Sistemas Empotrados

Tema 3:
Cargador de arranque

Lección 8:
Diseño de un boot loader básico

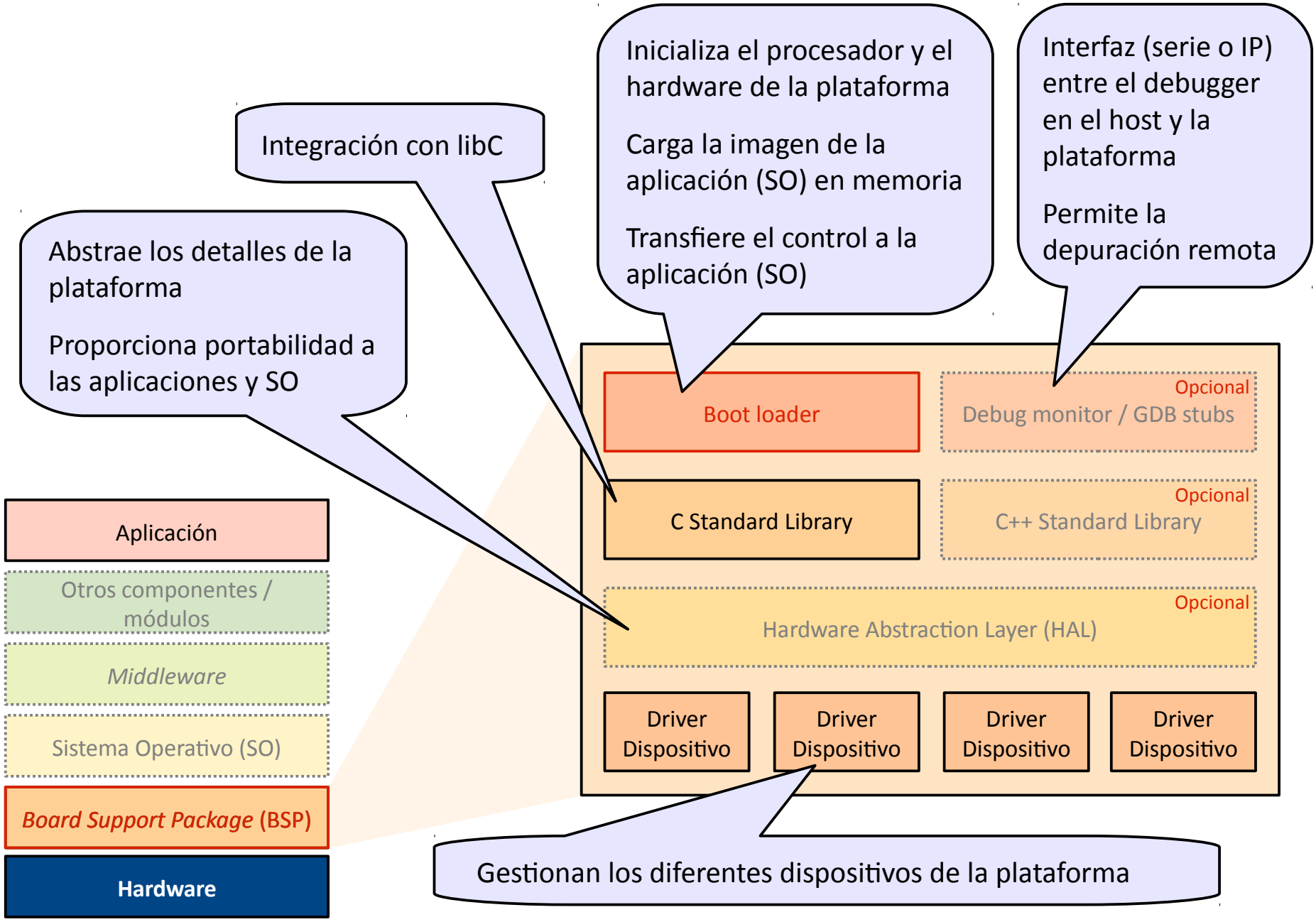
Jesús González Peñalver

Contenidos

Tema 3: Cargador de arranque

- Necesidad de un boot loader en cualquier sistema empotrado
- Entrada tras el reset y salto a la aplicación
- Soporte para variables globales
- Soporte para funciones y variables locales
- Carga de la aplicación en la RAM
- Remapeo de la memoria
- Soporte para excepciones
- Soporte para memoria dinámica
- Soporte para todos los modos de ejecución
- Inicialización de los dispositivos

Componentes del *Board Support Package* (BSP)



Necesidad de un *boot loader*

Una aplicación en C asume que...

- El programa empieza en la función main, pero..., ¿quién llama a la función main?
- Se puede hacer llamadas a funciones, luego..., es necesario crear e inicializar una pila
- Se puede usar memoria dinámica, luego..., es necesario crear e inicializar un heap
- Se pueden usar variables globales, pero..., ¿quien las inicializa antes de llamar a la función main?
- Existe E/S estándar (printf asume que existe stdout), pero..., ¿quien los define e inicializa?
- Los periféricos van a funcionar adecuadamente, pero..., ¿quién los inicializa?
- Hay soporte de excepciones e interrupciones, pero..., ¿quién los inicializa?

El cargador de arranque *(boot loader)*

- Se ejecuta tras un reset del sistema
- Inicializa las memorias, los dispositivos y controladores del sistema
- Configura el entorno de ejecución de C (C *Runtime*, crt0)
- Copia el código de la aplicación y sus datos (de la ROM, flash, usb, etc.) a la memoria RAM
- Llama a la función main de la aplicación
- Algunas de estas tareas sólo se pueden hacer en ensamblador

Desarrollo sin *runtime* de C

Hola mundo en C sin runtime de C

```
/* Registro de control de dirección del GPIO32-GPIO63 */
#define REG_GPIO_PAD_DIR1       ((volatile int *) 0x80000004)

/* Registro de activación de bits del GPIO32-GPIO63 */
#define REG_GPIO_DATA_SET1      ((volatile int *) 0x8000004c)

/* Registro de limpieza de bits del GPIO32-GPIO63 */
#define REG_GPIO_DATA_RESET1    ((volatile int *) 0x80000054)

/* El led rojo está en el GPIO 44 */
#define LED_RED_MASK            (0x00001000)

/* Retardo para la espera */
#define RETARDO                 (0x100000)

void _start(void)
{
    register int i;

    /* Configuramos el GPIO44 para que sea de salida */
    *REG_GPIO_PAD_DIR1 = LED_RED_MASK;

    while (1)
    {
        *REG_GPIO_DATA_SET1 = LED_RED_MASK;
        for (i=0 ; i<RETARDO ; i++);

        *REG_GPIO_DATA_RESET1 = LED_RED_MASK;
        for (i=0 ; i<RETARDO ; i++);
    }
}
```

No hay variables globales, hay que usar #define

El linker debe colocar _start en la dirección 0x00000000

No hay variables locales, hay que usar registros

Acceso directo a los puertos de E/S mediante punteros

No hay funciones, hay que volver a copiar el código para el retardo

Desarrollo sin *runtime* de C

Linker script

```
/*
 * Punto de entrada del programa
 */
ENTRY(_start)

/*
 * Mapa de memoria de la placa
 */
MEMORY
{
  flash : org = 0x00000000, len = 0x00100000
}

/*
 * Secciones de salida
 */
SECTIONS
{
    /* Código del programa */
    .text :
    {
        *(.text);
    } > flash
}
```

