Laboratório 03

1 - Objetivos

Neste laboratório iremos continuar a implementação do programa para piscar o LED integrado ao kit de desenvolvimento **STM32F411 Blackpill**. Na aula anterior criamos os arquivos **main.c**, que a *priori* não faz nada, o arquivo **startup.c**, onde implementamos parcialmente os vetores de interrupção, a rotina de tratamento do *reset* com a inicialização de variáveis e o arquivo **Makefile** onde escrevemos as regras para automatizar o processo de compilação.

No laboratório de hoje iremos abordar os seguintes temas:

- escrever o programa para piscar o LED;
- analizar arquivos objeto realocáveis;
- escrever o arquivo ***linker script***;
- gerar e analizar o ***map file***.

2 - Pré-requisitos

- Windows Subsystem for Linux 2;
- GCC - GNU C Compiler;
- GCC ARM Toolchain;
- OpenOCD - Open On Chip Debugger;
- Sistema de controle de versões Git, e;
- Microsoft Visual Studio Code.

3 - Referências

[1] STM32F411 Blackpill Schematic

[2] STM32F411xC Datasheet

[3] RM0308 Reference Manual

[4] Using the GNU Compiler Collection (GCC)

[5] Using ld, the GNU linker

4 - Desenvolver programa para piscar LED

Vamos iniciar as atividades deste laboratório copiando os arquivos desenvolvidos no laboratório anterior para uma nova pasta.

```
foo@bar$ cd
foo@bar$ cd semb1-workspace
foo@bar:$ cp -r lab-02 lab-03
foo@bar:$ cd lab-03
```

Para desenvolver o programa para piscar o LED da **STM32F411 Blackpill** devemos determinar em qual pino do microcontrolador o LED está conectado e que tipo de sinal devemos uutilizar para ligar/desligar o LED. De acordo com o **STM32F411 Blackpill** Schematic [1] o LED está conectado ao pino **PC13** do microcontrolador, ou seja, pino 13 da porta C, e para ligar este LED devemos configurar este pino em nível lógico baixo.

Por questões de economia de energia a maioria dos periféricos do microcontrolador vem por padrão desligados após o **reset**. Como vamos utilizar a porta C, é necessário habilitar o *clock* desta porta. Isto é feito através do periférico **Reset and Clock Control (RCC)**.

A árvore de clock de cada computador é específica mas, de uma maneira geral para microcontroladores da ST, o fluxo é o seguinte:

- é configurada uma origem da referência do clock: interna de alta velocidade (**HSI** - *High Speed Internal*) via um oscilador dentro do microcontrolador, interna de baixa velocidade (**LSE** - *Low Speed Internal*) também

via um oscilador dentro do microcontrolador ou externa (**HSE** - *High Speed External*), geralmente via um cristal externo ou clock **CMOS**;
- essa referência pode ou não passar por uma **PLL** (*Phase-Locked Loop*) e gerar o clock básico do sistema, conhecido como SYSCLK;
- o SYSCLK pode ser dividido para gerar o clock básico dos barramentos do Cortex M, conhecido como **AHB** (*Advanced High Performance Bus*, para dispositivos rápidos) e **APB** (*Advanced Peripheral Bus*, para dispositivos mais lentos).

Cabe ao fabricante decidir quais periféricos serão ligados ao APB e ao AHB, assim como a quantidade desses barramentos no sistema. Normalmente, dispositivos rápidos como memórias, USB, Ethernet estão ligados ao AHB e periféricos mais lentos como SPI, I2C, Timers, estão ligados ao APB. Na partida, é comum também que a fonte de clock usada seja o **HSI**. Isso pode ser alterado depois.

O **RCC** é o periférico utilizado para a configuração de clock dos barramentos internos e de outros periféricos internos do microcontrolador, bem como os sinais de **reset**. Os bits de controle dos periféricos são agrupados de acordo com o barramento ao qual o periférico está conectado.

O periférico **GPIOC** está conectado ao barramento **AHB1** e os registradores utilizados para controlar os periféricos conectados a este barramento são:

- **RCC_AHB1RSTR - RCC AHB1 peripheral reset register**; e,
- **RCC_AHB1ENR - RCC AHB1 peripheral clock enable register**.

De acordo com a **seção 6.3.9** do **RM0308 Reference Manual** para ligar o *clock* do **GPIOC** devemos ajustar o bit 2, **GPIOCEN**, do registrador **RCC_AHB1ENR** para 1.

