

10. O stub desempacota os resultados e retorna-os para o cliente.

Devido a todos esses passos e mecanismos de encapsulamento, principalmente considerando as funções de rede, a programação RPC é complexa. Algumas linguagens de programação possuem bibliotecas para facilitar a geração de chamadas RPC. Essas bibliotecas contêm ferramentas que auxiliam a geração dos stubs, cabendo ao programador apenas alterar os arquivos relacionados à lógica de execução das aplicações cliente e servidor, tornando a programação RPC mais próxima da programação convencional.

2.1 Linguagem C

Vamos supor que desejamos construir uma aplicação distribuída cujo objetivo é receber, via teclado, dois números inteiros e retornar o resultado da soma e subtração entre esses números. No caso da aplicação distribuída RPC o cliente se encarregará de receber os parâmetros e passá-los ao servidor. Caberá ao servidor executar os cálculos e retornar os resultados para que o cliente possa imprimir na tela do cliente.

No caso de uma aplicação convencional, simpleCalc.c, esse código poderia ser dividido em programa principal e duas funções: add e sub. A transformação deste programa em uma aplicação RPC tem como passo inicial a geração do arquivo de definição de interface (IDF) a partir do código apresentado. Este arquivo tem como objetivo identificar as funcionalidades que devem estar no programa principal e as sub-rotinas que serão acionadas no servidor para execução remota dessas chamadas. Retomando o objetivo deste laboratório, a ideia é fazer com que o programa principal seja executado em um processo (cliente) e as funções add e sub sejam executadas em um outro processo (servidor), e ambos se comuniquem por meio de mensagens de rede em hosts distintos. Para isso, a maneira mais eficiente é lançar mão da ferramenta rpcgen. Essa ferramenta consegue gerar todos os códigos necessários à implementação dos stubs a partir de um arquivo IDF que contém basicamente:

- Definição dos parâmetros que vão ser passados para a(s) chamadas(s) RPC;
- Definição de quais são as funções remotas disponíveis no servidor.

Neste exemplo, a partir do programa simpleCalc.c, pode-se gerar um arquivo IDF cujo nome será, nesse exemplo, rpcCalc.x e terá o conteúdo especificado a seguir:

```
struct operandos {
    int x;
    int y;
};
program PROG {
    version VERSAO {
        int ADD(operandos) = 1;
        int SUB(operandos) = 2;
    } = 100;
} = 5555;
```

No arquivo rpcCalc.x pode-se observar o seguinte:

- A struct operandos é a estrutura de dados contendo os inteiros x e y que vai ser passada para as chamadas de procedimento remoto. Essa definição segue a recomendação de que a passagem de uma única variável (mesmo que composta) é melhor do que passar muitas variáveis individuais;
- A definição program PROG define o identificador do programa como 5555. Ou seja, os processos cliente e servidor terão um número de identificação RPC igual a 5555 que deverá ser reconhecido tanto no host cliente quanto no servidor;
- Além disso, é importante perceber que essa definição traz um número de versão (no caso 100) para esse programa;
- Finalmente, a definição da IDF traz, também, um código de identificação para cada uma das duas rotinas declaradas. Dessa forma, a função add terá código 1 e a função sub terá o código 2;
- Assim, na mensagem RPC enviada por um cliente para um servidor RPC a tupla (5555, 100, 2) identifica uma chamada à função sub (2) na versão 100 do processo servidor Server stub (5555).