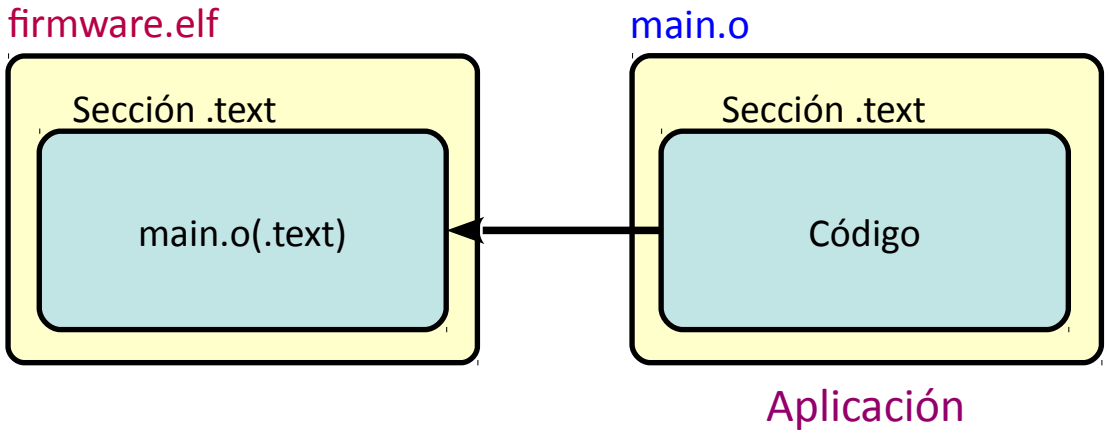
El programa empieza en la etiqueta _start

El mapa variará de una plataforma a otra, pero al arrancar, siempre existirá una ROM o una Flash mapeada a la dirección 0x00000000

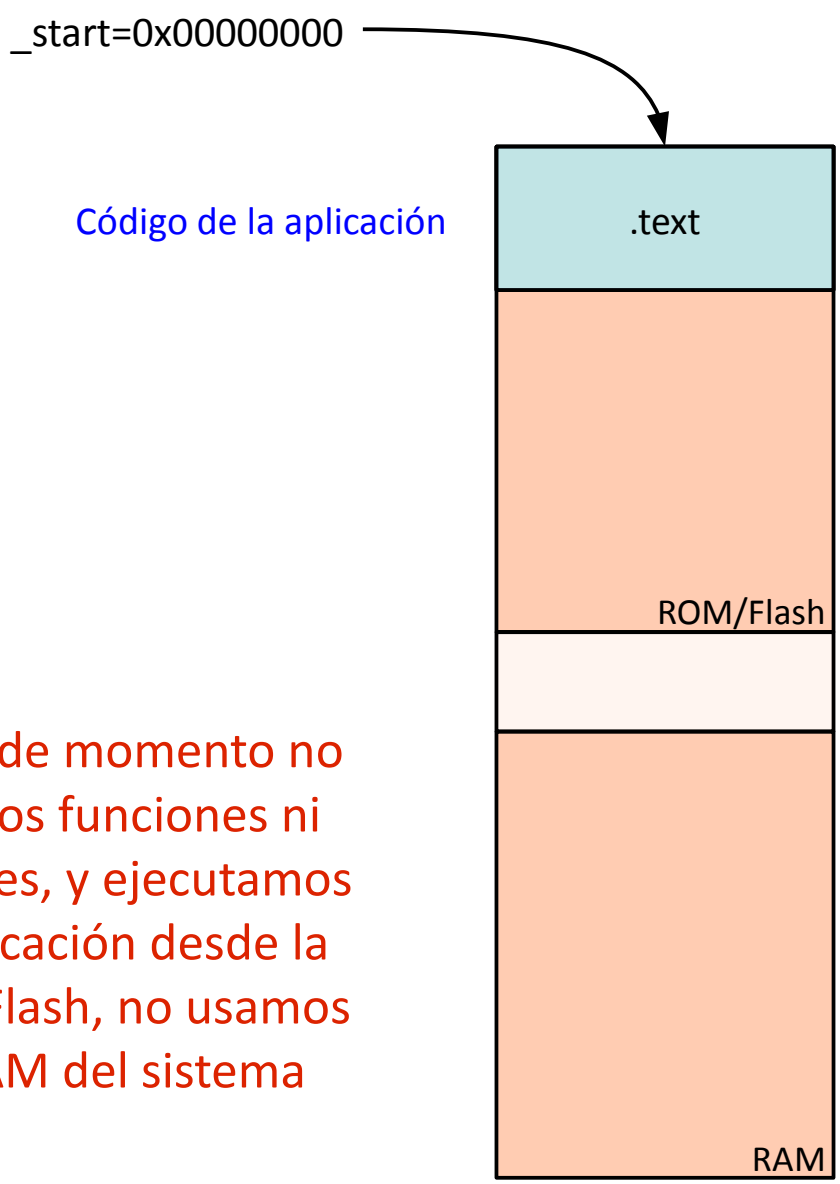
Ejecutamos desde la flash. VMA = LMA

Como la primera instrucción del código es la que tiene la etiqueta _start, y la Flash está mapeada a la dirección 0x00000000, hemos asignado la dirección 0x00000000 a la etiqueta _start

Estructura de nuestro firmware



Ejecución de nuestro firmware



Como de momento no usamos funciones ni variables, y ejecutamos la aplicación desde la ROM/Flash, no usamos la RAM del sistema

Contenidos

Tema 3: Cargador de arranque

- Necesidad de un boot loader en cualquier sistema empotrado
- Entrada tras el reset y salto a la aplicación
- Soporte para variables globales
- Soporte para funciones y variables locales
- Carga de la aplicación en la RAM
- Remapeo de la memoria
- Soporte para excepciones
- Soporte para memoria dinámica
- Soporte para todos los modos de ejecución
- Inicialización de los dispositivos

El boot loader paso a paso: Entrada tras el reset

- Entrada tras un reset
- Inicializar los dispositivos críticos
- Inicializar los vectores de excepción
- Remapear la memoria
- Inicializar las pilas y el heap
- Detectar el origen de la aplicación
- Cargar la aplicación en memoria RAM
- Inicializar las variables en memoria RAM
- Inicializar el resto de dispositivos
- Habilitar interrupciones
- Cambiar a modo user
- Saltar a main
- Bucle infinito

Al arrancar el sistema, el procesador está en el modo privilegiado supervisor (SVC) y PC = 0x00000000

La dirección 0 debe estar mapeada a una memoria no volátil que contenga los vectores de excepción

Tras los vectores de excepción se puede poner una nota de copyright, para que aparezca al principio de la ROM/flash

```
@ Sección de código de arranque
        .code 32
        .section .startup, "xa"

@ Vectores de excepción en la ROM
        .global _reset
_reset: b       _start
_und:   b       .
_swi:   b       .
_pabt:  b       .
_dabt:  b       .
_rsv:   b       .
_irq:   b       .
_fiq:   b       .

@ Nota del copyright al principio de la ROM
        .string "Copyright (C) UGR"
        .align  4

@ Comienza el cargador
        .global _start
        .type   _start, %function
_start:
```

Definimos una sección para el crt

El linker debe colocar _reset en la dirección 0x00000000

El boot loader paso a paso: Salto a main

- Entrada tras un reset
- Inicializar los dispositivos críticos
- Inicializar los vectores de excepción
- Remapear la memoria
- Inicializar las pilas y el heap
- Detectar el origen de la aplicación
- Cargar la aplicación en memoria RAM
- Inicializar las variables en memoria RAM
- Inicializar el resto de dispositivos
- Habilitar interrupciones
- Cambiar a modo user
- Saltar a main
- Bucle infinito

```
@ Salto a main
        ldr     ip, =main

        @ lr guarda la dirección de retorno
        @ pc apunta 2 instrucciones más abajo
        mov     lr, pc

        @ Salto global a la funcion main
        bx      ip

@ Colgamos el sistema si main retorna
        b       .
```

El código de la aplicación puede estar en ARM o Thumb

Nuestro programa C ya empieza en main, aunque seguimos sin soporte de variables (ni locales ni globales) y sin llamadas a función

