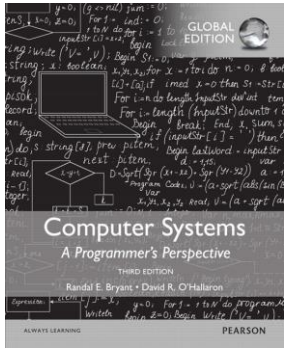


Bibliotecas partilhadas (*shared objects*)

Bib: Computer Systems: A Programmer's Perspective (cap. 7, .10-.12)

Programação em Sistemas Computacionais

João Pedro Patriarca (jpatri@cc.isel.ipl.pt, joao.patriarca@isel.pt), Gabinete F.0.23 do edifício F

ISEL, ADEETC, LEIC

Agenda

- Motivação, criação de uma biblioteca, utilização e processo de ligação
- Código PIC (*Position Independent Code*)
- Carregamento em tempo de execução

Agenda

- Motivação, criação de uma biblioteca, utilização e processo de ligação
- Código PIC (*Position Independent Code*)
- Carregamento em tempo de execução

Aspetos negativos das bibliotecas estáticas

- Uma atualização da biblioteca implica ligá-la novamente a todos os programas que pretendam refletir a atualização

- Repetição de código nos executáveis que dependam da mesma biblioteca:
  - Quer no ficheiro executável em disco;
  - Quer em memória RAM quando o programa é executado e carregado em memória

- Aspeto grave se considerarmos a ligação estática da biblioteca standard do C pela maioria dos programas

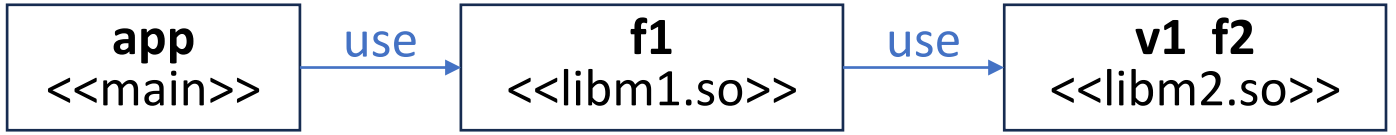
Bibliotecas partilhadas

- Ficheiros objeto com formato ELF
- Denominadas, igualmente, por *shared objects* (objetos partilhados), com extensão **`.so`** nos sistemas Linux (**`.dll`** nos sistemas Windows)
- Partilhados porque:
  - Existe uma única biblioteca no sistema, mesmo sendo usada por múltiplas aplicações;
  - Ligada ao programa e trazida para memória apenas quando é executada a aplicação ou explicitamente pelo programa em tempo de execução;
  - O próprio código da biblioteca pode ser partilhado por múltiplos programas em execução (desde que não seja alterado no carregamento).
- A ferramenta responsável pela ligação chama-se *dynamic linker*

✓ Melhor utilização do recurso memória e simplificação de atualizações de bibliotecas

✗ A atualização de uma biblioteca pode introduzir erros que não existiam em versões anteriores (*DLL Hell*)

Exemplo base



m1.c

```c
#include "m.h"

int f1(void) {
    return v1 + v1 + f2() + f2();
}
```

m2.c

```c
int v1 = 10;

int f3() { return v1 * 10;   }
int f2() { return v1 + f3(); }
```

m.h

```c
#ifndef _M_H
#define _M_H

int f1(void);
int f2(void);
int f3(void);
extern int v1;

#endif/*_M_H*/
```

app.c

```c
#include <stdio.h>
#include "m.h"

int main() {
    printf("f1() = %d\n", f1());
    return 0;
}
```

Comandos para criar bibliotecas e aplicação

```
$ gcc -Wall -pedantic -Og -c app.c
$ gcc -Wall -pedantic -Og -fpic -shared m1.c -o libm1.so
$ gcc -Wall -pedantic -Og -fpic -shared m2.c -o libm2.so
$ gcc -o app app.o ./libm1.so ./libm2.so
```

- A opção de ligação **`-shared`** cria uma biblioteca partilhada em vez de um executável
- A opção de compilação **`-fpic`** (*position independente code*) é obrigatória no âmbito da geração de uma biblioteca partilhada

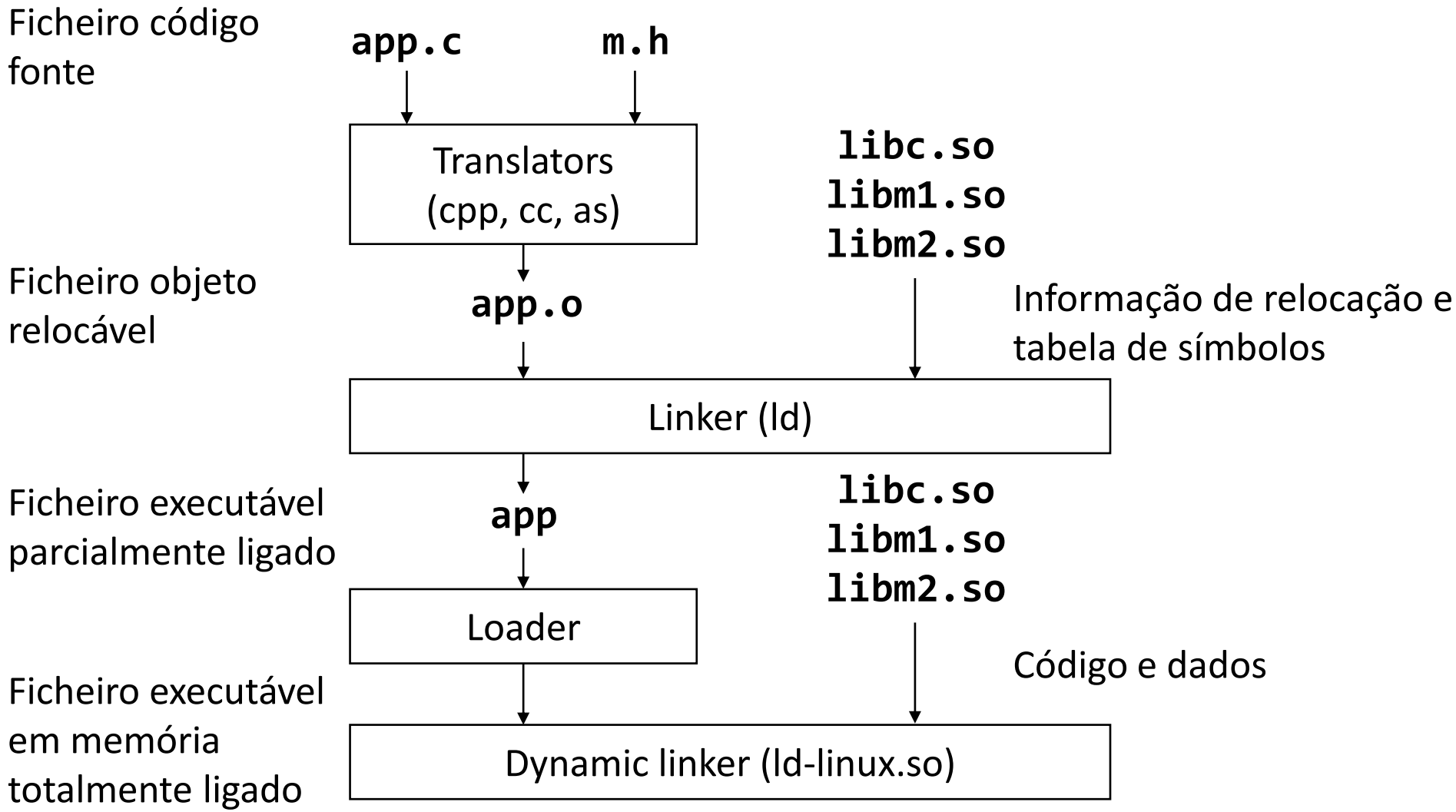
```
$ nm app
         …
         U f1
0…01169 T main
```

```
$ nm libm1.so
         …
0…01119 T f1
         U f2
         U v1
```

```
$ nm libm2.so
         …
0…0112d T f2
0…01119 T f3
0…04028 D v1
```