Na arquitetura **Cortex-M** os periféricos são mapeados em memória, geralmente representados por um conjunto de registros que possuem um endereço base. Assim, para ajustar o valor do bit **GPIOCEN** devemos determinar o endereço do registrador **RCC_AHB1ENR** e ajustar o valor deste registrador de acordo com desejado. O registrador **RCC_AHB1ENR** possui um offset de **0x30** em relação ao endereço base do módulo **RCC** que, segundo o mapa de memória do STM32F411, é **0x4002 3800**.

Com base nas informações acima podemos escrever o código para definir os endereços dos registradores e ajustar o valores de acordo com o necessário para habilitar a porta **GPIOC**.

```
#include <stdlib.h>

/* AHB1 Base Addresses ******************************************************/

#define STM32_RCC_BASE       0x40023800     /* 0x40023800-0x40023bff: Reset
                                               and Clock control RCC */

/* Register Offsets *********************************************************/

#define STM32_RCC_AHB1ENR_OFFSET    0x0030  /* AHB1 Peripheral Clock enable
                                               register */

/* Register Addresses *******************************************************/

#define STM32_RCC_AHB1ENR           (STM32_RCC_BASE+STM32_RCC_AHB1ENR_OFFSET)

/* AHB1 Peripheral Clock enable register */

#define RCC_AHB1ENR_GPIOCEN         (1 << 2)  /* Bit 2:  IO port C clock
                                                 enable */

int main(int argc, char *argv[])
{
  uint32_t reg;
```

```
  /* Ponteiros para registradores */

  uint32_t *pRCC_AHB1ENR  = (uint32_t *)STM32_RCC_AHB1ENR;

  /* Habilita clock GPIOC */

  reg  = *pRCC_AHB1ENR;
  reg |= RCC_AHB1ENR_GPIOCEN;
  *pRCC_AHB1ENR = reg;

  while(1);

  /* Nao deveria chegar aqui */

  return EXIT_SUCCESS;
}
```

Cada porta do microcontrolador, representadas por letras (**PA**, **PB**, **PC**, etc), agrupa até 16 pinos, indexados após o nome da porta (**PA0** a **PA15** para a porta **A**, por exemplo). A quantidade de portas e de pinos por porta dependerá do chip em uso. As portas também são vistas como um periférico mapeado em memória, possuindo um endereço base e um conjunto de registros de configuração. São esses registros que irão permitir a configuração dos pinos, extremamente flexíveis, podendo suportar características como:

- uso de resistores de pull up ou pull down;
- topologias de portas push pull ou open drain;
- configurações de interrupções;
- funções analógicas (ADC e DAC);
- outros periféricos digitais.

Para acionarmos o LED, devemos configurar o pino **PC13** para operar como um pino de saída. Podemos configurar este pino como saída de duas formas distintas

- saída em dreno aberto com capacidade de *pull-up* ou *pull-down*;
- saída em *push-pull* com capacidade de *pull-up* ou *pull-down*.

De acordo com o **STM32F411 Blackpill Schematic** [1] para acionar o LED corretamente devemos configurar o pino **PC13** como saída em ***push-pull*** com os resistores de *pull-up* e *pull-down* desligados. Isto pode ser feito por meio dos registradores do periférico **GPIOC**.

Segundo as **seções 8.4.1, 8.4.2 e 8.4.4** do **RM0308 Reference Manual** devemos realizar as seguintes configurações:

- **GPIOC_MODER**: ajustar os bits **MODER13[1:0]** para o valor 1 para configurar **PC13** como pino de saída;
- **GPIOC_OTYPER**: ajustar o bit **OT13** em 0 para fazer a saída tipo *push-pull*;
- **GPIOC_PUPDR** ajustar os bits **PUPDR13[1:0]** em 0 para desconectar os resistores de *pull-up* e *pull-down*.