Main no debería retornar. Si lo hiciera, entramos en un bucle infinito

Ya se entra desde la función main

Hola mundo en C

```
/* Registro de control de dirección del GPIO32-GPIO63 */
#define REG_GPIO_PAD_DIR1       ((volatile int *) 0x80000004)

/* Registro de activación de bits del GPIO32-GPIO63 */
#define REG_GPIO_DATA_SET1      ((volatile int *) 0x8000004c)

/* Registro de limpieza de bits del GPIO32-GPIO63 */
#define REG_GPIO_DATA_RESET1    ((volatile int *) 0x80000054)

/* El led rojo está en el GPIO 44 */
#define LED_RED_MASK            (0x00001000)

/* Retardo para la espera */
#define RETARDO                 (0x100000)

int main (void) {
    register int i;

    /* Configuramos el GPIO44 para que sea de salida */
    *REG_GPIO_PAD_DIR1 = LED_RED_MASK;

    while (1)
    {
        *REG_GPIO_DATA_SET1 = LED_RED_MASK;
        for (i=0 ; i<RETARDO ; i++);

        *REG_GPIO_DATA_RESET1 = LED_RED_MASK;
        for (i=0 ; i<RETARDO ; i++);
    }
    return 0;
}
```

Seguimos sin variables globales, hay que usar #define

Seguimos sin variables locales, hay que usar registros

Acceso directo a los puertos de E/S mediante punteros

Seguimos sin funciones, hay que volver a copiar el código para el retardo

Entrada tras el reset y salto a la aplicación

Linker script

```
/*
 * Punto de entrada del cargador
 */
ENTRY(_reset)

/*
 * Mapa de memoria de la placa
 */
MEMORY
{
  flash : org = 0x00000000, len = 0x00100000
}

/*
 * Secciones de salida
 */
SECTIONS
{
    /* Código del cargador */
    .startup :
    {
        *(.startup);

    } > flash

    /* Código del programa */
    .text :
    {
        *(.text);
    } > flash
}
```

El cargador empieza en el vector de _reset

Código del fichero crt.o.

El vector de reset es la primera instrucción del cargador, que está mapeado al principio de la Flash, a la dirección 0x00000000