- Na ligação estática não é copiado nem código nem dados das bibliotecas para o executável; apenas é copiada informação relativa a dados de relocação e tabela de símbolos que permitirão a resolução de referências em tempo de carregamento (opções **`-R`** e **`-T`** no **`objdump`**)

Carregamento do executável em memória



Ações durante o carregamento do executável

- Ações do *loader*:
  - Carrega o executável em memória
  - Verifica a existência da secção **`.interp`** no executável
  - A secção **`.interp`** identifica o caminho no sistema para o *linker* dinâmico
  - Em vez de passar o controlo para a aplicação, carrega e executa o *linker* dinâmico
- Ações do *linker* dinâmico:
  - Reloca código e dados da biblioteca **`libc.so`**
  - Reloca código e dados das bibliotecas **`libm1.so`** e **`libm2.so`**
  - Resolve as referências indefinidas
  - Passa o controlo para a aplicação principal
- A localização das bibliotecas permanecerá fixa ao longo da execução da aplicação, ou seja, os valores dos símbolos ficam fixos

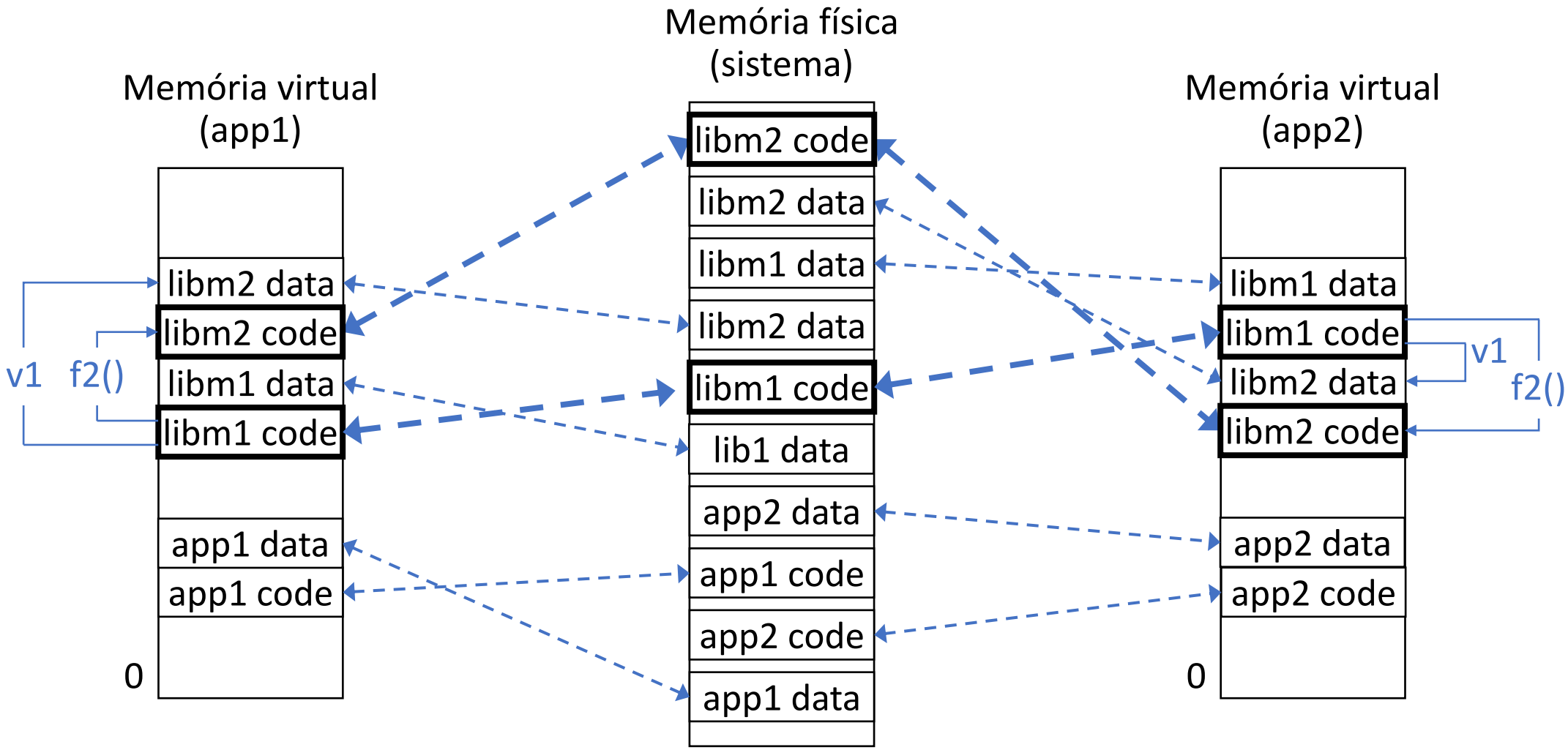
Secção **.interp**

```
$ objdump -h app

app:     file format elf64-x86-64

Sections:
Idx Name          Size      VMA          LMA          File off  Algn
  0 .interp       0000001c  0...00318  0...00318  00000318  2**0
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, READONLY, DATA
  ...

$ objdump -s -j .interp app

app:     file format elf64-x86-64

Contents of section .interp:
 0318 2f6c6962 36342f6c 642d6c69 6e75782d  /lib64/ld-linux-
 0328 7838362d 36342e73 6f2e3200           x86-64.so.2.
```