O código abaixo mostra como fazer estas configurações.

```
#include <stdlib.h>

/* AHB1 Base Addresses ******************************************************/

#define STM32_RCC_BASE       0x40023800     /* 0x40023800-0x40023bff: Reset
                                               and Clock control RCC */

/* AHB2 Base Addresses ******************************************************/

#define STM32_GPIOC_BASE     0x48000800U    /* 0x48000800-0x48000bff: GPIO
```

```
                                        Port C */

/* Register Offsets *********************************************************/

#define STM32_RCC_AHB1ENR_OFFSET  0x0030   /* AHB1 Peripheral Clock enable
                                            register */

#define STM32_GPIO_MODER_OFFSET   0x0000  /* GPIO port mode register */
#define STM32_GPIO_OTYPER_OFFSET  0x0004  /* GPIO port output type register */
#define STM32_GPIO_PUPDR_OFFSET   0x000c  /* GPIO port pull-up/pull-down
                                           register */

/* Register Addresses *******************************************************/

#define STM32_RCC_AHB1ENR        (STM32_RCC_BASE+STM32_RCC_AHB1ENR_OFFSET)

#define STM32_GPIOC_MODER        (STM32_GPIOC_BASE+STM32_GPIO_MODER_OFFSET)
#define STM32_GPIOC_OTYPER       (STM32_GPIOC_BASE+STM32_GPIO_OTYPER_OFFSET)
#define STM32_GPIOC_PUPDR        (STM32_GPIOC_BASE+STM32_GPIO_PUPDR_OFFSET)

/* AHB1 Peripheral Clock enable register */

#define RCC_AHB1ENR_GPIOCEN      (1 << 2)  /* Bit 2:  IO port C clock
                                           enable */

/* GPIO port mode register */

#define GPIO_MODER_INPUT          (0) /* Input */
#define GPIO_MODER_OUTPUT         (1) /* General purpose output mode */
#define GPIO_MODER_ALT            (2) /* Alternate mode */
#define GPIO_MODER_ANALOG         (3) /* Analog mode */

#define GPIO_MODER13_SHIFT        (26)
#define GPIO_MODER13_MASK         (3 << GPIO_MODER13_SHIFT)

/* GPIO port output type register */

#define GPIO_OTYPER_PP            (0) /* 0=Output push-pull */
#define GPIO_OTYPER_OD            (1) /* 1=Output open-drain */

#define GPIO_OT13_SHIFT           (13)
#define GPIO_OT13_MASK            (1 << GPIO_OT13_SHIFT)

/* GPIO port pull-up/pull-down register */

#define GPIO_PUPDR_NONE           (0) /* No pull-up, pull-down */
#define GPIO_PUPDR_PULLUP         (1) /* Pull-up */
#define GPIO_PUPDR_PULLDOWN       (2) /* Pull-down */

#define GPIO_PUPDR13_SHIFT        (26)
#define GPIO_PUPDR13_MASK         (3 << GPIO_PUPDR13_SHIFT)

int main(int argc, char *argv[])
{
  uint32_t reg;
```

```
  /* Ponteiros para registradores */

  uint32_t *pRCC_AHB1ENR  = (uint32_t *)STM32_RCC_AHB1ENR;
  uint32_t *pGPIOC_MODER  = (uint32_t *)STM32_GPIOC_MODER;
  uint32_t *pGPIOC_OTYPER = (uint32_t *)STM32_GPIOC_OTYPER;
  uint32_t *pGPIOC_PUPDR  = (uint32_t *)STM32_GPIOC_PUPDR;
  uint32_t *pGPIOC_BSRR   = (uint32_t *)STM32_GPIOC_BSRR;

  /* Habilita clock GPIOC */

  reg  = *pRCC_AHB1ENR;
  reg |= RCC_AHB1ENR_GPIOCEN;
  *pRCC_AHB1ENR = reg;

  /* Configura PC13 como saida pull-up off e pull-down off */

  reg = *pGPIOC_MODER;
  reg &= ~(GPIO_MODER13_MASK);
  reg |= (GPIO_MODER_OUTPUT << GPIO_MODER13_SHIFT);
  *pGPIOC_MODER = reg;

  reg = *pGPIOC_OTYPER;
  reg &= ~(GPIO_OT13_MASK);
  reg |= (GPIO_OTYPER_PP << GPIO_OT13_SHIFT);
  *pGPIOC_OTYPER = reg;

  reg = *pGPIOC_PUPDR;
  reg &= ~(GPIO_PUPDR13_MASK);
  reg |= (GPIO_PUPDR_NONE << GPIO_PUPDR13_SHIFT);
  *pGPIOC_PUPDR = reg;

  while(1);

  /* Nao deveria chegar aqui */

  return EXIT_SUCCESS;
}
```