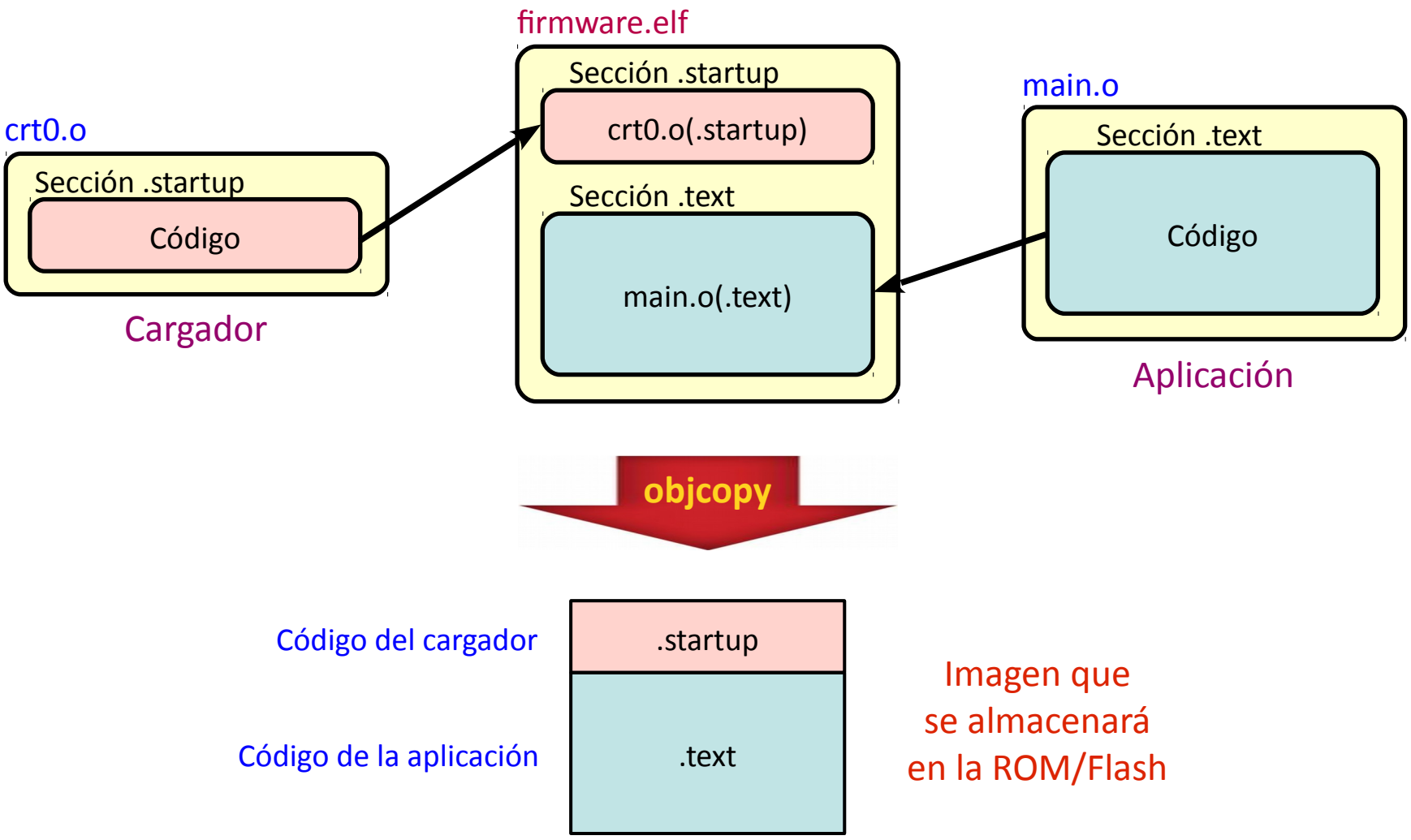
De momento sólo salta a main

El cargador se ejecuta desde la flash. VMA = LMA

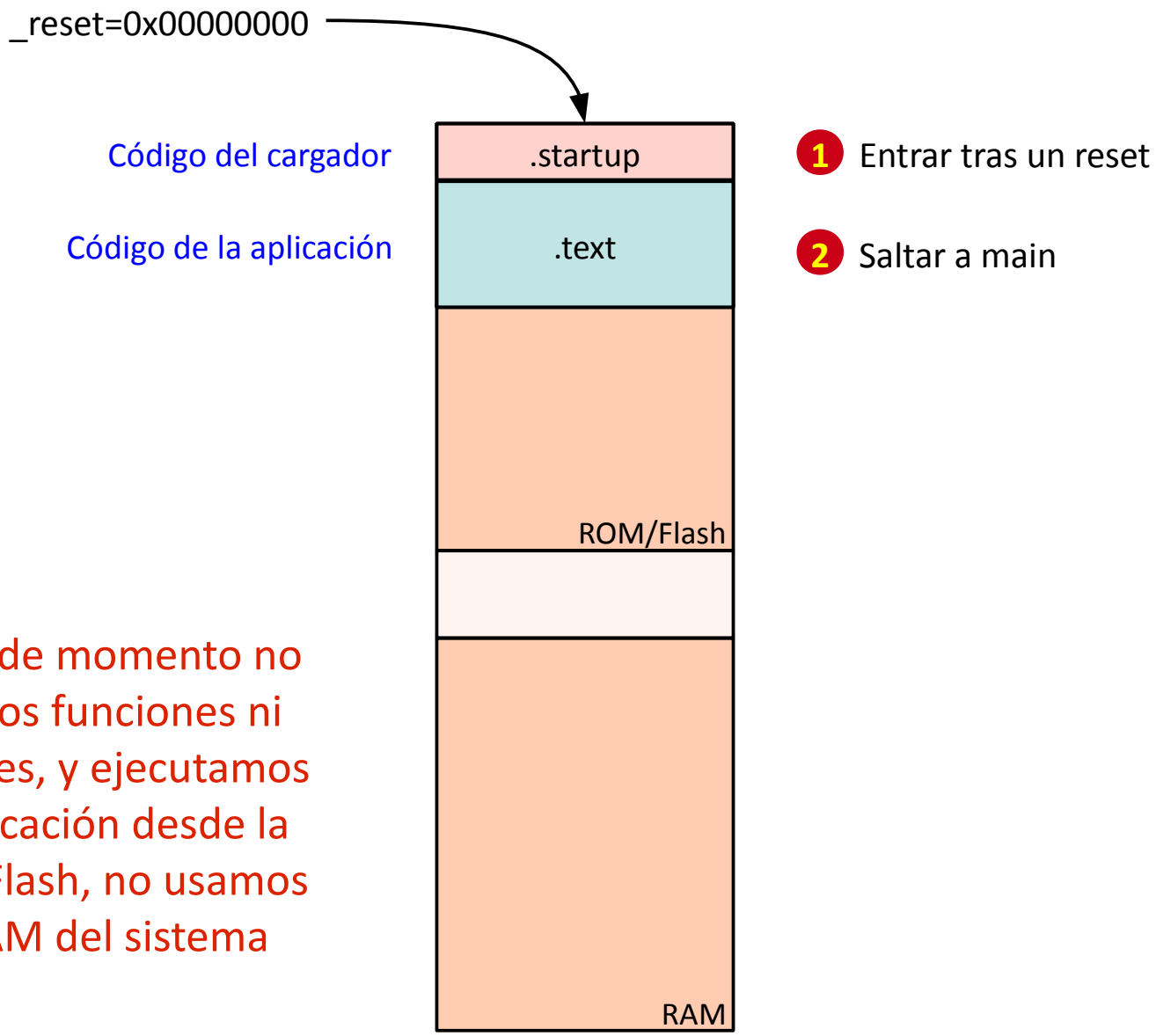
Código del resto de ficheros objeto

La aplicación se ejecuta desde la flash. VMA = LMA

Estructura de nuestro firmware



Ejecución de nuestro firmware



Como de momento no usamos funciones ni variables, y ejecutamos la aplicación desde la ROM/Flash, no usamos la RAM del sistema

Contenidos

Tema 3: Cargador de arranque

- Necesidad de un boot loader en cualquier sistema empotrado
- Entrada tras el reset y salto a la aplicación
- Soporte para variables globales
- Soporte para funciones y variables locales
- Carga de la aplicación en la RAM
- Remapeo de la memoria
- Soporte para excepciones
- Soporte para memoria dinámica
- Soporte para todos los modos de ejecución
- Inicialización de los dispositivos

El boot loader paso a paso: Soporte para variables globales

- Entrada tras un reset
- Inicializar los dispositivos críticos
- Inicializar los vectores de excepción
- Remapear la memoria
- Inicializar las pilas y el heap
- Detectar el origen de la aplicación
- Cargar la aplicación en memoria RAM
- **Inicializar las variables en memoria RAM**
- Inicializar el resto de dispositivos
- Habilitar interrupciones
- Cambiar a modo user
- Saltar a main
- Bucle infinito

El compilador emite las variables globales inicializadas a cero a la sección .bss y las variables sin inicializar a la sección COMMON.

El enlazador genera direcciones VMA en la RAM para las variables de las secciones .bss y COMMON.

El cargador debe inicializar a cero todas estas variables en sus correspondientes direcciones en la RAM

```
@ Fijamos a 0 la memoria RAM reservada para las
@ variables sin inicializar

        ldr     a1, =_bss_start
        ldr     a2, =_bss_end
        ldr     a3, =0
        bl      _ram_init
```

Direcciones generadas por el linker

```
@ Rutina para inicializar una zona de memoria RAM
@   a1: Posición inicial en la memoria RAM
@   a2: Posición final en la memoria RAM
@   a3: Valor para la inicialización

        .type   _ram_init, %function
_ram_init:
        cmp     a1, a2
        strne   a3, [a1], #+4
        bne     _ram_init

        mov     pc, lr
```

El boot loader paso a paso: Soporte para variables globales

- Entrada tras un reset
- Inicializar los dispositivos críticos
- Inicializar los vectores de excepción
- Remapear la memoria
- Inicializar las pilas y el heap
- Detectar el origen de la aplicación
- Cargar la aplicación en memoria RAM
- **Inicializar las variables en memoria RAM**
- Inicializar el resto de dispositivos
- Habilitar interrupciones
- Cambiar a modo user
- Saltar a main
- Bucle infinito

El compilador emite las variables globales inicializadas a la sección .data

El enlazador genera direcciones VMA para las variables en la RAM y direcciones LMA para sus valores iniciales, que están en la imagen del programa, en la ROM/Flash

El cargador deberá copiar los valores iniciales de las variables de la ROM/Flash a su correspondiente dirección de memoria en la RAM

```
@ Copiamos los valores de las variables de su
@ dirección LMA a la VMA

        ldr     a1, =_data_start
        ldr     a2, =_data_end
        ldr     a3, =_data_flash_start
        bl      _ram_copy
```

Direcciones generadas por el linker

```
@ Rutina para copiar bloques de memoria
@   a1: Dirección inicial en la RAM
@   a2: Dirección final en la RAM
@   a3: Dirección inicial en la ROM
        .type   _ram_copy, %function
_ram_copy:
        cmp     a1, a2
        bge     1f
        ldrb    a4, [a3], #+1
        strb    a4, [a1], #+1
        b       _ram_copy
1:      mov     pc, lr
```

El boot loader paso a paso: Soporte para variables globales

- Entrada tras un reset
- Inicializar los dispositivos críticos
- Inicializar los vectores de excepción
- Remapear la memoria
- Inicializar las pilas y el heap
- Detectar el origen de la aplicación
- Cargar la aplicación en memoria RAM
- **Inicializar las variables en memoria RAM**
- Inicializar el resto de dispositivos
- Habilitar interrupciones
- Cambiar a modo user
- Saltar a main
- Bucle infinito

El compilador emite las constantes globales a las secciones .rodata, .rodata.str, etc.

De momento dejaremos las constantes globales en la ROM/Flash, ya que no van a cambiar a lo largo de la ejecución de la aplicación

Ya podemos usar variables globales

Hola mundo en C

```
/* Registro de control de dirección del GPIO32-GPIO63 */
#define REG_GPIO_PAD_DIR1       ((volatile int *) 0x80000004)

/* Registro de activación de bits del GPIO32-GPIO63 */
#define REG_GPIO_DATA_SET1      ((volatile int *) 0x8000004c)

/* Registro de limpieza de bits del GPIO32-GPIO63 */
#define REG_GPIO_DATA_RESET1    ((volatile int *) 0x80000054)

/* El led rojo está en el GPIO 44 */
#define LED_RED_MASK            (0x00001000)

/* Variables globales */
int retardo1 = 0x100000;        /* Variable inicializada -> .data */
const int retardo2 = 0x10000;   /* Constante -> .rodata */
int i = 0;                      /* Variable inicializada a cero -> .bss */
int j;                          /* Variable sin inicializar -> COMMON */

int main (void) {
    /* Configuramos el GPIO44 para que sea de salida */
    *REG_GPIO_PAD_DIR1 = LED_RED_MASK;

    while (1) {
        *REG_GPIO_DATA_SET1 = LED_RED_MASK;
        for (i=0 ; i<retardo1 ; i++);

        *REG_GPIO_DATA_RESET1 = LED_RED_MASK;
        for (j=0 ; j<retardo2 ; j++);
    }
    return 0;
}
```

Ya tenemos soporte para variables globales

Usamos variables globales. Todavía no tenemos pila

Seguimos sin funciones, hay que volver a copiar el código para el retardo

Soporte para variables globales

Linker script

```
MEMORY
{
  flash : org = 0x00000000, len = 0x00100000
  ram   : org = 0x00300000, len = 0x00040000
}

SECTIONS
{
    .rodata : {
        *(.rodata*);
        . = ALIGN(4) ;
    } > flash

    .data : {
        _data_start = . ;
        *(.data);
        . = ALIGN(4) ;
        _data_end = . ;
    } > ram AT > flash
    _data_flash_start = LOADADDR(.data);

    .bss : {
        _bss_start = . ;
        *(.bss);
        . = ALIGN(4) ;
        *(COMMON);
        . = ALIGN(4) ;
        _bss_end = . ;
    } > ram
}
```