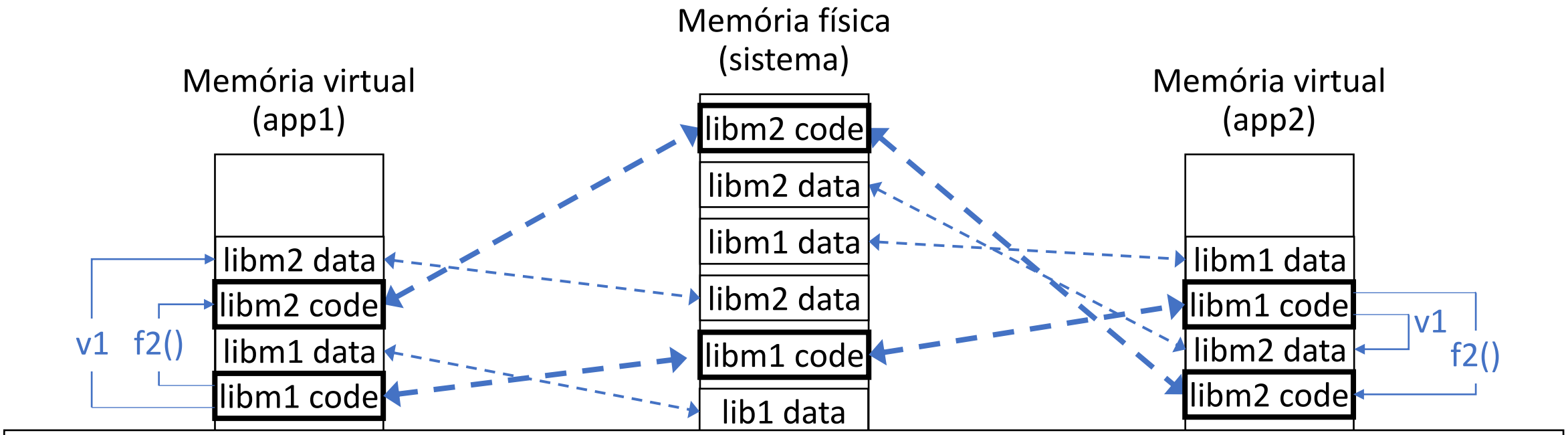
Agenda

- Motivação, criação de uma biblioteca, utilização e processo de ligação
- Código PIC (*Position Independent Code*)
- Carregamento em tempo de execução

Partilha em memória por várias aplicações



Partilha em memória por várias aplicações



Qualquer alteração na fase de ligação dinâmica de uma secção .text, impede que a mesma possa ser partilhada. Sendo a posição relativa de f2 e v1 diferentes em cada aplicação, como é possível resolver as referências em libm1 e ainda assim manter o código de libm1 partilhável?

Hipótese: considerar posições relativas constantes

1. Atribuir a cada biblioteca um endereço predefinido no espaço de endereçamento das aplicações
2. Carregar a biblioteca sempre no endereço predefinido

- Embora simples, esta solução apresenta vários problemas:

✗ Ineficiente na gestão do espaço de endereçamento porque parte do espaço fica alocado mesmo que a aplicação não utilize a biblioteca

✗ De difícil gestão, uma vez que é preciso garantir que não exista qualquer sobreposição entre bibliotecas

✗ Na alteração de uma biblioteca, é preciso garantir que a nova dimensão não ultrapassa o espaço alocado à biblioteca, caso contrário será necessário alocar novo espaço

✗ Para cada nova biblioteca terá de ser alocado novo espaço

- Considerando centenas de bibliotecas, rápido se percebe que esta solução não é viável

Código PIC (*Position Independent Code*)

- O código gerado pelo compilador é gerado de forma a que fique independente da localização, ou seja, não seja necessário resolver referências no código
- O módulo tem de ser compilado com a opção **`-fpic`**
- Referências a símbolos e respetivas definições, exclusivamente dentro da mesma biblioteca, não carecem de resolução porque a posição relativa da referência à respetiva definição é conhecida em tempo de ligação estática
- Referências a símbolos definidos externamente precisam de tratamento especial porque a posição relativa da referência à respetiva definição apenas é conhecida após carregamento em memória
- Para a compreensão das soluções apresentadas a seguir é importante manter presente:
  - A distância entre secções pertencentes a um mesmo ficheiro objeto (executável ou biblioteca) são constantes, independentemente do endereço base onde fiquem mapeadas em memória