A partir de agora estamos aptos a alterar o estado do pino de saída. Para alterar o estado de um pino de saída no STM32F411 temos duas alternativas. A primeira é utilizar o registrador **GPIOx_ODR - GPIO port output data register**. O principal inconveniente de utilizar este registrador é que é necessário ler o estado dos outros pinos de saída, alterar apenas o valor do bit desejado e em seguida escrever no registrador. Alternativamente, podemos utilizar o registrador **GPIOx_BSRR - GPIO port bit set/reset register** que permite alterar o estado do pino de saída de forma **atômica**.

```
#include <stdlib.h>

/* AHB1 Base Addresses ***************************************************/

#define STM32_RCC_BASE       0x40023800     /* 0x40023800-0x40023bff: Reset
                                               and Clock control RCC */

/* AHB2 Base Addresses ***************************************************/

#define STM32_GPIOC_BASE     0x48000800U    /* 0x48000800-0x48000bff: GPIO
                                               Port C */
```

```
/* Register Offsets *********************************************************/

#define STM32_RCC_AHB1ENR_OFFSET  0x0030   /* AHB1 Peripheral Clock enable
                                              register */

#define STM32_GPIO_MODER_OFFSET   0x0000  /* GPIO port mode register */
#define STM32_GPIO_OTYPER_OFFSET  0x0004  /* GPIO port output type register */
#define STM32_GPIO_PUPDR_OFFSET   0x000c  /* GPIO port pull-up/pull-down
                                             register */
#define STM32_GPIO_BSRR_OFFSET    0x0018  /* GPIO port bit set/reset register */

/* Register Addresses *******************************************************/

#define STM32_RCC_AHB1ENR        (STM32_RCC_BASE+STM32_RCC_AHB1ENR_OFFSET)

#define STM32_GPIOC_MODER        (STM32_GPIOC_BASE+STM32_GPIO_MODER_OFFSET)
#define STM32_GPIOC_OTYPER       (STM32_GPIOC_BASE+STM32_GPIO_OTYPER_OFFSET)
#define STM32_GPIOC_PUPDR        (STM32_GPIOC_BASE+STM32_GPIO_PUPDR_OFFSET)
#define STM32_GPIOC_BSRR         (STM32_GPIOC_BASE + STM32_GPIO_BSRR_OFFSET)

.
.
.

/* GPIO port bit set/reset register */

#define GPIO_BSRR_SET(n)           (1 << (n))
#define GPIO_BSRR_RST(n)           (1 << (n + 16))

int main(int argc, char *argv[])
{
  uint32_t reg;

  /* Ponteiros para registradores */

  uint32_t *pRCC_AHB1ENR  = (uint32_t *)STM32_RCC_AHB1ENR;
  uint32_t *pGPIOC_MODER  = (uint32_t *)STM32_GPIOC_MODER;
  uint32_t *pGPIOC_OTYPER = (uint32_t *)STM32_GPIOC_OTYPER;
  uint32_t *pGPIOC_PUPDR  = (uint32_t *)STM32_GPIOC_PUPDR;
  uint32_t *pGPIOC_BSRR   = (uint32_t *)STM32_GPIOC_BSRR;

  /* Habilita clock GPIOC */

  .
  .
  .

  while(1)
    {
      *pGPIOC_BSRR = GPIO_BSRR_SET(13);
       for(uint32_t i = 0; i < LED_DELAY; i++);
      *pGPIOC_BSRR = GPIO_BSRR_RST(13);
       for(uint32_t i = 0; i < LED_DELAY; i++);
    }

  /* Nao deveria chegar aqui */
```

```
  return EXIT_SUCCESS;
}
```

5 - Analizar arquivos objeto realocáveis

Ao se compilar um arquivo utilizando o GCC são gerados arquivos objeto em um formato de arquivo padrão denominado **ELF (Executable and linkable format)**. Existem diversos outros formatos, por exemplo:

- **COFF (The Common Object File Format)** - Introduzido pelo UNIX System V
- **AIF (ARM Image Format)** - Introduzido pela ARM
- **Portable Executable (PE)** - Utilizado pelo Windows para arquivos como .exe ou .dll
- **SRECORD** - Introduzido pela Motorola

A partir do formato **ELF** podemos utilizar as ferramentas fornecidas pelo **toolchain** para criar outros formatos de arquivo binário como **.bin**, **.ihex (Intel hex)**, **.srec (S Record)**, entre outros.