Ya usamos la RAM para las VMA de las variables

Las secciones .startup y .text no cambian. No las repetimos

Como las constantes podrían tener cualquier tamaño, conviene alinear el final de la sección a una frontera de 32 bits

Dejamos las constantes en la ROM/Flash. VMA = LMA

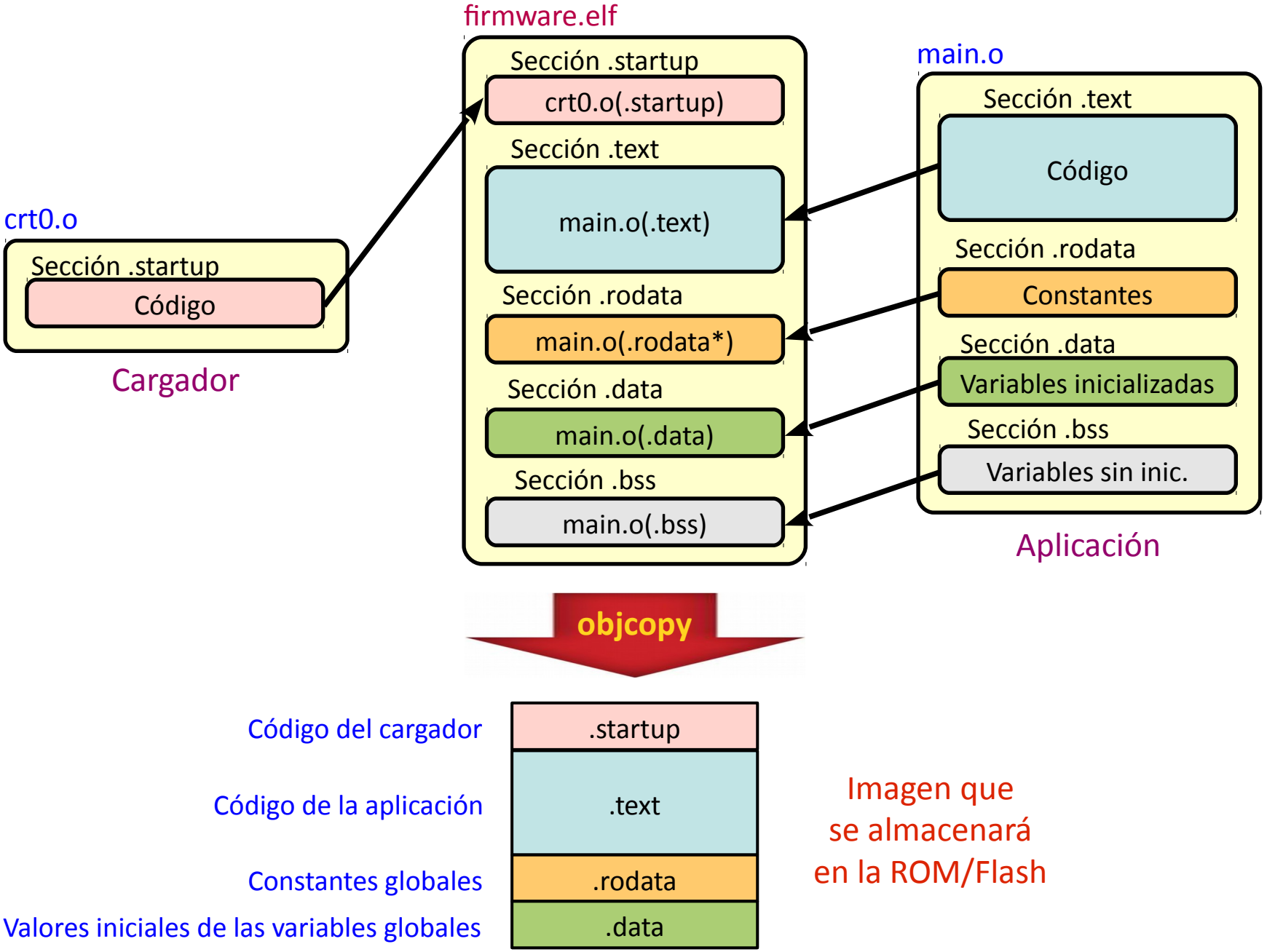
Direcciones VMA de comienzo y fin de las variables inicializadas en la RAM

Dirección LMA de comienzo de los valores iniciales de las variables en la Flash/ROM

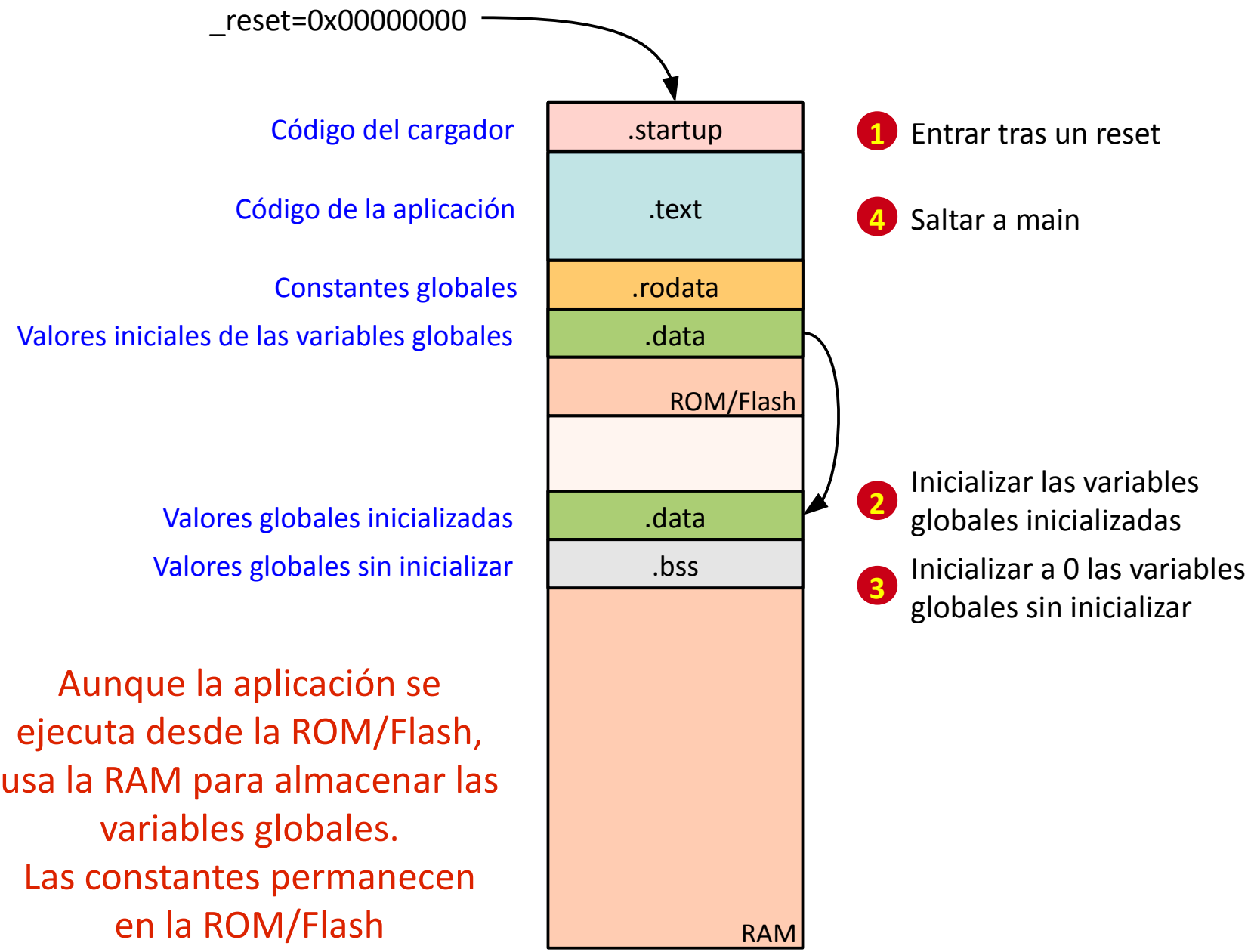
Direcciones VMA de comienzo y fin de las variables sin inicializar en la RAM