Impacto da opção **-fpic** no código gerado

m1.c

```c
#include "m.h"
int f1(void) {
    return v1 + v1 + f2() + f2();
}
```

Sem **-fpic**

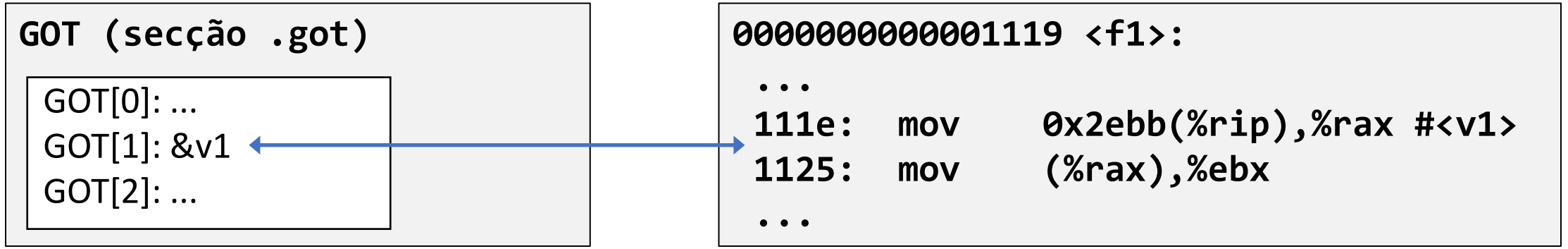
```
0000000000001178 <f1>:
 1178:  endbr64
 117c:  push   %rbx
 117d:  mov    0x2e8d(%rip),%eax #<v1>
 1183:  lea    (%rax,%rax,1),%ebx
 1186:  callq  11a7 <f2>
 118b:  add    %eax,%ebx
 118d:  callq  11a7 <f2>
 1192:  add    %ebx,%eax
 1194:  pop    %rbx
 1195:  retq
```

Com **-fpic**

```
0000000000001119 <f1>:
 1119:  endbr64
 111d:  push   %rbx
 111e:  mov    0x2ebb(%rip),%rax #<v1>
 1125:  mov    (%rax),%ebx
 1127:  add    %ebx,%ebx
 1129:  callq  1050 <f2@plt>
 112e:  add    %eax,%ebx
 1130:  callq  1050 <f2@plt>
 1135:  add    %ebx,%eax
 1137:  pop    %rbx
 1138:  retq
```

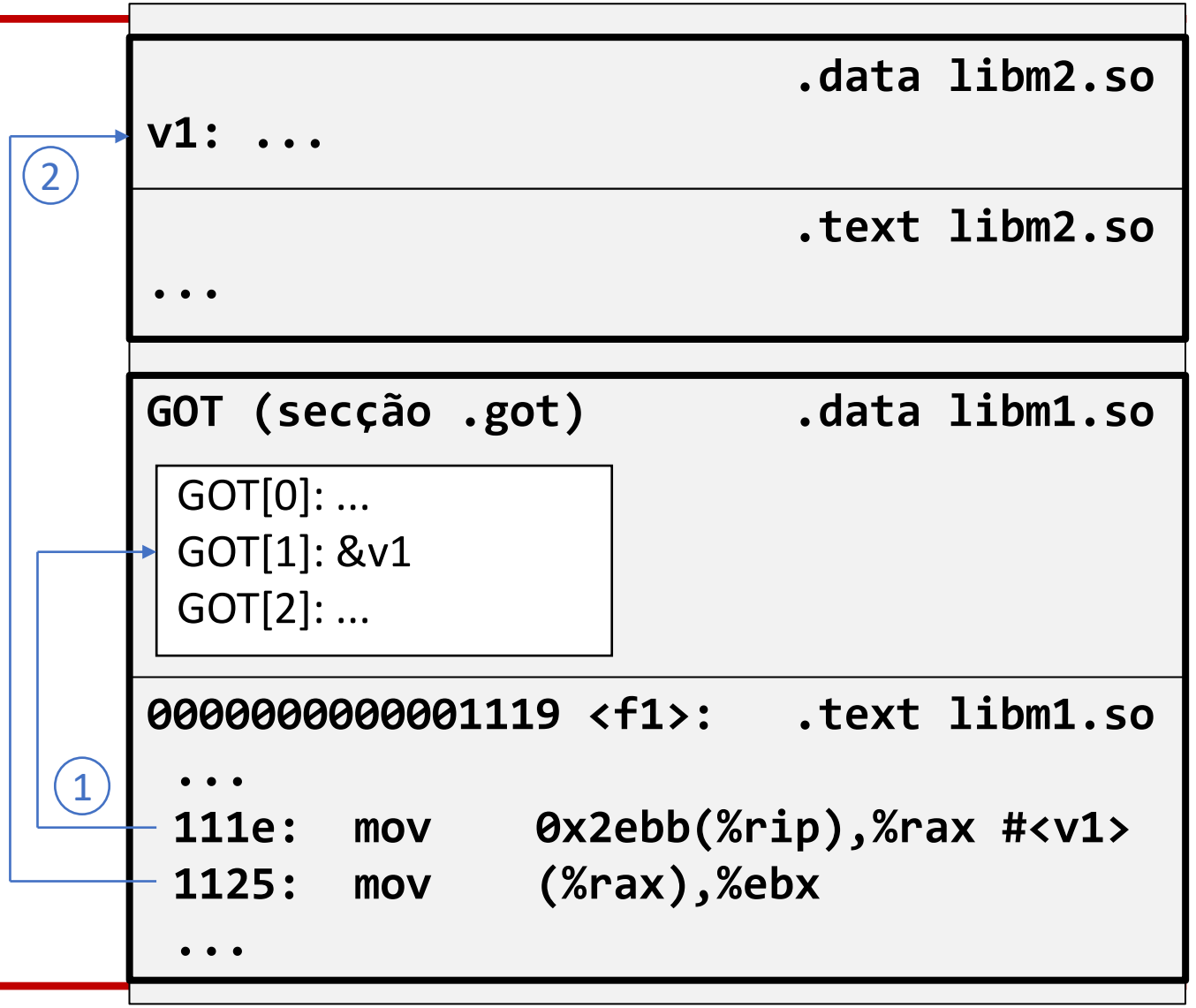
Acesso a variáveis com a opção **`-fpic`**

- Em tempo de compilação é criada uma tabela GOT (*Global Offset Table*) em cada ficheiro objeto onde sejam feitas referências a variáveis globais com definição externa
  - Cada entrada da tabela tem a dimensão de 8 bytes para suportar um endereço
- Em tempo de compilação é criada, igualmente, uma entrada de relocação por cada entrada GOT (na secção **`.rel.text`**)
- No carregamento, o *linker* dinâmico inicia a entrada GOT com o endereço absoluto da variável externa (no exemplo, **`&v1`**)



Acesso a variáveis com a opção **-fpic** (**v1**, no exemplo)

- Existem dois acessos a memória para aceder ao conteúdo de **v1**: (1) para ler o endereço de **v1** com base no endereço relativo a **RIP** (a distância **0x2ebb** é constante independentemente do endereço base onde fica mapeada a biblioteca **libm1** em qualquer aplicação); (2) endereçamento indireto a **v1**

