INSTITUTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA UDELAR

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA URUGUAY

Herramientas de desarrollo de software embebido

Sistemas embebidos para tiempo real

NEON
Network of Competence on Internet of Things

Co-funded by the Erasmus+ Programme of the European Union

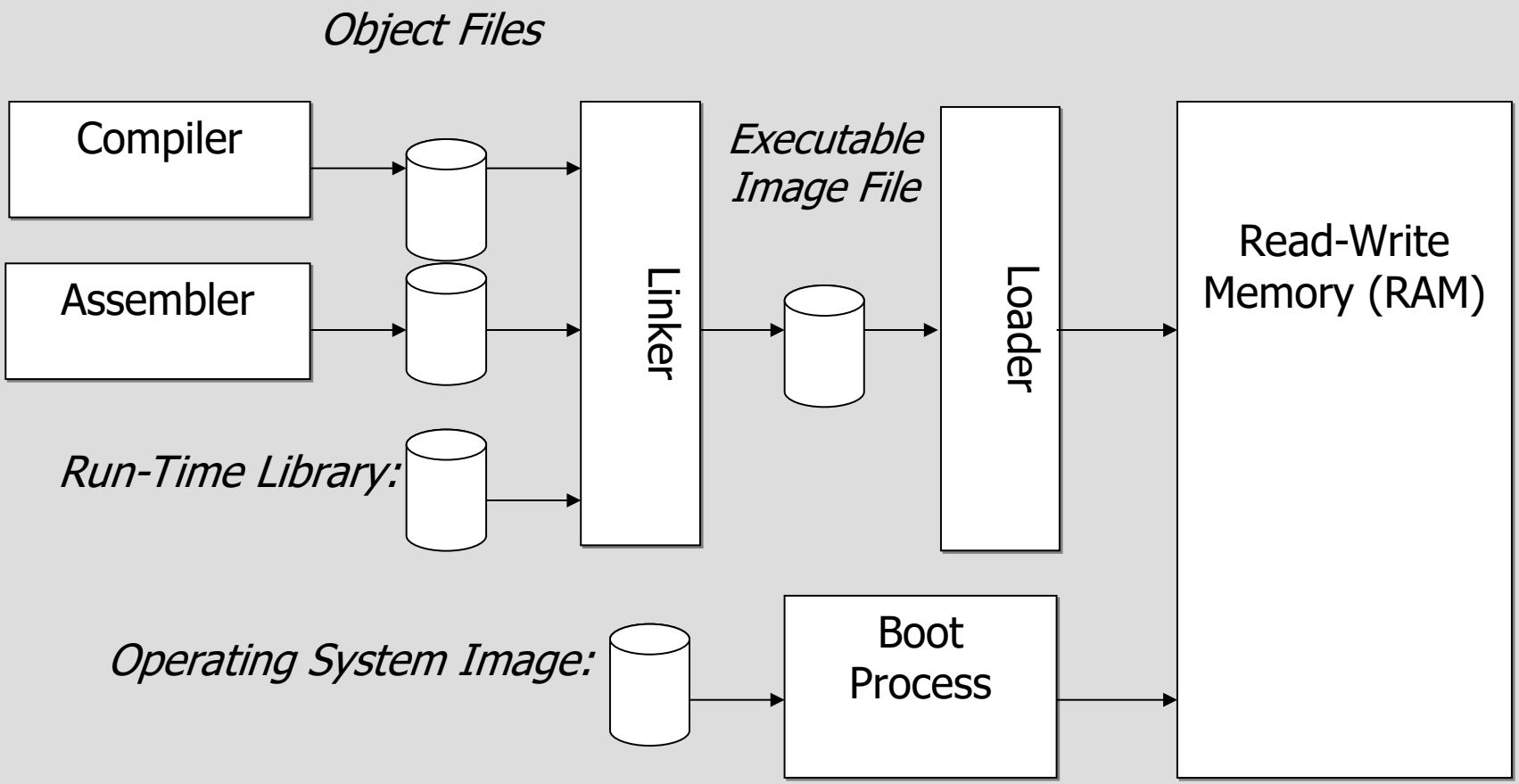
Objetivos

- Proceso de compilación de una aplicación
  - Compilación, linker/locator
  - Diferencias entre compiladores nativos y embebidos (cruzados).
- Inicialización de datos y arranque de programa
- Cargado de programa

Herramientas de desarrollo

- Conceptos (repaso):
  - *tool chain*
    - herramientas (compilador, ensamblador, etc.) compatibles
  - herramientas nativas (*native tools*)
    - Crea programas que corren en la computadora que se compila.
  - *host* (donde se desarrolla) vs. *target* (destino)
  - “compilador cruzado” (cross-compiler)
    - Compilador en *host* produce instrucciones binarias *target*.