Sólo asignamos direcciones VMA en la RAM

Estructura de nuestro firmware



Ejecución de nuestro firmware



Aunque la aplicación se ejecuta desde la ROM/Flash, usa la RAM para almacenar las variables globales.
Las constantes permanecen en la ROM/Flash

Contenidos

Tema 3: Cargador de arranque

- Necesidad de un boot loader en cualquier sistema empotrado
- Entrada tras el reset y salto a la aplicación
- Soporte para variables globales
- Soporte para funciones y variables locales
- Carga de la aplicación en la RAM
- Remapeo de la memoria
- Soporte para excepciones
- Soporte para memoria dinámica
- Soporte para todos los modos de ejecución
- Inicialización de los dispositivos

El boot loader paso a paso: Soporte para funciones y variables locales

- Entrada tras un reset
- Inicializar los dispositivos críticos
- Inicializar los vectores de excepción
- Remapear la memoria
- **Inicializar las pilas y el heap**
- Detectar el origen de la aplicación
- Cargar la aplicación en memoria RAM
- Inicializar las variables en memoria RAM
- Inicializar el resto de dispositivos
- Habilitar interrupciones
- Cambiar a modo user
- Saltar a main
- Bucle infinito

Necesitamos una pila para realizar el paso de parámetros en las llamadas a función, así como para que las funciones puedan alojar sus variables locales

Es conveniente inicializar la pila a un valor conocido para poder estimar (a posteriori) el uso que se ha hecho de ella, de cara optimizar su tamaño

El cargador debe inicializar la pila y el registro SP para que apunte a su tope

Aunque la arquitectura ARM soporta una pila para cada modo de ejecución, de momento sólo vamos a usar el modo SVC, por lo que sólo creamos una pila

```
@ Valor para inicializar la pila
.set _STACK_FILLER, 0xdeadbeef
```

```
@ Inicializamos la pila

        ldr     a1, =_stack_bottom
        ldr     a2, =_stack_top
        ldr     a3, =_STACK_FILLER
        bl      _ram_init

        ldr     sp, =_stack_top
```

Direcciones generadas por el linker

Ya podemos usar variables locales y funciones

Hola mundo en C

```
#define REG_GPIO_PAD_DIR1       ((volatile int *) 0x80000004)
#define REG_GPIO_DATA_SET1      ((volatile int *) 0x8000004c)
#define REG_GPIO_DATA_RESET1    ((volatile int *) 0x80000054)
#define LED_RED_MASK            (0x00001000)

/* Variables globales */
int retardo = 0x100000;         /* Variable inicializada -> data */

/* Función para esperar */
void esperar (void)
{
    int i;
    for (i=0 ; i<retardo ; i++);
}

int main ()
{
    /* Configuramos el GPIO44 para que sea de salida */
    *REG_GPIO_PAD_DIR1 = LED_RED_MASK;
    while (1)
    {
        *REG_GPIO_DATA_SET1 = LED_RED_MASK;
        esperar();

        *REG_GPIO_DATA_RESET1 = LED_RED_MASK;
        esperar();
    }

    return 0;
}
```

Ya tenemos soporte para variables locales

Ya podemos llamar a funciones

Soporte para funciones y variables locales

Linker script

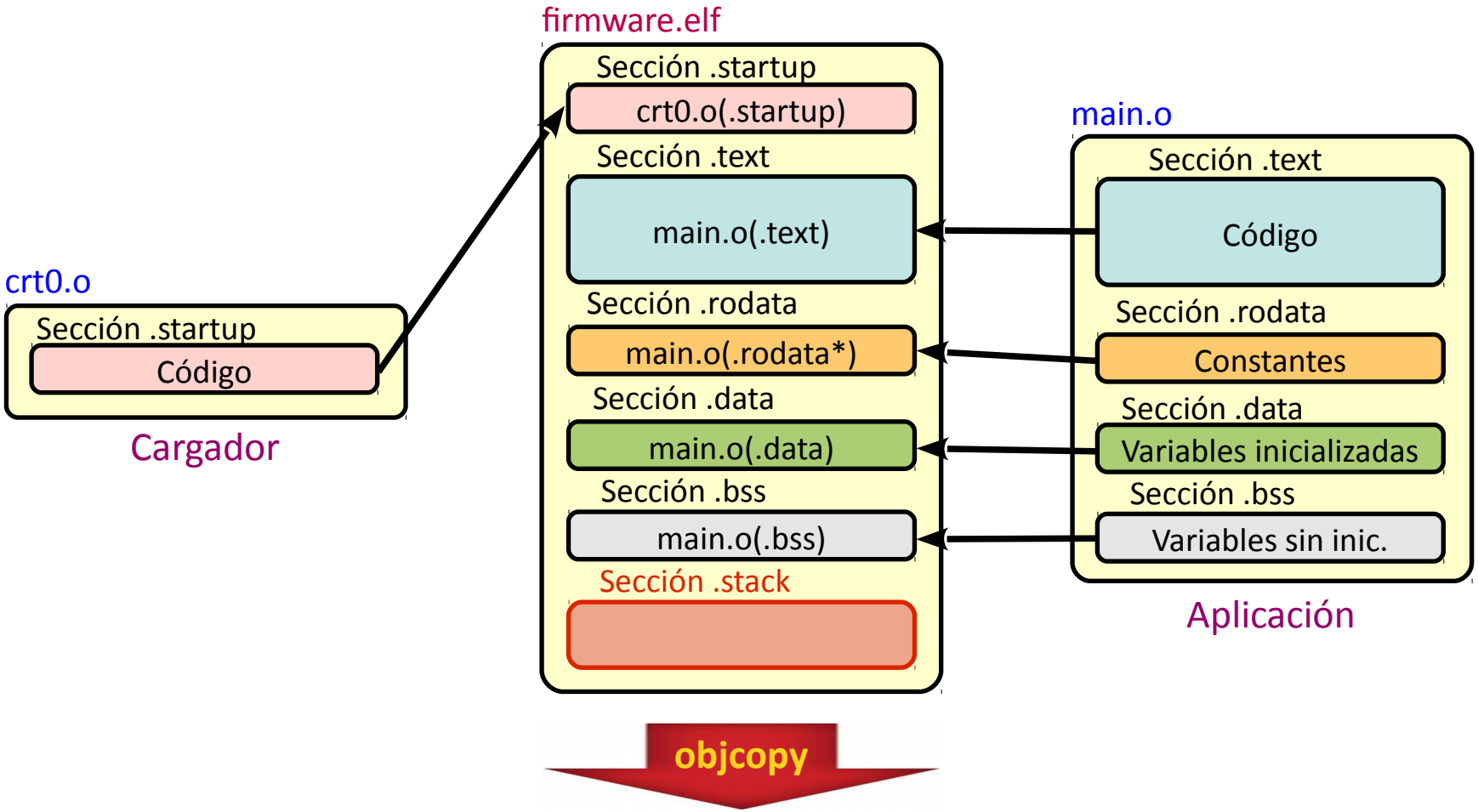
```
ENTRY(_reset)

MEMORY
{
  flash : org = 0x00000000, len = 0x00100000
  ram   : org = 0x00300000, len = 0x00040000
}

SECTIONS
{
    .startup :  { ... } > flash

    .text :     { ... } > flash

    .rodata :   { ... } > flash

    .data :     { ... } > ram AT > flash
    _data_flash_start = LOADADDR(.data);

    .bss :      { ... } > ram

    _ram_limit = ORIGIN(ram) + LENGTH(ram);
    _stack_size = 0x800;

    .stack _ram_limit - _stack_size :
    {
        _stack_bottom = . ;
        . += _stack_size ;
        _stack_top = . ;
    }
}
```