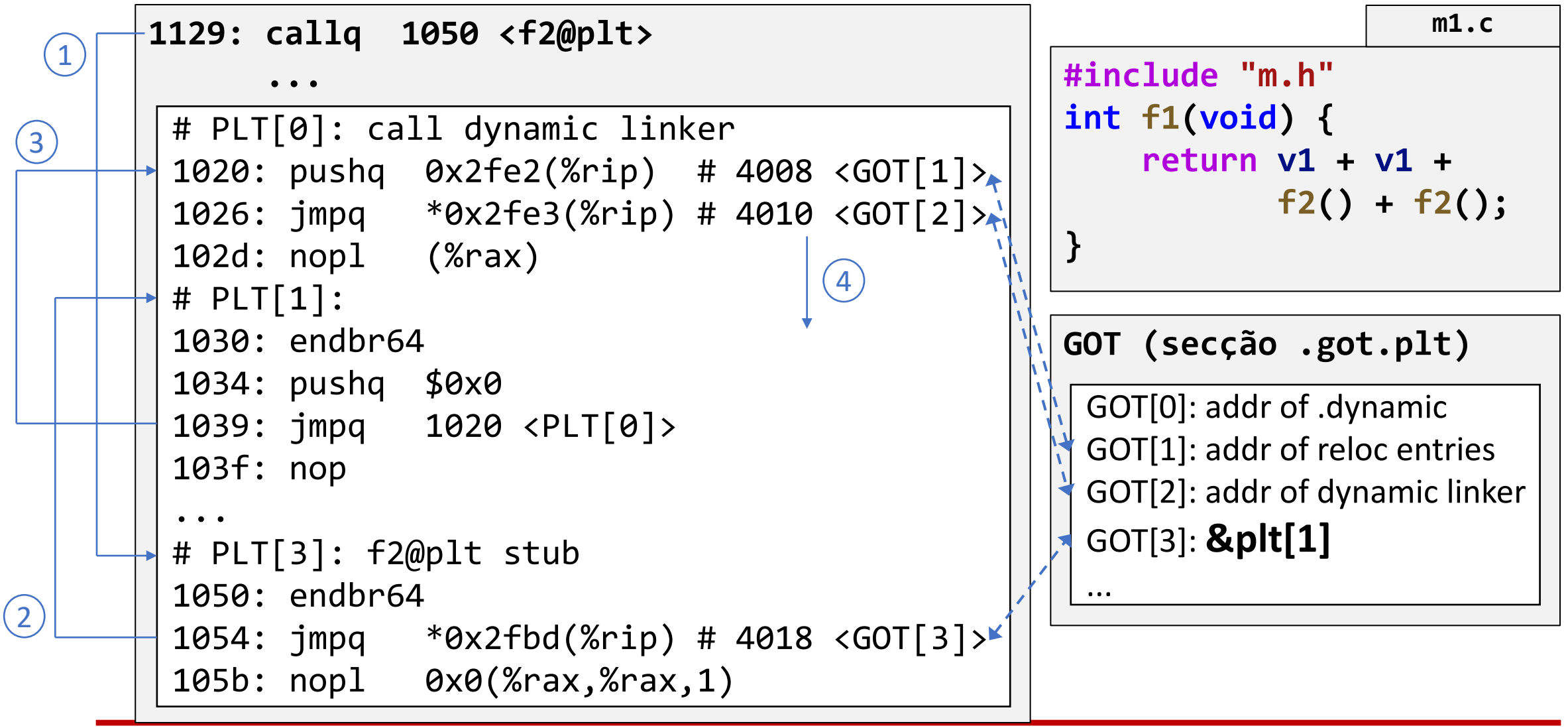


Chamadas a funções com a opção **`-fpic`**

- Podia ser usado o mesmo estratagema que é usado para resolver referências a variáveis globais externas. Não o é, porque:
  - Dado o número de funções que uma biblioteca pode exportar, tipicamente, muito superior ao número de variáveis globais externas, o tempo de inicialização da GOT com os endereços de todas as funções durante o processo de carregamento da biblioteca seria penalizante ainda que o código cliente pudesse usar apenas um subconjunto reduzido das funções.
- No âmbito da resolução de chamadas a funções, é introduzido o conceito de *lazy binding* que corresponde a resolver os endereços apenas e somente quando for necessário, ou seja, resolver a ligação apenas na primeira vez em que cada função é chamada
- Para esta solução são usadas duas estruturas de dados no ficheiro objeto onde são feitas as referências às funções externas: GOT e PLT (*Procedure Linkage Table*)
  - A GOT está definida numa secção de dados (secção **`.got.plt`**)
  - A PLT está definida em secções de código (secções **`.plt`**, **`.plt.got`** e **`.plt.sec`**): cada entrada da tabela tem exatamente 16 bytes e corresponde, no código, a um *stub* para função
  - Para cada função definida externamente existe uma entrada em cada uma das duas tabelas: na tabela GOT, o endereço da função depois de resolvida a indefinição; na tabela PLT, o *stub* para a função

