Lab 9
Funções, *Stack Frames* e Recursividade – Parte 1

***Objetivo*: Neste trabalho de laboratório pretende-se estudar o funcionamento do mecanismo de chamada de funções e a utilização da pilha (*stack frames*), permitindo a correta interligação de funções em linguagem *assembly* e em C, bem como a instanciação independente de cada chamada a uma função que permite a ocorrência de recursividade.**

1. Introdução – *stack frames* e as convenções de chamada a funções em *assembly*

De forma resumida, aprendemos que a pilha é uma zona de memória utilizada para armazenar dados temporários, incluindo variáveis locais e passagem de parâmetros para funções. O programador precisa de ter o cuidado de, em cada função, deixar a pilha inalterada. Além disso, quando uma função chama outra função necessita de guardar o seu próprio endereço de retorno (`$ra`) de forma a poder regressar ao código que a chamou.

A passagem de parâmetros faz-se através dos registos `$a0` a `$a3` (`$4` a `$7`) e a devolução será feita pelos registos `$v0` e `$v1` (`$2` e `$3` – este último só é usado para resultados que exijam 64 *bits*).

Neste trabalho, iremos estudar mais a fundo como se faz a gestão da pilha em MIPS ao longo do decurso da execução de funções, e como é que se conjuga esta gestão com o uso de registos e passagem de parâmetros entre funções.

Infelizmente, ao contrário do que acontece no uso de registos, *não existe apenas uma convenção de gestão/uso da pilha* – as convenções usadas dependem de compilador para compilador. Existem, em qualquer caso, sempre pontos em comum entre as convenções efetivamente utilizadas. No caso de uma função típica, medianamente complexa (por exemplo, que utilize variáveis locais e chame outras funções com mais de 4 parâmetros), verificam-se os seguintes factos, qualquer que seja a convenção em consideração:

- De cada vez que uma função é chamada, um *stack frame* específico é criado para cada instância dessa função (ou seja, se a função for recursiva, existirá um *stack frame* criado por cada chamada à função).

- A função reserva espaço no *stack frame* para armazenar argumentos que precisa de passar a funções que eventualmente venha a chamar.

- A função reserva espaço no *stack frame* para salvaguardar os *saved registers* (`$s0` a `$s7`) que venha a usar logo no início da sua execução (obrigação da função como

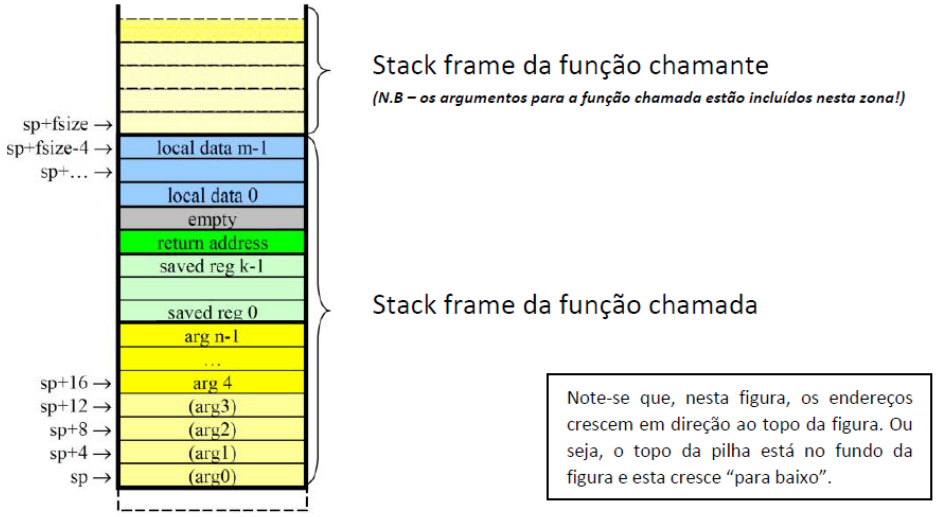
função que foi chamada por outra). Nota importante: se o frame pointer (`$fp`) for usado, deve ser considerado como *saved register* (ver adiante).

- A função reserva espaço no *stack frame* para salvaguardar o endereço de retorno (contido no registo `$ra`) no início da sua execução, se vier eventualmente a chamar outra função.

- A função reserva espaço no *stack frame* para armazenamento local.