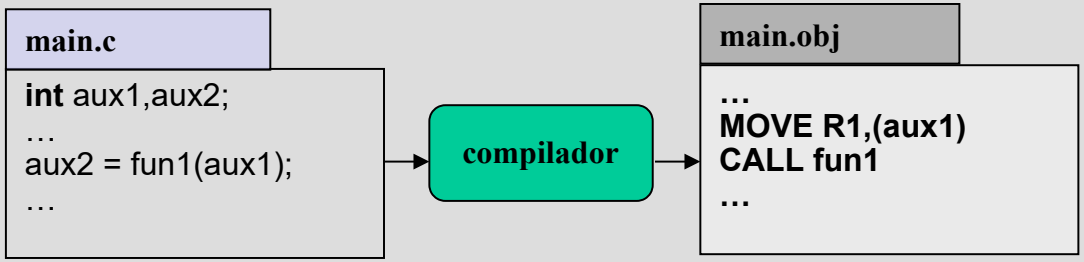
Proceso de creación y cargado:
programa de aplicación de escritorio



Fuente: Daniel W. Lewis, “Fundamentals of Embedded Software”

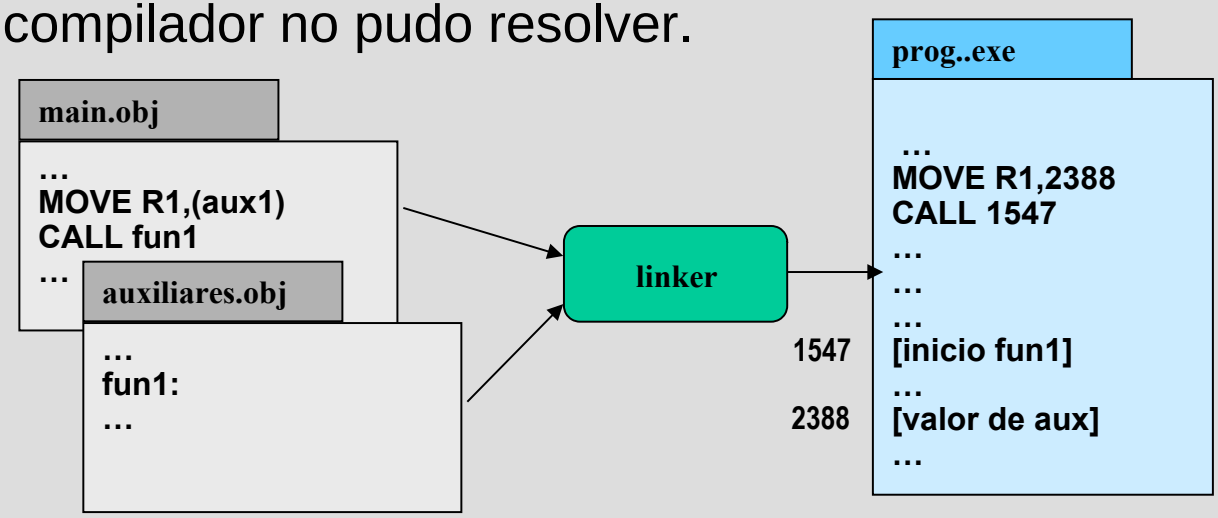
Compilador

- Traduce código fuente en lenguaje C a instrucciones de máquina generando un archivo objeto (unidad de compilación)



Enlazador (Linker)

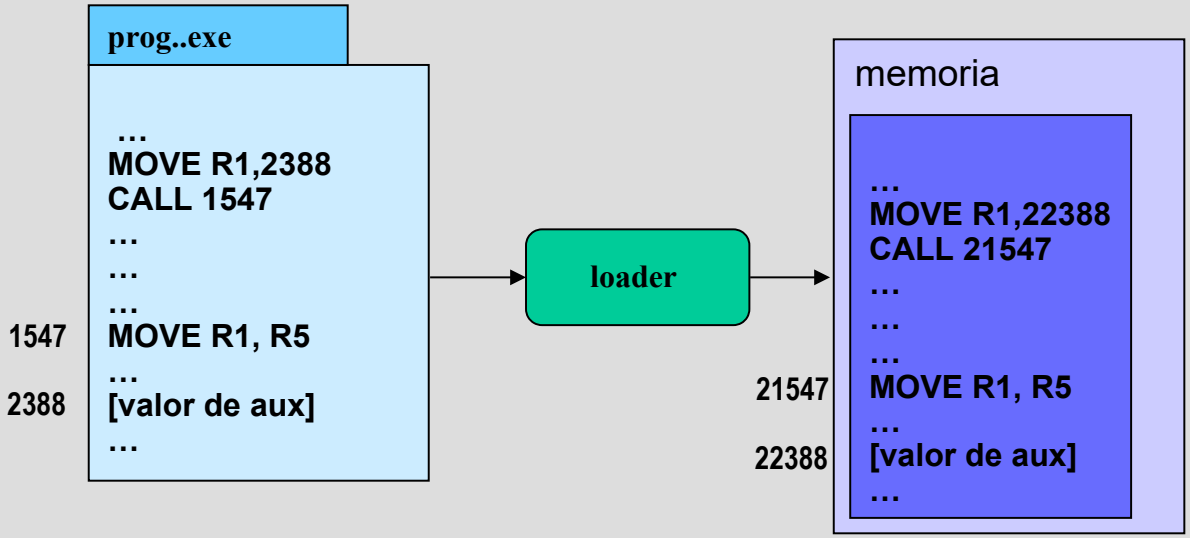
- “Junta” todos los archivos, resolviendo las referencias entre los archivos objetos
  - Determina las direcciones de las etiquetas que el compilador no pudo resolver.