O padrão de arquivo **ELF** especifica uma forma de organizar diversos elementos do programa: *data*; *read-only data* (constantes); *code*; *uninitialized data*; * etc em diferentes seções. As seções mais relevantes do formato **ELF** são:

- **.text**: armazena o código ou as instruções do programa;
- **.data**: armazena os dados do programa, mais especificamente esta seção armazena os dados pré-inicializados do programa;
- **.bss**: armazena os dados não inicializados inicializados do programa;
- **.rodata**: armazena os dados de leitura apenas, por exemplo, as contantes.

Para analizar o arquivo objeto **main.o** podemos utilizar a ferramenta **arm-none-eabi-objdump** fornecida pela **GNU Arm Embedded Toolchain**. Esta ferramenta extrai o conteúdo de arquivos objeto e tem a seguinte sintaxe:

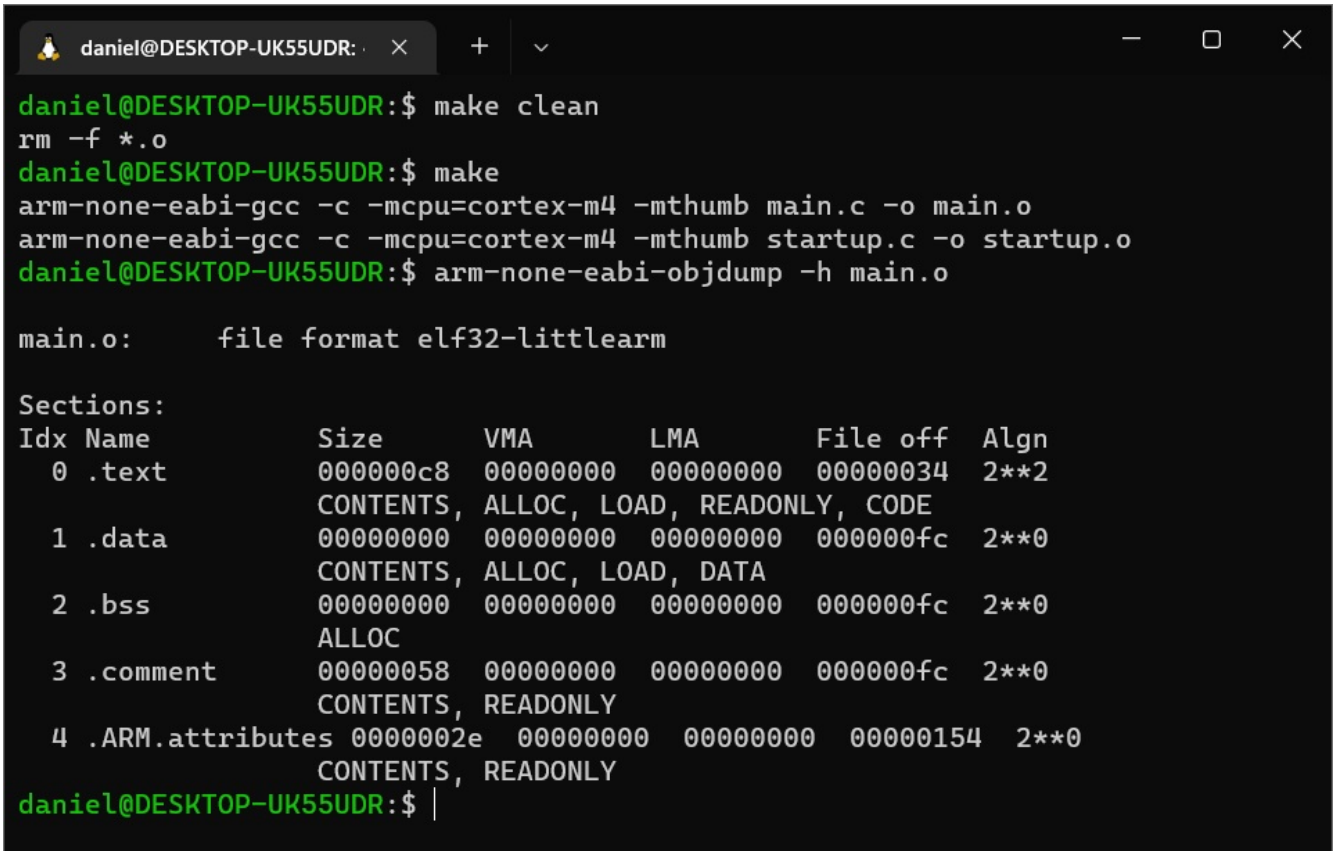
arm-none-eabi-objdump <option(s)> <file(s)>

para se obter uma lista das opções aceitas basta executar o programa sem nenhuma opção e não indicar nenhum arquivo.

```
foo@bar:~$ arm-none-eabi-objdump
```