- A organização do *stack frame* é importante, na medida em que (1) define a organização do armazenamento local (e por isso temporário) da função em causa; (2) forma um contrato entre uma função chamante e uma função chamada, que ambas precisam de ter em conta para poderem comunicar uma com a outra como parte daquilo a que se dá o nome de passagem de parâmetros.

Na figura[1] seguinte, ilustra-se a convenção de organização da pilha utilizada pelo compilador usado nas aulas práticas (exercício: confrontar esta convenção com aquela que se encontra descrita no livro). Note-se que, nesta convenção, o programador é obrigado a reservar espaço na pilha de forma a alinhá-la ao *double word* (ou seja, **usando um múltiplo de 8**!).



Como se pode ver na figura, em geral esta organização da pilha divide o stack frame em 5 partes distintas:

1. A secção de argumentos serve de interface (juntamente com os registos de passagem de argumentos) entre a função chamante e as suas funções chamadas. As primeiras quatro words desta secção não necessitam de ser usadas pela função chamante, e em código desenvolvido durante as aulas não vai ser necessário mais do que reservar o espaço correspondente – **no entanto, este procedimento de reserva de espaço é obrigatório, qualquer que seja o número de argumentos passados para a função chamada**. Em qualquer caso, quando gera código automaticamente o `gcc` efetua cópias dos registos de argumentos `$a0` a `$a3` para possível uso da função chamada.

[1] Figura adaptada de *"MIPS Calling Convention", ECE314 Spring 2006, CSE 410 Computer Systems course, University of Washington*, também anexo ao trabalho.

Quando há mais de quatro argumentos, reserva-se a quantidade de espaço necessária para reservar cada um deles começando a partir de `$sp+16`, em conformidade com a convenção típica de passagem de parâmetros.

2. A secção de *saved registers* contém o espaço para salvaguardar os valores dos registos `$s0` a `$s7` que venham a ser utilizados ao longo da execução da função (responsabilidade da função quando é chamada).

3. A secção de *return address*.

4. Uma secção de "enchimento" que não armazena nada de útil, servindo apenas para acomodar o caso de se terem dados que não preenchem o alinhamento ao *double word* por completo (**no máximo**, será necessário um espaço vazio, dado que 8 é um múltiplo de 4).

5. Uma secção de armazenamento local, que servirá para armazenar estruturas de dados que correspondem à noção de variáveis locais em C (sob forma de valores simples, *arrays*, etc.) e registos temporários `$t0` a `$t9` que venham a ser utilizados e que a função chamante queira ver preservados sempre que chame uma sub-função (responsabilidade da função quando é função chamante).

É, ainda, de notar que a construção de um stack frame para uma função é sempre desenhada pelo programador em função das necessidades da função a construir. Alguns exemplos das escolhas que o programador deve considerar incluem:

- As funções designam-se por funções **Leaf**, ou folhas, se forem funções que não chamam outras funções. Nesse caso, as suas stack frames não necessitam obrigatoriamente de:
    - ter espaço para o return address `$ra`, porque este nunca vai sofrer alterações no decorrer da execução desta função
    - ter espaço para uma secção de argumentos, porque como nunca vão chamar outras funções, este espaço nunca será usado

- Ainda em relação às funções **Leaf**, estas funções mantêm a obrigatoriedade de respeitar a convenção dos registos, pelo que no caso de usarem os registos *saved*, necessitam de os salvaguardar primeiro da stack frame e, antes de terminarem, necessitam de os recuperar.

- Assim, se uma função **Leaf** não alterar os registos *saved* e não tiver variáveis locais (necessariamente guardadas no stack frame), então estas funções não necessitam sequer de criar um stack frame e, consequentemente, de ter um Prólogo e um Epílogo.

- As funções designam-se por funções **Non-Leaf**, ou seja, não-folhas, se forem funções que chamam outras funções. Neste caso, o desenho do stack frame é obrigatório podendo, ainda assim, só ter as secções de que a função necessite.