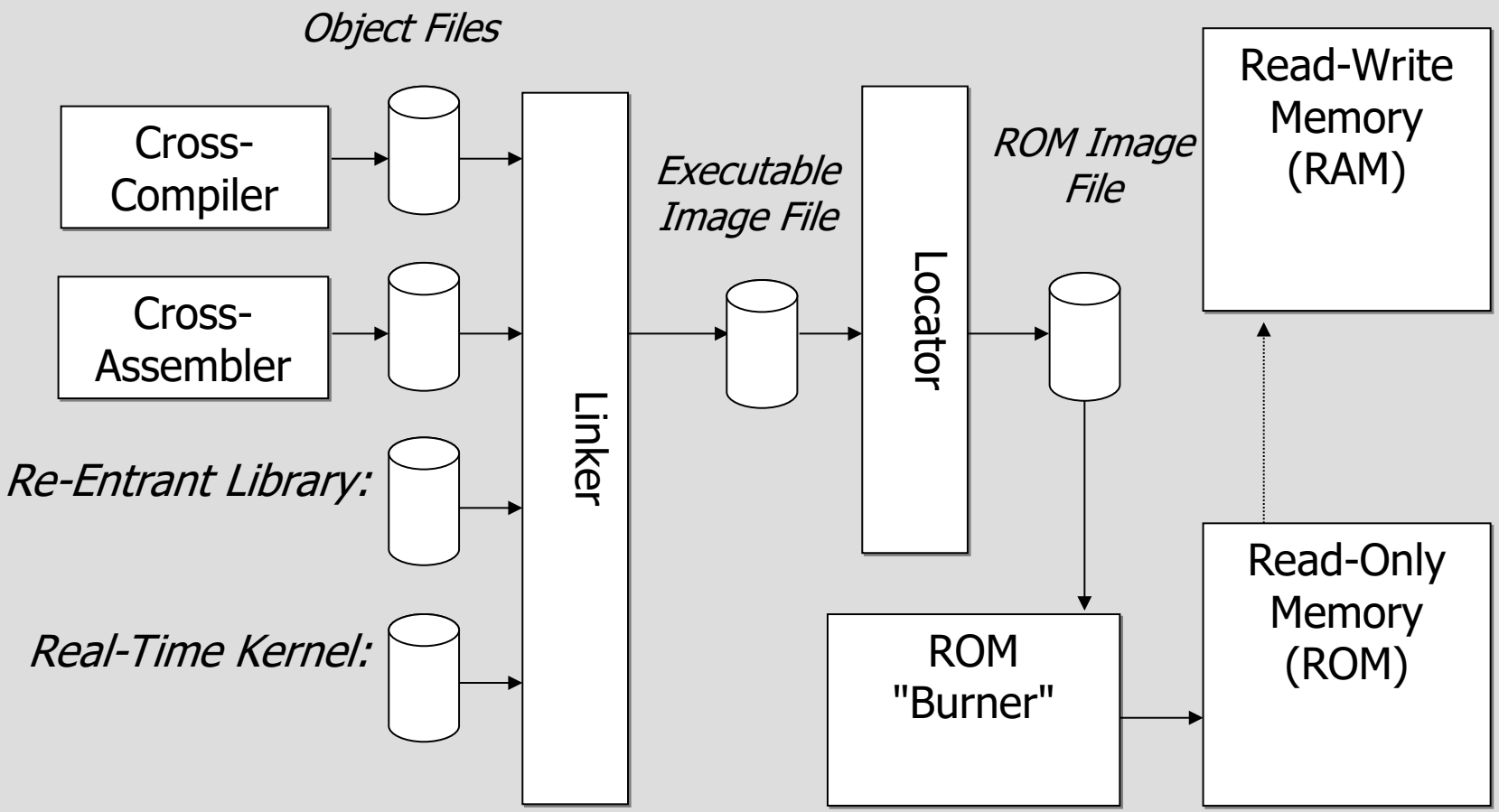
  - Por ejemplo: funciones y variables externas (`extern`) definidas en otros archivos.

Loader

- Ajusta las direcciones de memoria absolutas del código y de los datos en función de la dirección de base
  - Obs: cada vez pude ser cargado en diferentes regiones de memoria



Proceso de creación y cargado:
programa de aplicación embebido



Fuente: Daniel W. Lewis, "Fundamentals of Embedded Software"

Linker → Archivos Objeto

- ELF: Executable and Linking Format
  - Formato de código objeto ampliamente usado.
- Tipos de archivo objeto:
  - *ejecutable (executable file)*:
    - describe el programa para su ejecución
  - *objeto compartido (shared object file)*:
    - describe código y datos para *static* y *dynamic linking*
  - *relocalizable (relocatable file)*:
    - describe código y datos para *linking* con otros archivos, para crear un ejecutable o un objeto compartido.