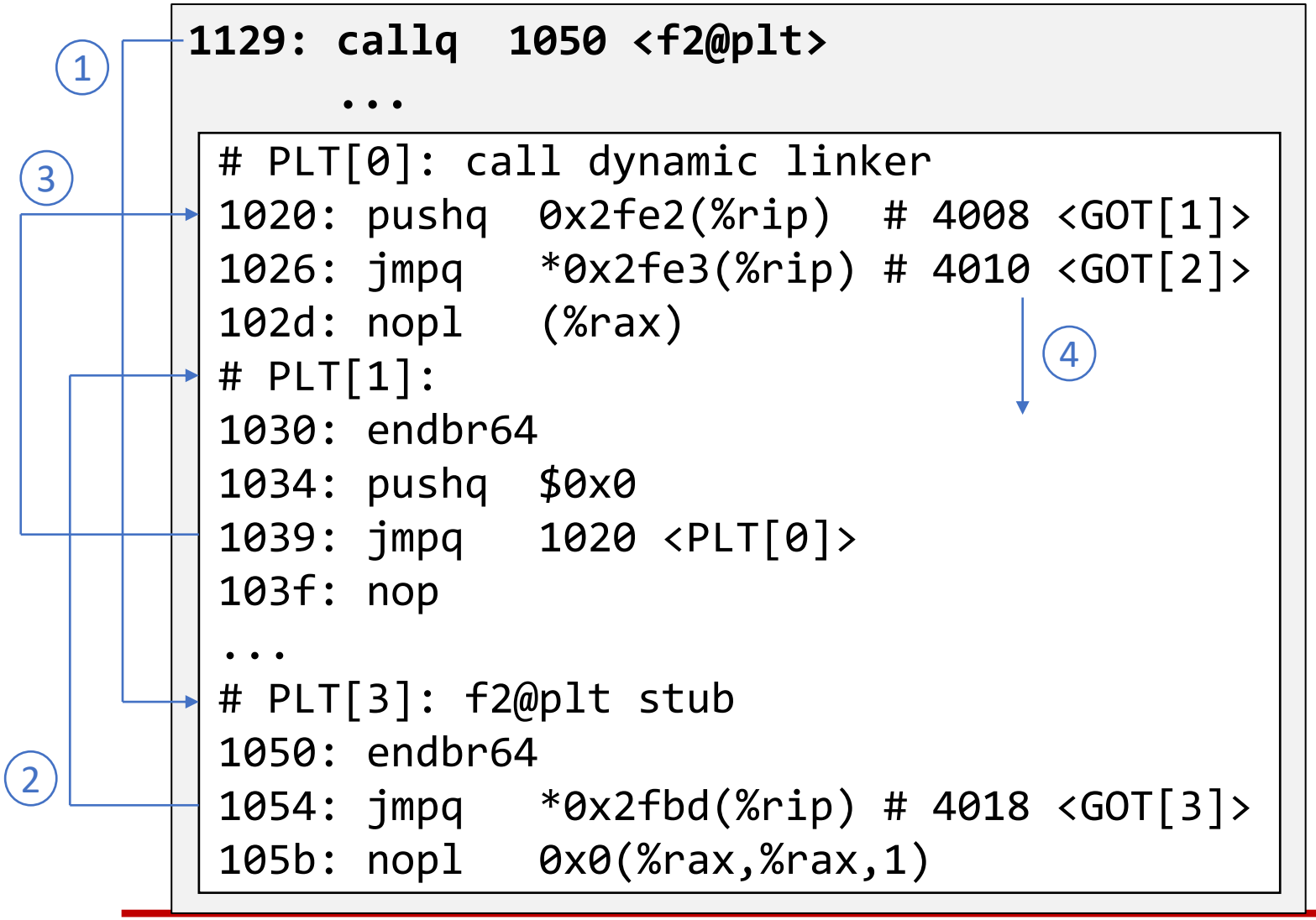
Processo para resolver chamadas a funções com a opção **-fpic**