Usando esta convenção, é prática de boa programação desenvolver funções que respeitem a seguinte estrutura, para funções **Non-Leaf**, isto é, funções que chamam outras funções:

```
# **** Secção de Argumentos ****

# **** guarda na stack frame da função chamante o(s) argumento(s) de entrada da
#      função – só necessário se a função quiser guardar os seus argumentos antes de
#      chamar outras funções, para qualquer número de argumentos ****

sw $a0, 0($sp)            # copia $a0 para o stack frame da caller (1st arg)
sw $a1, 4($sp)            # copia $a1 para o stack frame da caller (2nd arg)
...
sw $a3, 12($sp)           # copia $a3 para o stack frame da caller (4th arg)


# **** Prólogo ****
# (contém tudo o que é obrigação de uma função chamada, quando é
# chamada)

addiu $sp, $sp, -8x       # reserva de stack frame salvaguarda na pilha do
...                       # que for necessário ($s0-$s7 e $fp se for usado,
                          # $ra). Nota: 8x significa um múltiplo de 8 bytes

move $fp,$sp              # opcional (só necessário se $sp mudar)!


# **** Corpo do código ****
...

# ** chamada a função **
# -- passagem de parâmetros (4 primeiros por $a0-$a3, restantes
# por pilha)
...

# -- chamada propriamente dita
jal ...

# -- recuperação de valores retornados ($v0-$v1)
...
# (código continua)
...

# **** Epílogo ****
# (contém tudo o que é obrigação de uma função chamada,
# quando retorna – "espelho invertido" do prólogo)

move $sp,$fp              # opcional (ver acima)!
...                       # restauro da pilha do que for necessário
                          # ($s0-$s7 e $fp se for usado, $ra)
addiu $sp, $sp, 8x        # libertação de stack frame

# **** Retorno ****
jr $ra
```

Note-se que o registo `$fp` (*frame pointer*), que serve para apontar de forma estável a fronteira do *stack frame*, só necessita de ser usado se se modificar o `$sp` ao longo do corpo do código da função. Obviamente, se `$sp` for modificado, todas as posições relativas dos valores armazenados na pilha mudariam face a `$sp`, o que seria inconveniente para o programador – usando `$fp` como ponteiro auxiliar, este inconveniente é contornado.

Nota: Sugere-se a consulta do ficheiro anexo a este enunciado com o título MIPSCallingConventionsSummary.pdf, que também pode ser encontrado neste link: https://courses.cs.washington.edu/courses/cse410/09sp/examples/MIPSCallingConventions

Summary.pdf. Neste ficheiro pode estudar as diversas convenções de chamada no MIPS na versão que é usada pelo compilador que usamos nas aulas laboratoriais – `gcc`.
Conselho final:

- Analisar sempre que possível o código *assembly* gerado automaticamente pelo compilador para aprender como se faz tudo o que foi descrito acima (no Trabalho Laboratorial #8, no segundo problema, há uma oportunidade excelente para este exercício de engenharia inversa).

Exemplo: anexo a este enunciado, está disponível um exemplo de implementação de uma função em C que chama uma função **Non-Leaf** em Assembly do MIPS (`inside_circle`) que, por sua vez, chama outra função **Leaf** em Assembly (`squared`). O objetivo é testar se um ponto do plano XY está dentro ou fora de um círculo.

1. Chamada de funções assembly em C

Neste primeiro exercício pretende-se implementar duas funções escritas em *assembly* e que permitam devolver o máximo e o mínimo valor de entre quatro valores passados como parâmetros. Estas funções deverão ser chamadas a partir de um programa em C que peça ao utilizador para introduzir um conjunto de 4 valores e que escreva no ecrã o valor máximo e o valor mínimo introduzido. Utilize os ficheiros fornecidos com o enunciado do trabalho como ponto de partida para implementar estas funções. Encontre os valores mínimos e máximos para as funções **`min`** e **`max`**, respetivamente, recorrendo a comparações sucessivas.

2. Passagem de referências da memória

Pretende-se novamente implementar as funções *min* e *max* mencionadas no ponto anterior, mas desta vez assumindo que os parâmetros de entrada de cada uma destas funções passam a ser uma tabela de inteiros e o número de elementos que essa tabela contém. Algo do género: `int max(int *tabela, int numValores)`.

Tal como nos exemplos anteriores, assuma a existência de um programa escrito em C onde a tabela é inicializada e que chama as duas funções, apresentando depois o resultado. Utilize os ficheiros fornecidos com o enunciado do trabalho como ponto de partida para implementar estas funções.

3. Funções Non-Leaf

Voltando a implementar as funções *min* e *max*, encontre os valores mínimos e máximos para as funções **`min`** e **`max`**, respetivamente, recorrendo a duas funções adicionais que deve escrever: **`min2`** e **`max2`**, que calculam o mínimo ou o máximo entre apenas dois valores de entrada. Repare que esta implementação obriga a usar as convenções de chamada das funções no *assembly* do MIPS, quer do lado do callee, quer do lado do caller.