El resto del script no varía

Definimos una zona de 2 KB al final de la RAM para alojar la pila

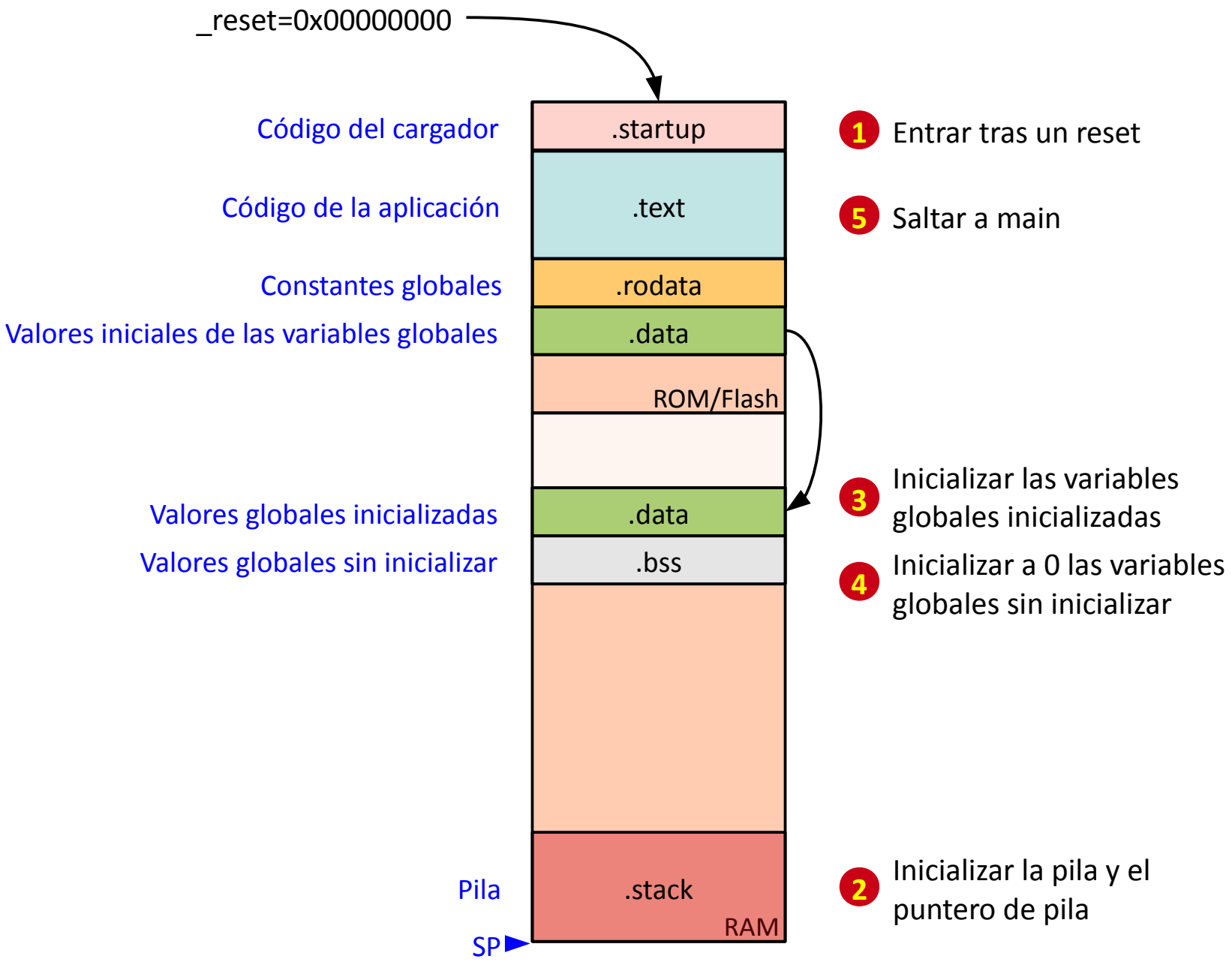
En este caso nos interesa usar direcciones VMA en vez de regiones de memoria

Estructura de nuestro firmware



La imagen no varía. El linker ha añadido una nueva sección para la pila y el cargador contiene código para inicializarla

Ejecución de nuestro firmware



Contenidos

Tema 3: Cargador de arranque

- Necesidad de un boot loader en cualquier sistema empotrado
- Entrada tras el reset y salto a la aplicación
- Soporte para variables globales
- Soporte para funciones y variables locales
- Carga de la aplicación en la RAM
- Remapeo de la memoria
- Soporte para excepciones
- Soporte para memoria dinámica
- Soporte para todos los modos de ejecución
- Inicialización de los dispositivos

El boot loader paso a paso: Carga de la aplicación en la RAM

- Entrada tras un reset
- Inicializar los dispositivos críticos
- Inicializar los vectores de excepción
- Remapear la memoria
- Inicializar las pilas y el heap
- Detectar el origen de la aplicación
- Cargar la aplicación en memoria RAM
- Inicializar las variables en memoria RAM
- Inicializar el resto de dispositivos
- Habilitar interrupciones
- Cambiar a modo user
- Saltar a main
- Bucle infinito

Lo más habitual es que el firmware y el cargador formen parte de la misma imagen grabada en la ROM/Flash

Algunos cargadores proporcionan la posibilidad de dejar el firmware en una flash externa, una tarjeta SD, o bien de descargar el firmware por un puerto serie (UART o USB)

En este último caso, será necesario detectar dónde está el firmware para poder cargarlo a la RAM

Si la aplicación está en una ROM o una NOR Flash se puede ejecutar directamente desde su ubicación. Sin embargo, el tiempo de lectura de estas memorias es significativamente más lento que el de la RAM. La copia a la RAM del código mejorará las prestaciones

Si la aplicación proviene de otra fuente (tarjeta SD, USB, UART, etc.), es necesario copiarla a la RAM para poder ejecutarla

```
@ Copiamos el código de la aplicación
@ de la ROM/Flash a la RAM

        ldr     a1, =_text_start
        ldr     a2, =_text_end
        ldr     a3, =_text_flash_start
        bl      _ram_copy
```