Primeira chamada



Processo para resolver chamadas a funções com a opção **-fpic**

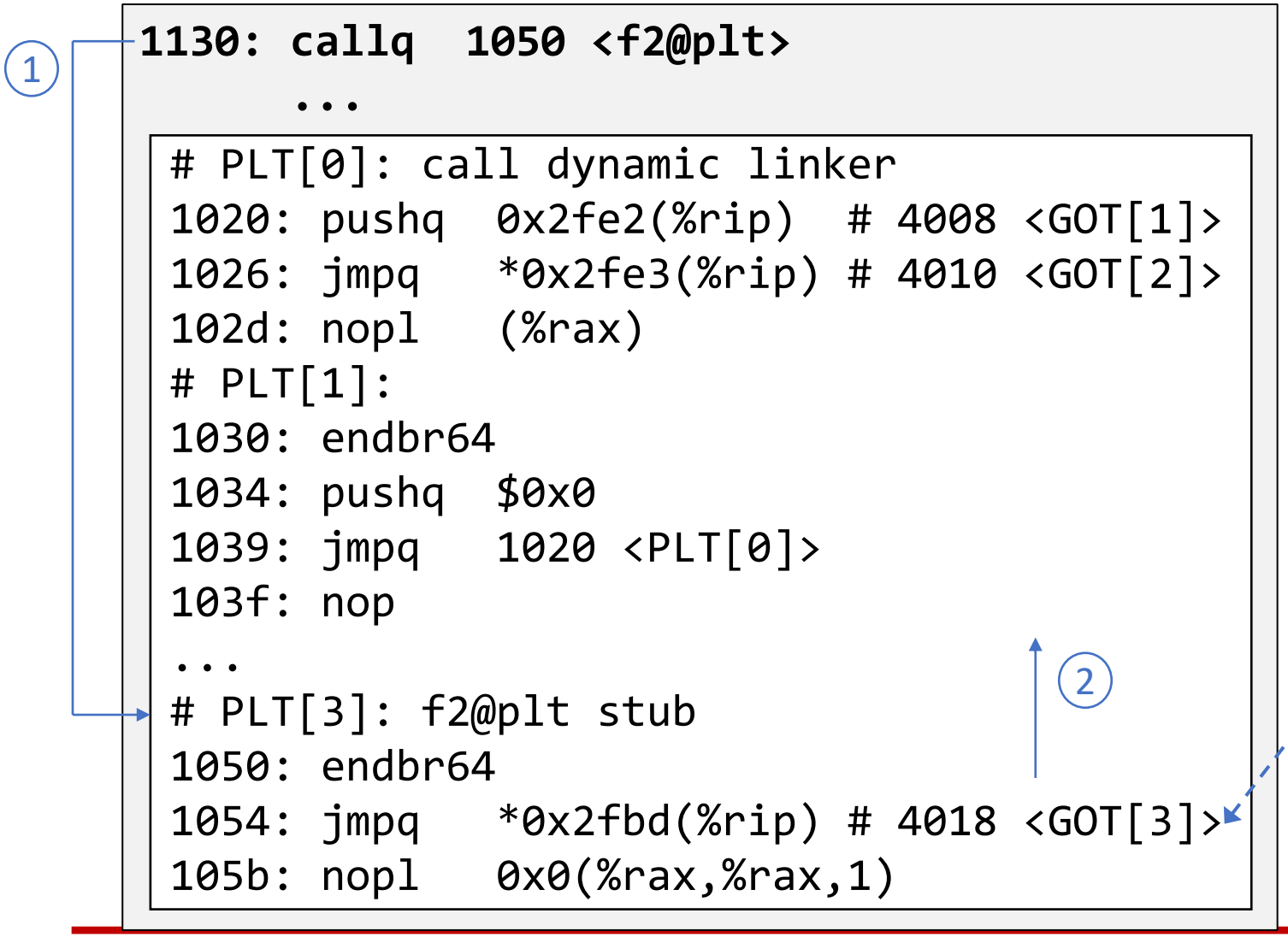
Primeira chamada



1. A chamada a **f2** provoca o salto para o *stub* associado a **f2** (PLT[3])
2. Salta para o endereço presente na entrada GOT associada a **f2** (GOT[3]). Na primeira chamada contém o endereço de PLT[1]
3. Empilha identificador da função **f2** e salta para a PLT[0] onde volta a empilhar um argumento (entradas para relocação – GOT[1]) antes de executar o *linker* dinâmico (GOT[2])
4. Baseado nos dois argumentos, o *linker* dinâmico determina o endereço da função **f2**, atualiza a entrada na GOT associada a **f2** (GOT[3]) com esse valor e passa a execução para **f2**

Processo para resolver chamadas a funções com a opção **-fpic**

Segunda chamada e restantes



1. A chamada a **f2** provoca o salto para o *stub* associado a **f2** (PLT[3])
2. Desta feita, o salto indireto com base no conteúdo da GOT[3] provoca a transferência de controlo diretamente para **f2**

GOT (secção .got.plt)

GOT[0]: addr of .dynamic
GOT[1]: addr of reloc entries
GOT[2]: addr of dynamic linker
GOT[3]: **&f2**
...

Agenda

- Motivação, criação de uma biblioteca, utilização e processo de ligação
- Código PIC (*Position Independent Code*)
- Carregamento em tempo de execução

Carregamento em tempo de execução

- A biblioteca é carregada e ligada em tempo de execução do programa
- No código cliente não existe qualquer referência para símbolos (variáveis ou funções) definidos na biblioteca carregada em tempo de execução

- Permite a introdução de novas funcionalidades sem precisar gerar novamente a aplicação ou, inclusive, parar a sua execução

Interface programática para *linker* dinâmico

Necessário incluir ficheiro *header* **`dlfcn.h`** e ligar com o *linker* dinâmico **`-ldl`**

```
void *dlopen(const char *filename, int flags);
```

- Carrega biblioteca em memória (pode já estar em memória – incrementa contador)
  - Retorna ponteiro (na forma de *handle*) a usar noutras operações da API
  - Retorna **`NULL`** em caso de erro
  - O parâmetro **`flags`** pode valer **`RTLD_NOW`**, **`RTLD_LAZY`**, entre outros

```
void *dlsym(void *handle, const char *symbol);
```

- Liga o símbolo passado por argumento
  - Retorna ponteiro para variável ou função em caso de sucesso; retorna **`NULL`** se não for possível realizar a ligação

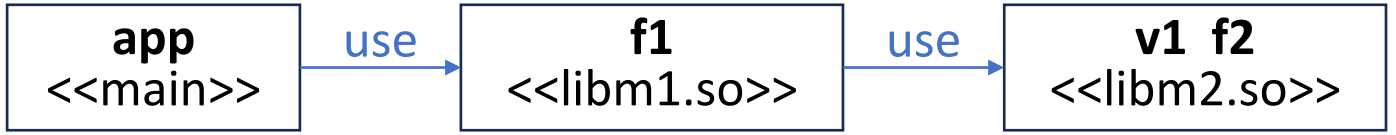
```
int dlclose(void *handle);
```

- Descarrega biblioteca partilhada se respetivo contador atinge o valor 0
  - Retorna 0 em caso de sucesso, -1 em caso de erro

```
char *dlerror(void);
```

- Retorna *string* com o erro mais recente ocorrido na execução das funções anteriores
  - Retorna **`NULL`** se não aconteceu qualquer erro desde o início ou desde a última chamada a **`dlerror`**

Exemplo (1 de 7)



app.c

```c
#include <stdio.h>
#include "m1.h"

#define PRINT_STEP(s)                                  \
    printf(s ". Press ENTER key to continue."); \
    getchar()

int main() {
    PRINT_STEP("1. Before libm2.so load");
    m1_init();
    PRINT_STEP("2. After libm2.so load");
    printf("f1() = %d\n", f1());
    m1_fini();
    PRINT_STEP("3. After libm2.so unload");
    return 0;
}
```

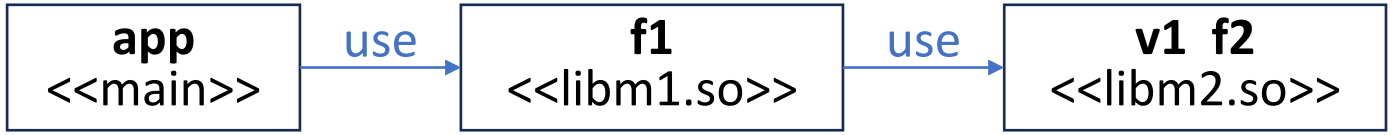
m1.h

```c
#ifndef _M_H
#define _M_H

void m1_init();
void m1_fini();
int f1(void);

#endif/*_M_H*/
```

m2.c

```c
int v1 = 10;
int f3(void) {
    return v1 * 10; }
int f2(void) {
    return v1 + f3();}
```

Exemplo (2 de 7)