Vale observar que a notação IDF não é feita em linguagem C, apesar da similaridade. Uma vez gerado esse arquivo, com extensão .x, pode-se aplicar a ferramenta rpcgen para que os arquivos-fonte em linguagem C dos lados cliente e servidor sejam gerados. O rpcgen possui vários parâmetros de ativação, mas, no caso desse exemplo, vamos utilizar o seguinte:

$rpcgen –a rpcCalc.x

Os arquivos gerados serão os seguintes:

Arquivo	**Significado**
rpcCalc.h	Arquivo com as definições que deverão estar inclusas nos códigos cliente e servidor
rpcCalc_client.c	Arquivo contendo o esqueleto do programa principal do lado cliente
rpcCalc_clnt.c	Arquivo contendo o stub do cliente
rpcCalc_xdr.c	Contém as funções xdr necessárias para a conversão dos parâmetros a serem passados entre hosts
rpcCalc_svc.c	Contém o programa principal do lado servidor
rpcCalc_server.c	Contém o esqueleto das rotinas a serem chamadas no lado servidor
Makefile.rpcCalc	Deve ser renomeado para Makefile. Contém as diretivas de compilação para a ferramenta make.

Tabela 1: Descrição dos arquivos do projeto RPC

- **rpcCalc.h:** contém, dentre outras definições, o relacionamento entre os nomes (de funções, de programa, versão, etc.) e os seus respectivos códigos, bem como a declaração da estrutura de dados que deve ser passada como parâmetro entre cliente e servidor.

- **rpcCalc_client.c:** Este programa contém duas funções:

  i) o programa principal (`main`), que recebe o endereço do host remoto (servidor) via parâmetro de entrada; e

  ii) a função `prog_100`, que realiza o seguinte:

    a) Chama a função `clnt_create` para contactar o host remoto (servidor), questionando a porta do serviço RPC associada a essa função;

    b) Chama as funções `add` ou `sub`, presentes no stub local, passando como operandos as variáveis `add_100_arg` ou `sub_100_arg`. É importante perceber que após o `rpcgen` essas variáveis não estão inicializadas, e uma das alterações requeridas pelo programador é preencher, aqui, essas variáveis com os dados que devem ser passados às funções remotas.

- **rpcCalc_clnt.c:** Contém as funções referenciadas no código `rpcCalc_client.c`, ou seja, as funções `add_100` e `sub_100`. Essas funções realizam o encapsulamento e envio dos argumentos, no formato XDR, por meio de mensagens para o servidor RPC remoto.

- **rpcCalc_xdr.c:** Contém as funções de conversão para o formato XDR a serem usadas no código. Nesse caso, a função chamada é a `xdr_int`, que converte os inteiros `x` e `y` para o formato `xdr_int`.

- **rpcCalc_svc.c:** Representa o stub servidor. Este arquivo possui duas rotinas principais:

  i) o programa principal, responsável pelos controles iniciais de registro do servidor RPC; e

  ii) a função secundária `prog_100`, cujo objetivo é receber a identificação da função chamada e fazer o desvio para uma função local de acordo com essa identificação.

- **rpcCalc.h:** contém, dentre outras definições, o relacionamento entre os nomes (de funções, de programa, versão, etc.) e os seus respectivos códigos, bem como a declaração da estrutura de dados que deve ser passada como parâmetro entre cliente e servidor.

- **rpcCalc_client.c:** Este programa contém duas funções:

  i) o programa principal (`main`), que recebe o endereço do host remoto (servidor) via parâmetro de entrada; e

  ii) a função `prog_100`, que realiza o seguinte:

    a) Chama a função `clnt_create` para contactar o host remoto (servidor), questionando a porta do serviço RPC associada a essa função;

b) Chama as funções `add` ou `sub`, presentes no stub local, passando como operandos as variáveis `add_100_arg` ou `sub_100_arg`. É importante perceber que após o `rpcgen` essas variáveis não estão inicializadas, e uma das alterações requeridas pelo programador é preencher, aqui, essas variáveis com os dados que devem ser passados às funções remotas.

- **rpcCalc_clnt.c:** Contém as funções referenciadas no código `rpcCalc_client.c`, ou seja, as funções `add_100` e `sub_100`. Essas funções realizam o encapsulamento e envio dos argumentos, no formato XDR, por meio de mensagens para o servidor RPC remoto.