(NO) Portabilidad de binarios

- Intrínseco de la compilación a código máquina (directamente ejecutable):
  - compiladores nativos y compiladores-cruzados
- Ejemplo de compilador nativo:
  - Pensar que un programa en C compila en cierta plataforma (hardware y sistema operativo).
  - ¿Qué problemas se tienen al cambiar de plataforma?
- Ejemplo de compiladores-cruzados:
  - Pensar que se compila para un microcontrolador dado...
  - ¿Qué problemas se tienen al cambiar de microcontrolador?

Locator

- Funcionalidad muy distinta a la del *loader*
  - Determina la imagen final en memoria del programa
    - No existe un proceso similar al correspondiente del *loader*
  - Es posible crear la imagen final porque:
    - Es el único programa en memoria, no existen conflictos por recursos.
    - Es posible determinar la dirección final de todo, incluyendo el kernel (si lo hubiera) y las funciones de biblioteca.
- Es posible indicar la ubicación en memoria
  - Datos, código.
  - RAM, ROM

Memorias (breve paréntesis)

- Volatilidad: incapacidad de retener data sin energía
  - Ejemplos:
    - Volátil: DRAM, SRAM.
    - No volátil: ROM, PROM, EPROM, EEPROM, Flash, y más recientemente MRAM, FeRAM o F-RAM.
- Read-write: capacidad de lectura/escritura
  - Ejemplos:
    - Read-only: ROM, PROM
    - Read-write: SRAM, DRAM
    - Depende: Flash, FeRAM
- Acceso
  - Ejemplos
    - Random-access memory (RAM): acceso aleatorio a posiciones arbitrarias (igual tiempo de acceso)
    - Secuencial

Actividad en grupo

- Inicialización de variables estáticas
  - Actividad:
    1) ¿cuándo se inicializan las variables estáticas?
    2) Reflexionar y describir (en palabras) la ejecución del código desde un reset
    (se puede tomar como ejemplo el código solución de la slide siguiente)
  - Grupos:
    - 3 a 5 estudiantes
  - Tiempo:
    - 5 minutos

Modularización (solución actividad en slides de C)

com.h

```
void set_default_channel(int ch);
void load_default_channel();
void set_channel(int ch);
int read_channel();
```

main.c

```
#include "com.h"
#define N 10
int buf[N];

int main (void){
    int i;
    int channel=1;
    set_default_channel(channel);
    set_channel(2);
    for(i=1;i<N;i++){
      buf[i] = read_channel();
    }
}
```

com.c

```
#include "com.h"

static int default_channel = 1;
static int current_channel;

void set_default_channel(int ch){
    default_channel = ch;
}
void load_default_channel(){
    current_channel = default_channel;
}
void set_channel(int ch){
    current_channel = ch;
}
int read_channel(){
    current_channel = default_channel;
    return current_channel
}
```

Inicialización de datos

- Requerimientos:
  - Variable (modificable en ejecución) $\rightarrow$ read-write
  - Valor inicial (persistente entre reset) $\rightarrow$ no volátil
- Problema:
  - Valor inicial debe ser copiado al arranque (*startup*)
  - No hay *loader* $\rightarrow$ la aplicación debe hacerlo
- Solución:
  - *Linker/Locator* $\rightarrow$ automáticamente incluye código de startup
  - Startup code: copia valores iniciales (“shadow”) de mem no volátil (ej. Flash) a read-write (ej. SRAM)

Inicialización

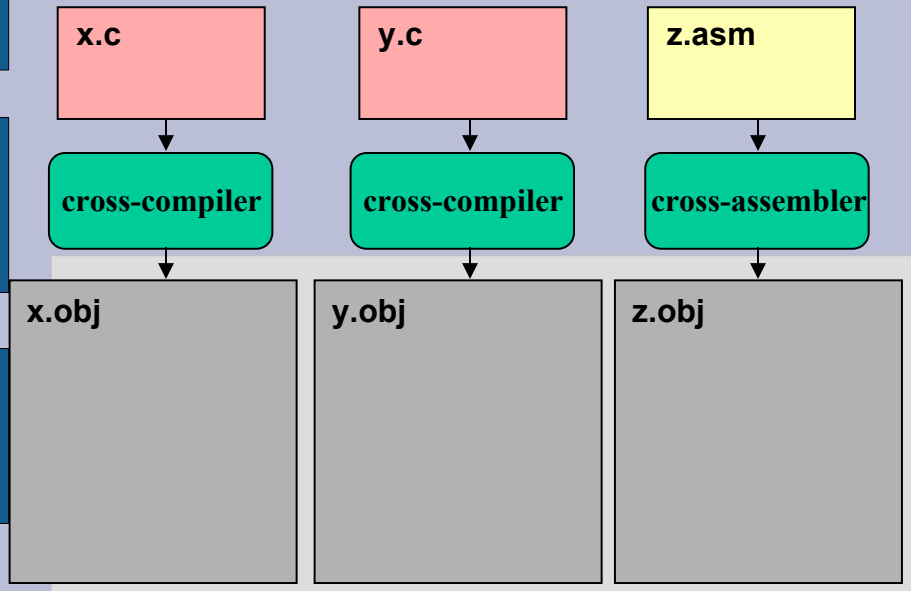
- Lenguaje C especifica sobre variables estáticas no inicializadas:

```
int i; //se debe inicializar en cero
```