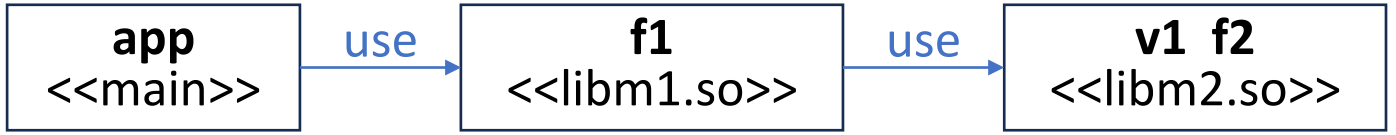
m1.c

```c
#include <dlfcn.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#define EXIT_IF_NULL(h)      \
  if ((h) == NULL) {         \
    fprintf(stderr, "%s\n", \
            dlerror());      \
    exit(1);                 \
  }
#define EXIT_IF_NZERO(h)     \
  if ((h) != 0) {            \
    fprintf(stderr, "%s\n", \
            dlerror());      \
    exit(1);                 \
  }

void * hm2;
```

m1.c

```c
void m1_init() {
  EXIT_IF_NULL(hm2 = dlopen(
          "./libm2.so", RTLD_NOW));
}
void m1_fini() {
  EXIT_IF_NZERO(dlclose(hm2));
}

int f1(void) {
  int * pv1;
  EXIT_IF_NULL(
    pv1 = (int*)dlsym(hm2, "v1")
  );
  int (*pf2)(void);
  EXIT_IF_NULL(
    *(void**)&pf2 = dlsym(hm2, "f2")
  );
  return *pv1 + *pv1 + pf2() + pf2();
}
```

Exemplo (3 de 7)



Makefile

```
CFLAGS = -Wall -pedantic -c -Og
HEADER_FILES = m1.h
ALL = app

all: $(ALL)

# Create app
app: app.o libm1.so libm2.so
    gcc -o $@ $< ./libm1.so -ldl

# Create shared objects
libm1.so: m1.o
    gcc -shared -o $@ $^
libm2.so: m2.o
    gcc -shared -o $@ $^
```

Makefile

```
# Create relocatable objects
m1.o: m1.c
    gcc $(CFLAGS) -fpic $<
m2.o: m2.c
    gcc $(CFLAGS) -fpic $<
app.o: app.c m1.h
    gcc $(CFLAGS) -g $<

# Clear all generated files
clean:
    rm -f *.o $(ALL) *.so
```

Exemplo (4 de 7)

Observação do espaço de endereçamento da aplicação **app**

- Primeiro é preciso conhecer o identificador do processo **app**
- Utilitário **ps** para consultar o PID (*Process ID*)

```
$ ps -all
F S   UID   PID  PPID  C PRI  NI ADDR SZ WCHAN  TTY          TIME CMD
...
0 S  1000 29897   551  0  80   0 -   638 -      pts/4    00:00:00 app
...
0 R  1000 29946 27395  0  80   0 -  2635 -      pts/2    00:00:00 ps
```

- Depois, consulta-se o ficheiro **maps** associado ao processo **app** que contém o estado atual do espaço de endereçamento da aplicação

```
$ sudo cat /proc/<pid>/maps
```

Exemplo (5 de 7)

Observação do espaço de endereçamento da aplicação **app** (1 de 3)

```
$ ./app
1. Before libm2.so load. Press ENTER key to continue.
```

```
$ sudo cat /proc/29897/maps
561f4b522000-561f4b523000 r--p 0...0 08:10 46883   /home/jpatri/test/lib_shared_exe/app
561f4c21e000-561f4c23f000 rw-p 0...0 00:00 0       [heap]
7fdf75a9f000-7fdf75ac1000 r--p 0...0 08:10 42911   /usr/lib/x86_64-linux-gnu/libc-2.31.so
7fdf75c91000-7fdf75c92000 r--p 0...0 08:10 43181   /usr/lib/x86_64-linux-gnu/libdl-2.31.so
7fdf75ca0000-7fdf75ca1000 r--p 0...0 08:10 46877   /home/jpatri/test/lib_shared_exe/libm1.so
7fdf75ca7000-7fdf75ca8000 r--p 0...0 08:10 38549   /usr/lib/x86_64-linux-gnu/ld-2.31.so
7ffd3a13c000-7ffd3a15e000 rw-p 0...0 00:00 0       [stack]
```

Exemplo (6 de 7)

Observação do espaço de endereçamento da aplicação **app** (2 de 3)

```
$ ./app
1. Before libm2.so load. Press ENTER key to continue.
2. After libm2.so load. Press ENTER key to continue.
```

```
$ sudo cat /proc/29897/maps
561f4b522000-561f4b523000 r--p 0...0 08:10 46883   /home/jpatri/test/lib_shared_exe/app
561f4c21e000-561f4c23f000 rw-p 0...0 00:00 0       [heap]
7fdf75a9f000-7fdf75ac1000 r--p 0...0 08:10 42911   /usr/lib/x86_64-linux-gnu/libc-2.31.so
7fdf75c91000-7fdf75c92000 r--p 0...0 08:10 43181   /usr/lib/x86_64-linux-gnu/libdl-2.31.so
7fdf75c9b000-7fdf75c9c000 r--p 0...0 08:10 46881   /home/jpatri/test/lib_shared_exe/libm2.so
7fdf75ca0000-7fdf75ca1000 r--p 0...0 08:10 46877   /home/jpatri/test/lib_shared_exe/libm1.so
7fdf75ca7000-7fdf75ca8000 r--p 0...0 08:10 38549   /usr/lib/x86_64-linux-gnu/ld-2.31.so
7ffd3a13c000-7ffd3a15e000 rw-p 0...0 00:00 0       [stack]
```

Exemplo (7 de 7)

Observação do espaço de endereçamento da aplicação **app** (3 de 3)

```
$ ./app
1. Before libm2.so load. Press ENTER key to continue.
2. After libm2.so load. Press ENTER key to continue.
f1() = 240
3. After libm2.so unload. Press ENTER key to continue.
```

```
$ sudo cat /proc/29897/maps
561f4b522000-561f4b523000 r--p 0...0 08:10 46883   /home/jpatri/test/lib_shared_exe/app
561f4c21e000-561f4c23f000 rw-p 0...0 00:00 0       [heap]
7fdf75a9f000-7fdf75ac1000 r--p 0...0 08:10 42911   /usr/lib/x86_64-linux-gnu/libc-2.31.so
7fdf75c91000-7fdf75c92000 r--p 0...0 08:10 43181   /usr/lib/x86_64-linux-gnu/libdl-2.31.so
7fdf75ca0000-7fdf75ca1000 r--p 0...0 08:10 46877   /home/jpatri/test/lib_shared_exe/libm1.so
7fdf75ca7000-7fdf75ca8000 r--p 0...0 08:10 38549   /usr/lib/x86_64-linux-gnu/ld-2.31.so
7ffd3a13c000-7ffd3a15e000 rw-p 0...0 00:00 0       [stack]
```