- **rpcCalc_xdr.c:** Contém as funções de conversão para o formato XDR a serem usadas no código. Nesse caso, a função chamada é a `xdr_int`, que converte os inteiros `x` e `y` para o formato `xdr_int`.

- **rpcCalc_svc.c:** Representa o stub servidor. Este arquivo possui duas rotinas principais:

  i) o programa principal, responsável pelos controles iniciais de registro do servidor RPC; e

  ii) a função secundária `prog_100`, cujo objetivo é receber a identificação da função chamada e fazer o desvio para uma função local de acordo com essa identificação.

- Dentre outras funcionalidades, o programa principal faz o seguinte:

  a) Verifica se esse programa servidor já está instalado no servidor RPC `rpcbind` (`pmap_unset`);

  b) Cria sockets associando-os às portas livres no servidor (`svcudp_create` e `svctcp_create`);

  c) Registra essas portas no `rpcbind` (`svc_register`) vinculadas ao número do programa, versão e identificador da função que deve ser chamada;

  d) Chama a função `svc_run` para habilitar a escuta permanente da porta que foi associada a esse servidor.

- A função `prog_100`, por sua vez, realiza as seguintes funções:

  a) Recebe os parâmetros de entrada, dentre eles a identificação da função (`add` ou `sub`);

  b) Chama a função `xdr_operandos` para realizar o processo inverso de conversão, ou seja, do formato XDR para o formato local;

  c) Chama uma das funções (`add_100_svc` ou `sub_100_svc`) presentes no arquivo `rpcCalc_server.c`;

  d) Recebe o retorno da função chamada e converte esses valores novamente no formato XDR, através da chamada de funções dessa biblioteca;

  e) Chama a função `sendreply` que retorna para o stub cliente o resultado das funções `add_100_svc` ou `sub_100_svc`.

- **rpcCalc_server.c:** Contém a implementação dos códigos das funções remotas, que devem ser alteradas para realizar o que se deseja. Nesse caso, conforme pode ser visto, as funções `add_100_svc` e `sub_100_svc` possuem apenas o esqueleto das funções e devem ser alteradas para incluir a lógica desejada pelo programador, assim como deve ser feito no arquivo `rpcCalc_client.c`.

Exemplos de modificações possíveis nos arquivos rpcCalc_client.c e rpcCalc _server.c estão disponíveis no repositório da disciplina.

Uma vez alterado é preciso compilar todos esses arquivos e gerar os binários que vão rodar no lado cliente e no lado servidor. A geração desses arquivos binários é auxiliada pelo uso do utilitário make que, por sua vez trabalha em cima do arquivo Makefile.rpcCalc que foi também produzido pelo rpcgen. Portanto, após geração do código-fonte por meio da ferramenta rpcgen, e após realizar a alteração dos códigos cliente e servidor, para compilar os programas cliente e servidor, dois passos são necessários:

1. Alterar o nome do arquivo Makefile.rpcCalc para Makefile;
2. Executar o comando make.

A partir daqui os códigos binários deverão estar prontos. Em termos de execução, é importante seguir a ordem de execução a seguir:

1. Colocar o rpcbind para executar, caso o mesmo já não esteja em execução; $service rpcbind status
2. Colocar o processo servidor para executar;
3. Colocar o processo cliente para executar passando para ele, dentre outros parâmetros, o endereço do servidor.

2.2 Linguagem Python

Para a linguagem Python utilizaremos a implementação gRPC.

O gRPC3 traz uma implementação de RPC criada pelo Google, de código aberto e alto desempenho. que pode ser executada em qualquer ambiente. O gRPC segue amplamente a semântica HTTP sobre HTTP/2. Assim como em C, a proposta do gRPC é que o cliente interaja com o servidor por meio de chamadas de funções simples, ou seja, de interfaces de códigos geradas automaticamente pela própria aplicação do gRPC. Isso significa que você precisa apenas implementar sua lógica de programação, o que facilita muito a adoção do recurso de RPC.
Por quê priorizar o uso de gRPC?