- Requerimientos
  - variable (modificable) → read-write
  - valor inicial → cero
- Solución:
  - Se realiza un “memset” a cero (startup code)
- Startup code:
  - Inicialización de hardware
  - Inicialización de variables estáticas (en cero o valor inicial)
  - Llamado del main

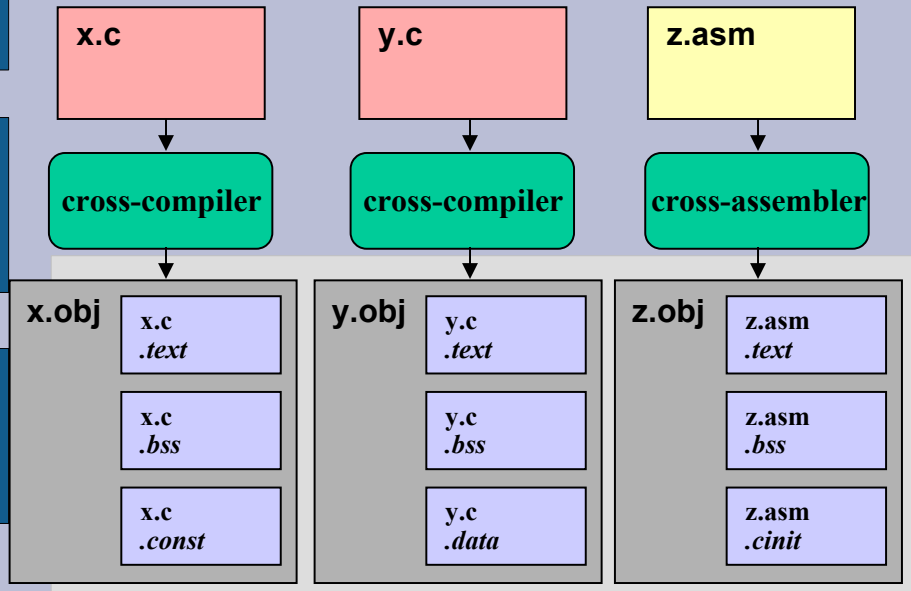
Ubicación de datos en memoria

- Tener en cuenta:
  - Datos persistentes necesitan estar en NVM (non-volatile memory).
  - Datos modificables necesitan estar en RAM.
- ¿Como sabe el linker/locator dónde poner cada cosa?
  - El programa se organiza en *segmentos* que son tratados independientemente.
- Segmentos
  - Compilador: crea entidades lógicas conteniendo código o datos
  - Linker: agrupa segmentos de diferentes códigos objeto.
  - Locator: mapea los segmentos en una ubicación física de memoria