Direcciones generadas por el linker

Soporte para la carga de la aplicación en la RAM

Linker script

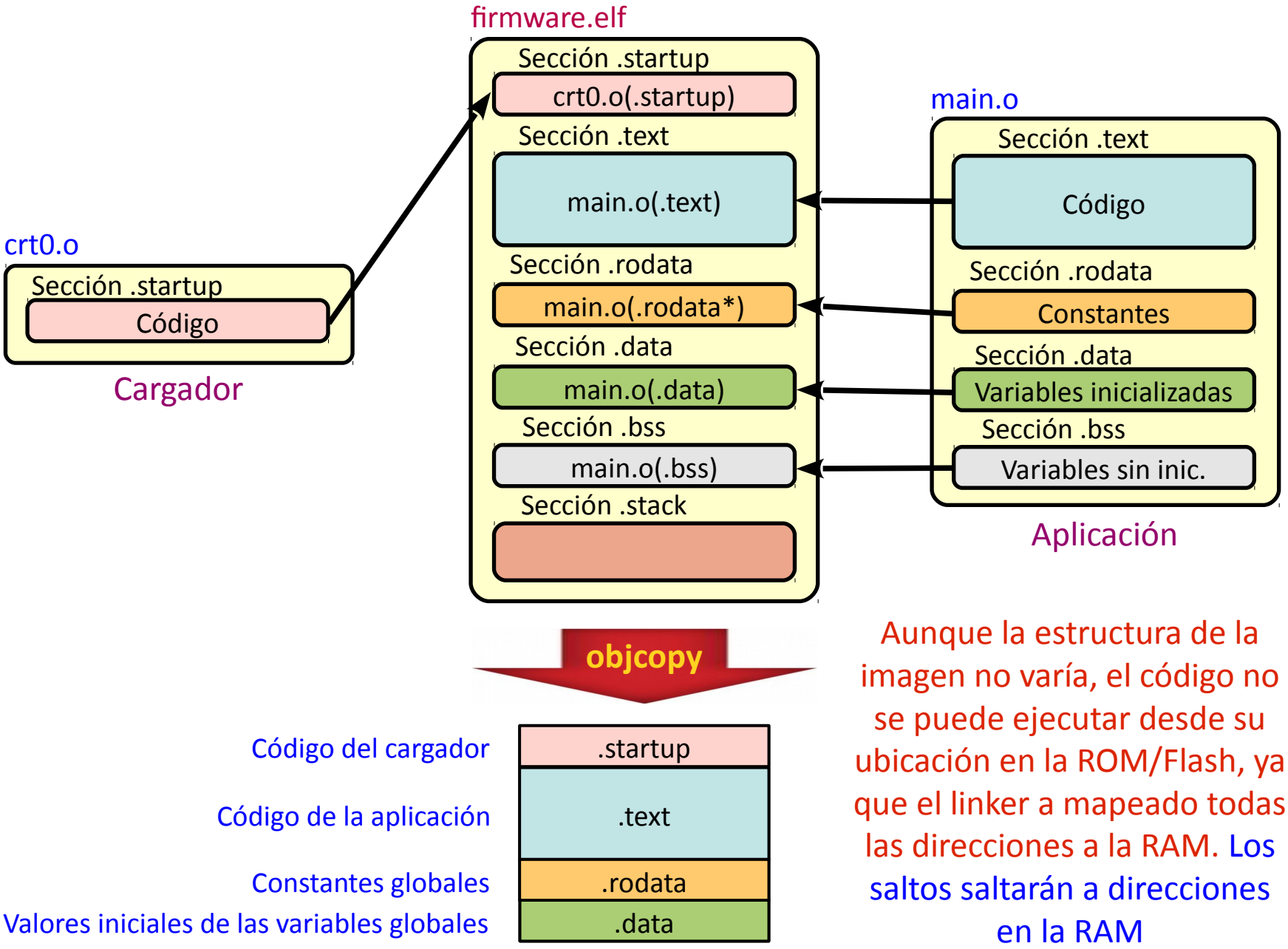
```
ENTRY(_reset)

MEMORY
{
  flash : org = 0x00000000, len = 0x00100000
  ram   : org = 0x00300000, len = 0x00040000
}

SECTIONS
{
    .startup :  { ... } > flash

    .text : {
        _text_start = . ;
        *(.text);
        _text_end = . ;
    } > ram AT > flash
    _text_flash_start = LOADADDR(.text);

    .rodata :   { ... } > flash

    .data :     { ... } > ram AT > flash
    _data_flash_start = LOADADDR(.data);

    .bss :      { ... } > ram

    _ram_limit = ORIGIN(ram) + LENGTH(ram);
    _stack_size = 0x800;

    .stack _ram_limit - _stack_size : { ... }
}
```

Definimos las direcciones VMA de inicio y fin del código en la RAM

Asignamos direcciones LMA diferentes de las VMA

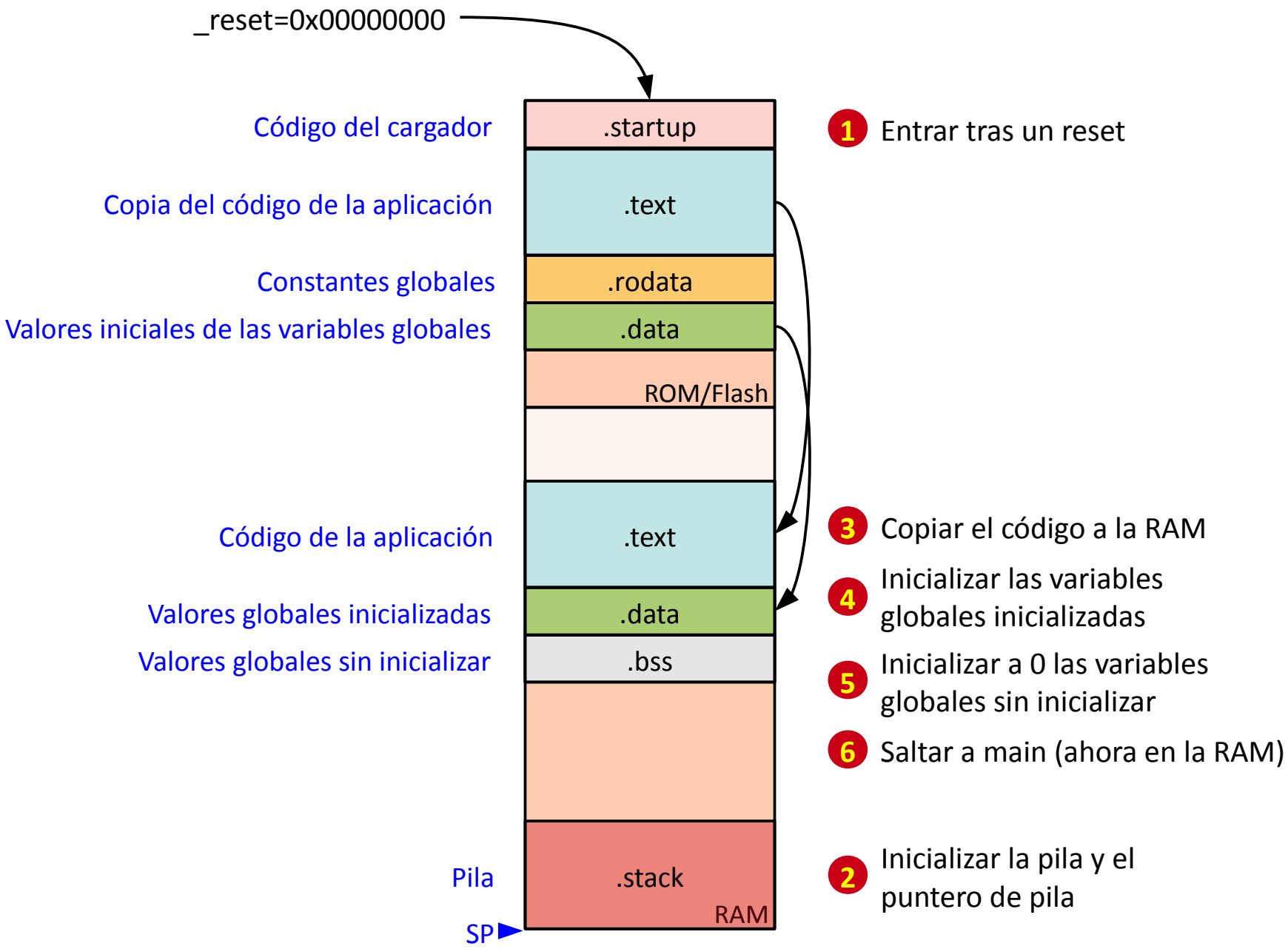
Dirección LMA de inicio del código en la ROM/Flash

Estructura de nuestro firmware



Aunque la estructura de la imagen no varía, el código no se puede ejecutar desde su ubicación en la ROM/Flash, ya que el linker a mapeado todas las direcciones a la RAM. Los saltos saltarán a direcciones en la RAM

Ejecución de nuestro firmware



Lecturas recomendadas

Cargador de arranque:

Q. Li, C. Yao. *Real-Time Concepts for Embedded Systems*. CMP Books, 2003. Capítulo 3

A. N. Sloss, D. Symes y C. Wright. *ARM Systems Developer's Guide. Designing and Optimizing System Software*. Morgan Kaufmann, 2004. Capítulo 10

M. Samek. *Building Bare-Metal ARM Systems with GNU: Part 1 Getting Started*. Embedded.com, 2007.

M. Samek. *Building Bare-Metal ARM Systems with GNU: Part 2 Startup Code and Low-level Initialization*. Embedded.com, 2007.

Atmel. *AT91 Assembler Code Startup Sequence for C Code Applications Software*, 2002. http://www.atmel.com/Images/doc2644.pdf

J. Bennett. *Howto: Porting Newlib. A Simple Guide*, 2010. Capítulo 5.2
http://www.embecosm.com/download/ean9.html

Rob Savoye. *Embed With GNU. Porting The GNU Tools To Embedded Systems*. Cygnus Support, 1995. Capítulo 3 http://www.gnuarm.com/pdf/porting.pdf