- Sistemas multilinguagem de programação: com seu suporte de geração de código nativo para uma ampla gama de linguagens de desenvolvimento, o gRPC é uma boa opção para gerenciar conexões em um ambiente desenvolvido em diferentes linguagens de programação

- Streaming: quando a comunicação em tempo real é um requisito, a capacidade do gRPC de gerenciar conexões bidirecionais (HTTP/2) permite que seu sistema envie e receba mensagens em tempo real sem esperar pela resposta do cliente.

- Redes de baixa largura de banda e de baixa potência: o uso de mensagens protobuf serializadas, binárias, permite mensagens leves, o que contribui para maior eficiência e velocidade em redes de baixa potência e de largura de banda restritas (especialmente quando comparadas a JSON). A IoT seria um exemplo desse tipo de rede que poderia se beneficiar das APIs gRPC.

O protobuf, por sua vez, é um mecanismo criado e usado pelo Google para serializar dados estruturados, independente de linguagem ou plataforma. Resumidamente, o Protobuf funciona da seguinte maneira:

- Primeiro é definido como se deseja que os dados sejam estruturados em um arquivo de extensão .proto;

- Em seguida, esta definição é compilada e o resultado é um código-fonte automaticamente gerado na linguagem desejada. Atualmente as linguagens compatíveis são C++, C#, Go, Java e Python;

- Finalmente, o código-fonte gerado stub é utilizado para ler e escrever os dados estruturados por meio da rede.

Neste laboratório, o arquivo grpcCalc.proto possui uma sintaxe própria (definida pelo padrão Protobuf de interoperabilidade) para estruturar os dados da comunicação RPC. O próximo passo é gerar os stubs cliente e servidor a partir do arquivo proc. Neste laboratório, assumindo que o arquivo .proto está na mesma pasta que os arquivos grpcCalc_client.py e grpcCalc_servidor.py use o seguinte comando (na pasta . onde o arquivo .proto se encontra):

```
$ python -m grpc_tools.protoc --proto_path=. ./grpcCalc.proto
    ↪ --python_out=. --grpc_python_out=.
```

Finalmente, execute inicialmente a aplicação servidor grpcCalc_server.py em um terminal e, posteriormente, execute a aplicação cliente grpcCalc_client.py e teste a calculadora.

3 Atividade 1 (30% da nota):

Utilize um dos exemplos anteriores (C ou Python) e o adapte para oferecer as principais funções de uma calculadora. Soma, Subtração, Multiplicação e divisão. Adapte o código de modo a ser um serviço interativo, ou seja, o usuário deve escolher através de um "menu"qual operação deseja realizar. Subsequentemente, os operandos devem ser lidos pelo usuário. Alternativamente, pode-se utilizar Java com o protocolo RMI para realizar a implementação.

4 Atividade 1 (70% da nota): Mineração de Criptomoedas usando gRPC

Com base nos exemplos e atividade anterior, você precisará construir um protótipo similar a um minerador de criptomoedas no modelo cliente/servidor baseado em RPC. A implementação do minerador deverá ser realizada em Python/gRPC. Note que não há exigência (por enquanto) de interoperabilidade entre os diferentes grupos.
O servidor deverá ter o seguinte funcionamento:

a) Manter, enquanto estiver em execução, uma tabela com os seguintes registros:

TransactionID	*Challenge*	*Solution*	*Winner*
int	*int*	*int*	*int*

- TransactionID: Identificador da transação, representada por um valor inteiro;
- Challenge: Valor do desafio criptográfico associado à transação, representado por um número [1..20], onde 1 é o desafio mais fácil. Gere desafios aleatórios ou sequenciais (experimente as diferentes abordagens);
- Solution: String que, se aplicada a função de hashing SHA-1, solucionará o desafio criptográfico proposto;
- Winner: ClientID do usuário que solucionou o desafio criptográfico para a referida TransactionID (mesma linha da tabela). Enquanto o desafio não foi solucionado, considere que o ClientID = -1;

a) Ao carregar, o servidor deverá gerar um novo desafio com TransactionID = 0;

b) Disponibilizar as seguintes chamadas de procedimento remoto aos clientes RPC:

Nome	**Parâmetros**	**Significado**
getTransactionID()	none	Retorna o valor atual <int> da transação com desafio ainda pendente de solução.
getChallenge()	int transactionID	Se *transactionID* for válido, retorne o valor do desafio associado a ele. Retorne -1 se o *transactionID* for inválido.
getTransactionStatus()	int transactionID	Se *transactionID* for válido, retorne 0 se o desafio associado a essa transação já foi resolvido. Retorne 1 caso a transação ainda possua desafio pendente. Retorne -1 se a *transactionID* for inválida.
submitChallenge()	int transactionID, int ClientID, string solution	Submete uma solução (*solution*) para a função de *hashing* SHA-1 que resolve o desafio proposto para a referida *transactionID*. Retorne 1 se a solução for válida, 0 se for inválida, 2 se o desafio já foi solucionado, e -1 se a *transactionID* for inválida.
getWinner()	int transactionID	Retorna o *clientID* do vencedor da transação *transactionID*. Retorne 0 se *transactionID* ainda não tem vencedor e -1 se *transactionID* for inválida.
getSolution()	int transactionID	Retorna uma estrutura de dados (ou uma tupla) com o *status*, a solução e o desafio associado à *transactionID*.

O servidor deve ficar em loop atendendo diversas conexões, só podendo ser interrompido com um <ctrl+c> ou similar.

O cliente, por sua vez, deve receber como parâmetro o endereço do servidor RPC e um menu com as seguintes opções:

Item do Menu	Ação
getTransactionID	Solicita ao servidor a transação corrente (atual) e imprime resultado dessa chamada de função na tela
getChallenge	Lê um valor de transactionID no teclado e solicita o valor do desafio associado a essa transação ao servidor. Imprime esse valor na tela.
getTransactionStatus	Lê um valor de transactionID no teclado e solicita o estado da referida transação para o servidor. Imprime o resultado na tela.
getWinner	Lê um valor de transactionID no teclado e solicita o clientID do vencedor ao servidor RPC. Imprime resultado na tela.
GetSolution	Lê um valor de transactionID no teclado e solicita a solução associada a essa transactionID. Imprime resultado na tela.
Mine	Passo a passo das etapas ao invocar o método mine: 1. Buscar transactionID atual; 2. Buscar a challenge (desafio) associada à transactionID atual; 3. Buscar, localmente, uma solução para o desafio proposto – sugere- se usar múltiplas threads para isso!!!!!! 4. Imprimir localmente a solução encontrada; 5. Submeter a solução ao servidor e aguardar resultado; 6. Imprimir/Decodificar resposta do servidor

5 Instruções de envio

- O trabalho pode ser feito em grupos de 2 ou 3 alunos.
- Email: **brenokrohling@professor.multivix.edu.br**
- Assunto: **PPD-RPC-{CODIGO_TURMA}**, se atentando para substituir **{CODIGO-TURMA}** pelo código da sua turma.
- Deve-se enviar via email apenas o link para o repositório virtual da atividade (Github, Bitbucket, Google Colaboratory ou similares) contendo:
  1. Códigos-fonte;
  2. Instruções para compilação e execução;
  3. Relatório técnico (.pdf ou README)
  4. Vídeo curto (máx 5 min) mostrando uma execução, resultado e análise e/ou explicação dos resultados encontrados quando necessário;
- O relatório técnico deverá conter: a metodologia de implementação, testes e resultados encontrados;

- O relatório não deverá conter: trechos explícitos de código, apenas explicações gerais quando necessário.
- Data de Entrega: 08 de Novembro de 2025.

Bom trabalho!