Ejemplo

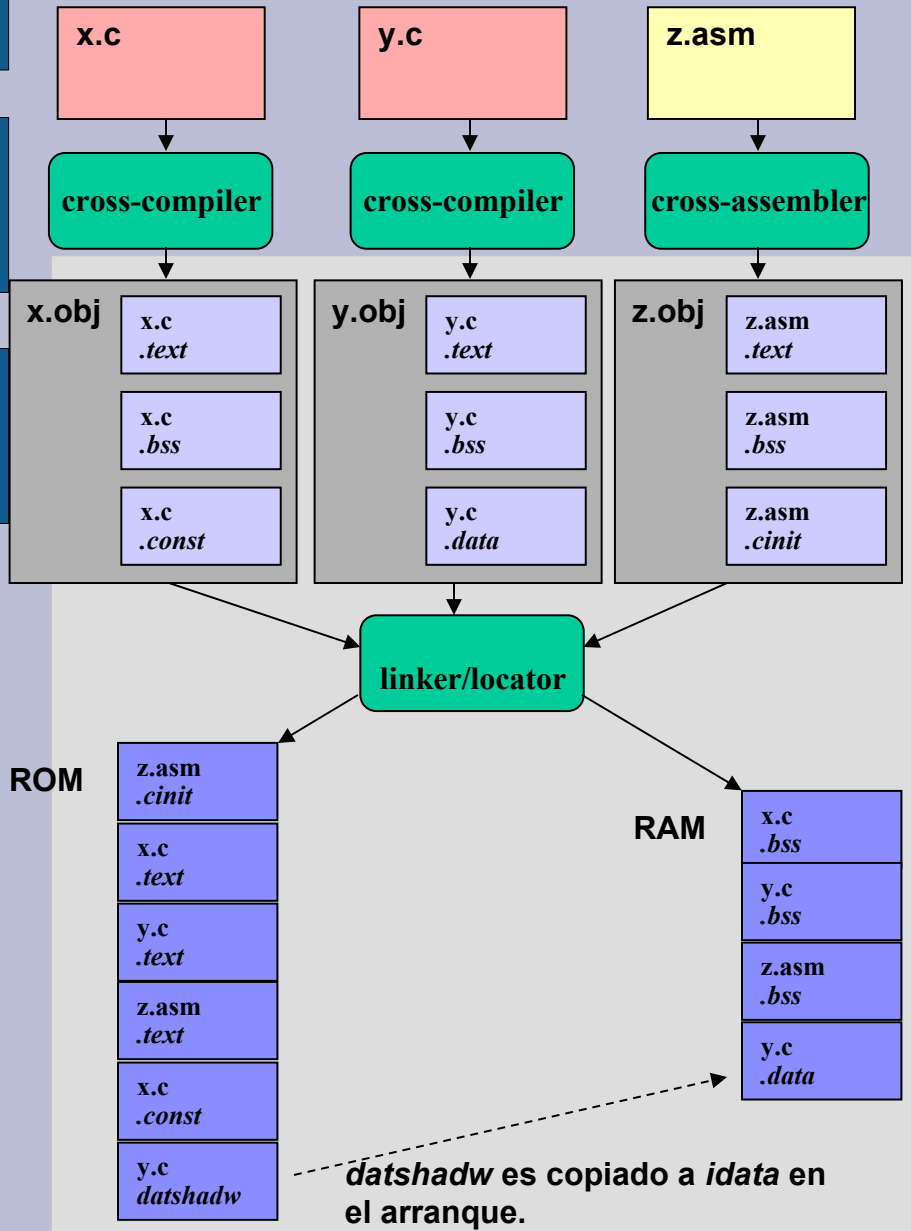
- Módulos:
  - x.c
    - Instrucciones
    - Datos sin inicializar
    - Constantes strings.
  - y.c
    - Instrucciones
    - Datos inicializados y sin inicializar
  - z.asm
    - Funciones en asm
    - Datos sin inicializar
    - Código de arranque (start-up code)



Ejemplo

- Cross-compiler
  - divide archivo fuente en segmentos
  - directivas al cross-comp
    - #pragma
- Segmentos:
  - **.text**: código ejecutable
  - **.bss:** datos sin inicializar
  - **.data**: datos inicializados
  - **.const**: constantes (incluye strings)
  - **.cinit**: código de arranque (start-up)
  - **.stack**: stack
  - Hay otros segmentos...

Ejemplo



- Segmentos
  - **.text**: código ejecutable
  - **.bss:** datos sin inicializar
  - **.data**: datos inicializados
  - **.const**: constantes (incluye strings)
  - **.cinit**: código de arranque (start-up)
- Linker/locator
  - "compagina" segmentos
  - cinit copia **datshadw** a *.data* en el arranque, así tengo en RAM las variables siempre inicializadas en el mismo valor

Locator maps

- Mapa:
  - Salida adicional del *locator*
  - Usualmente en archivo *.map
- Resumen:
  - Ubicación del código, variables, etc. en los diferentes segmentos.
- Vemos juntos el locator.map generado por el CCS para un MSP430

Ejemplo de otro compilador IAR C/C++

- Tipos de segmentos
  - CODE: código ejecutable
  - CONST: datos ubicados en ROM
  - DATA: datos ubicados en RAM
- Nomenclatura: nombrebase_sufijo
  - Nombre base
    - Por ejemplo: DATA16 (MSP430), NEAR (AVR)
  - Sufijo (categoría):
    - Datos no inicializados: N
    - Datos inicializados a cero: Z
    - Datos inicializados non-cero: I
    - Inicializadores para el anterior: ID
    - Constantes: C

Locator maps

- Mapa:
  - salida adicional del *locator*
  - usualmente *.map
- Resumen:
  - ubicación del código, variables, etc. en los diferentes segmentos.

```
                ****************************************
                *                                      *
                *            CROSS REFERENCE           *
                *                                      *
                ****************************************

       Program entry at :  020A  Relocatable, from module : ?cstart


                ****************************************
                *                                      *
                *               MODULE MAP             *
                *                                      *
                ****************************************

  DEFINED ABSOLUTE ENTRIES
    ********************************************************************

  DEFINED ABSOLUTE ENTRIES
  PROGRAM MODULE, NAME : ?ABS_ENTRY_MOD

Absolute parts
           ENTRY                    ADDRESS         REF BY
           =====                    =======         ======
           _HEAP_SIZE               0050
           _STACK_SIZE              0050
    ********************************************************************

  FILE NAME : C:\temp\Debug\Obj\segment.r43
  PROGRAM MODULE, NAME : segment

  SEGMENTS IN THE MODULE
  ======================
DATA16_C
  Relative segment, address: 025C - 0265 (0xa bytes), align: 0
  Segment part 2.             Intra module refs:   str1
    ----------------------------------------------------------------
DATA16_C
  Relative segment, address: 025A - 025B (0x2 bytes), align: 1
  Segment part 3.             Intra module refs:   main
           ENTRY                    ADDRESS         REF BY
           =====                    =======         ======
           str1                     025A
    ----------------------------------------------------------------
DATA16_Z
  Relative segment, address: 0200 - 0209 (0xa bytes), align: 0
  Segment part 4.             Intra module refs:   main
           ENTRY                    ADDRESS         REF BY
           =====                    =======         ======
           str2                     0200
    ----------------------------------------------------------------
CODE
  Relative segment, address: 0222 - 023D (0x1c bytes), align: 1
  Segment part 5.
           ENTRY                    ADDRESS         REF BY
           =====                    =======         ======
           main                     0222            Segment part 12
               stack 1 = 00000000 ( 00000002 )

    ****************************************************************
```

Ejemplos

ejemplo.c

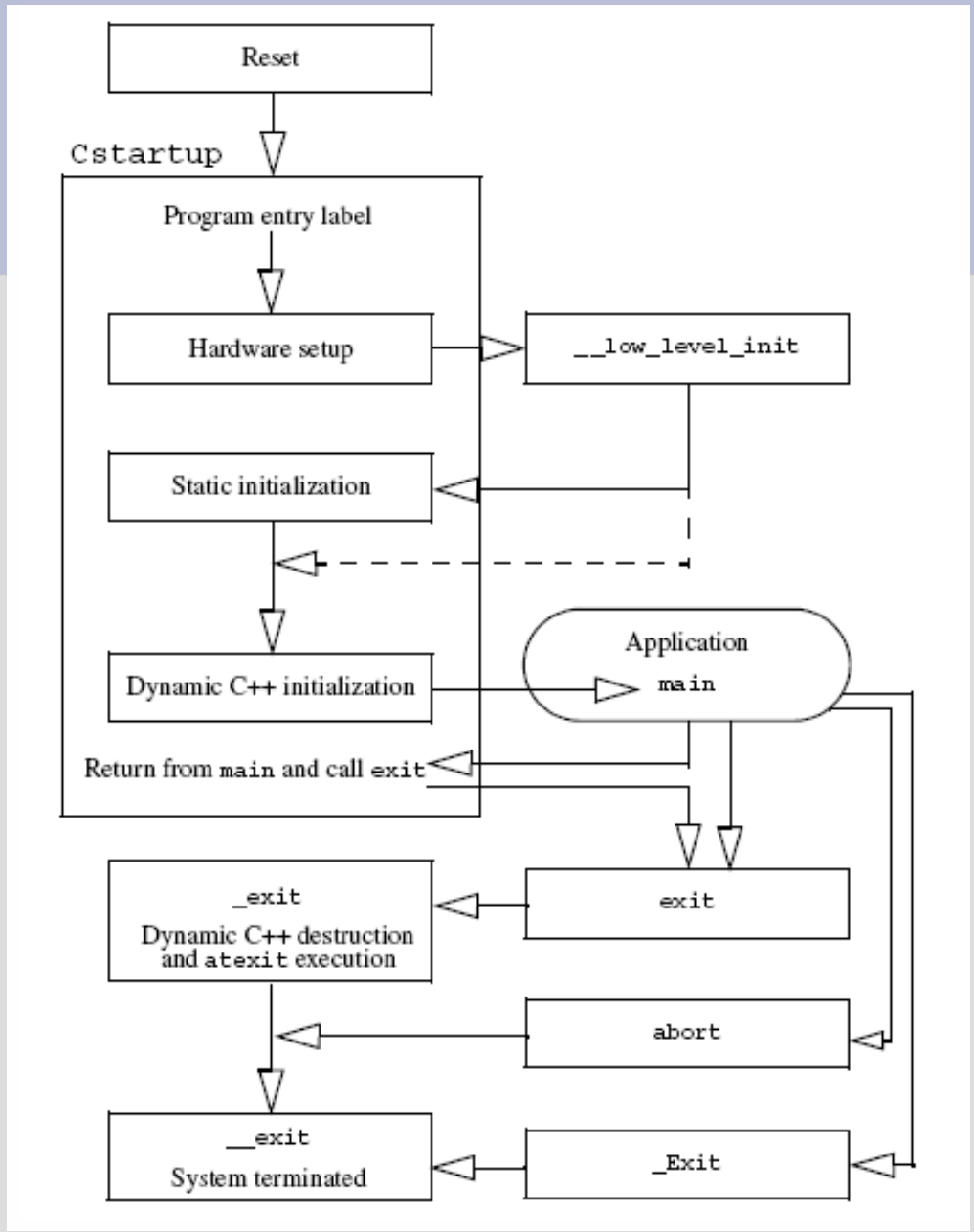
```
...
...
int i;


int j = 4;
...
...
```

Variables que son inicializadas a cero son ubicadas en el segmento **DATA16_Z**

Variables inicializadas a valores distintos de cero son ubicadas en el segmento **DATA16_I** y un segmento de inicialización en **DATA16_ID.**

Compilador IAR C/C++

- Segmento CSTART contiene código para:
  - arranque (cstartup)
  - terminación (cexit).



Otros temas de inicialización

- Constantes strings:

```
char *sMsg = “Hola chau”;
```

  - ¿Dónde se guarda esta constante?
  - ¿Qué pasa si modificamos este string?
    - Nota: es válido en C
- Compiladores pueden decir en función de:
  - si es declarado constante:

```
char* const
```

  - si es modificado o no en el código

Ejemplo

ej-string.c

```
char* const str1 = "Hola chau";
char str2[10];

int main( void )
{
  char* c1;
  char* c2;
  c1=str1;
  c2=str2;
  for(;*c1!=0;c1++,c2++)
    *c2 = *c1;
}
```

```
 SEGMENTS IN THE MODULE
  ======================
DATA16_C
  Relative segment, address: 025C - 0265 (0xa bytes), align: 0
  Segment part 2.              Intra module refs:   str1

------------------------------------------------------------
DATA16_C
  Relative segment, address: 025A - 025B (0x2 bytes), align: 1
  Segment part 3.              Intra module refs:    main
           ENTRY                     ADDRESS          REF BY
           str1                      025A
------------------------------------------------------------
DATA16_Z
  Relative segment, address: 0200 - 0209 (0xa bytes), align: 0
  Segment part 4.              Intra module refs:    main
           ENTRY                     ADDRESS          REF BY
           str2                      0200
------------------------------------------------------------
CODE
  Relative segment, address: 0222 - 023D (0x1c bytes), align: 1
  Segment part 5.
           ENTRY                   ADDRESS          REF BY
           main                    0222      Seg. part 12 (?cstart)
               stack 1 = 00000000 ( 00000002 )
```

Ejemplo

ej-string.c

```
char* str1 = "Hola chau";
char str2[10];

int main( void )
{
  char* c1;
  char* c2;
  c1=str1;
  c2=str2;
  for(;*c1!=0;c1++,c2++)
    *c2 = *c1;
}
```

```
 SEGMENTS IN THE MODULE
  ======================
DATA16_I
  Relative segment, address: 0200 - 0201 (0x2 bytes), align: 1
  Segment part 3.              Intra module refs:    main
           ENTRY                     ADDRESS          REF BY
           str1                      0200
-------------------------------------------------------------
DATA16_Z
  Relative segment, address: 0202 - 020B (0xa bytes), align: 0
  Segment part 5.              Intra module refs:    main
           ENTRY                     ADDRESS          REF BY
           str2                      0202
-------------------------------------------------------------
CODE
  Relative segment, address: 0236 - 0251 (0x1c bytes), align: 1
  Segment part 6.
           ENTRY               ADDRESS          REF BY
           main                0236       Seg. part 12 (?cstart)
               stack 1 = 00000000 ( 00000002 )
-------------------------------------------------------------
DATA16_ID
  Relative segment, address: 02A0 - 02A1 (0x2 bytes), align: 1
  Segment part 4.              Intra module refs:    str1
-------------------------------------------------------------
DATA16_C
  Relative segment, address: 0296 - 029F (0xa bytes), align: 0
  Segment part 2.              Intra module refs:    Seg. part 4
```

Cargado del programa

- Alternativas (en orden cronológico de aparición):
  - Grabarlo en ROM o PROM, y después insertar el chip en la placa.
  - Grabarlo en la memoria FLASH destino.

Memoria FLASH

- Memoria FLASH:
  - no volátil y programable en campo
  - host puede conectarse al target y programarla

- Maneras:
  - BSL (*bootstrap program*)
    - programa que “sabe” guardar en FLASH el código que recibe por medio de un puerto de comunicación
  - JTAG (Joint Test Action Group)
    - puerto para debugging que permite el grabado en Flash

In-circuit emulator

- Origen del término: *emulator*
  - funcionalidad similar a un debugger de escritorio
    - Set breakpoints
    - Single-step
    - descarga de registros y memoria, etc
    - escritura en memoria
- Atención: ¡ya no es emulado!

- Ejemplo:
  - Flash Emulation Tool (FET): prototipado y desarrollo
  - Interfaz JTAG

Actualizaciones en campo

- Corregir código en campo es caro.
  - debe llevar el producto para actualizar el programa (memoria), eventualmente el cliente podría hacerlo.
- Algunos productos permiten actualización automática (OTA).
  - Receptores de TV Satélite o cable.
  - Teléfonos celulares
  - Motes (RSI)
- No es fácil:
  - Si la imagen obtenida está corrupta (problemas de comunicación), después no anda.

Bibliografía

- “An Embedded Software Primer” David Simon
  - Chapter 9: Embedded Software Development Tools
- “Real-time Embedded Systems” Xiaocong Fan
  - Chapter 2: Cross-Platform Development
- MSP430 Assembly Language Tools v20.12.0.STS, User’s Guide