Por exemplo, para extrair o conteúdo dos cabeçalhos das seções utilize a opção **-h**

```
foo@bar:~$ arm-none-eabi-objdump -h main.o
```

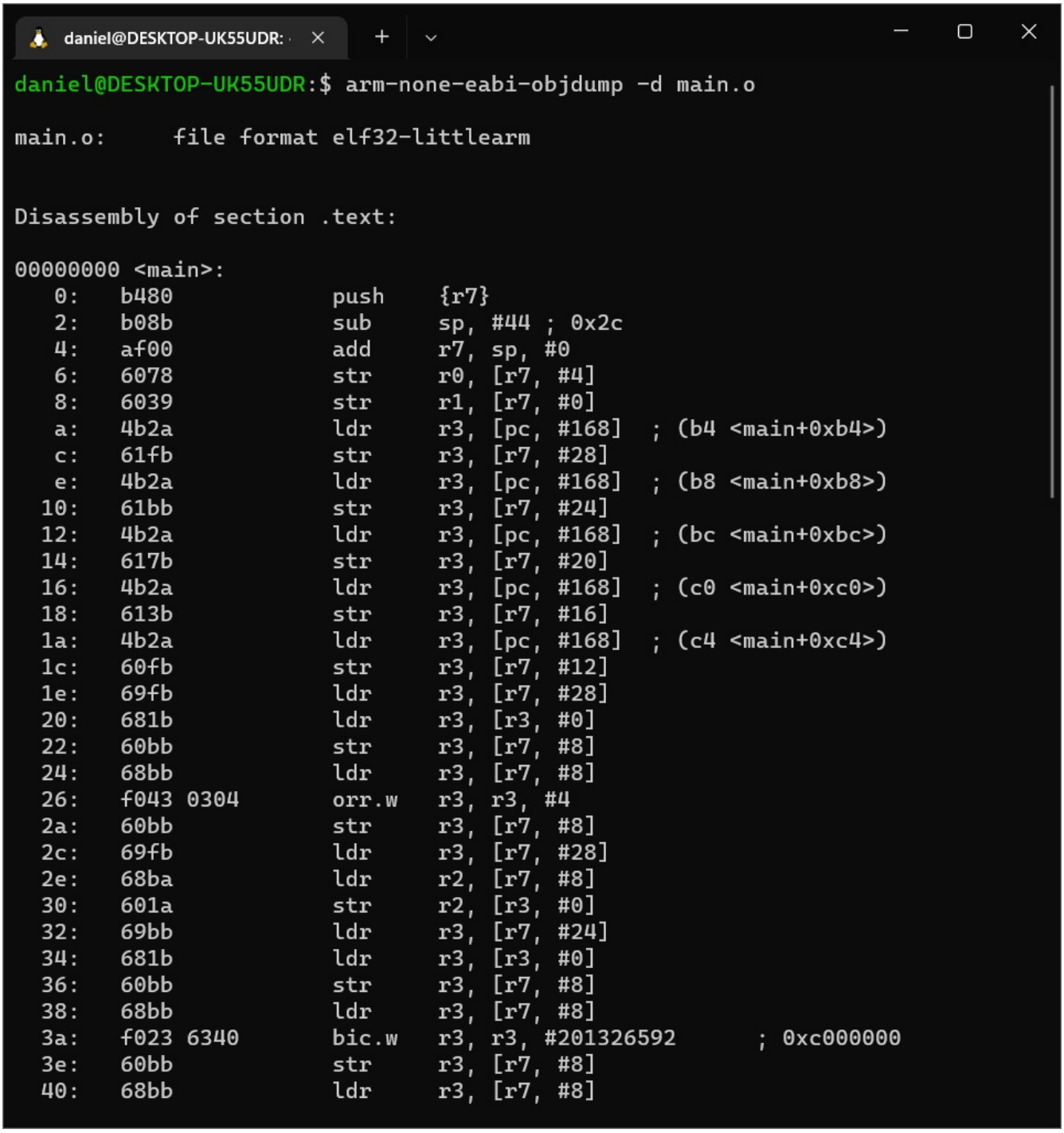


A primeira linha indica que o formato do arquivo é elf32, little-endian, ou seja, ao armazenar uma palavra na memória, os bytes menos significativos são armazenados nos endereçcos mais baixos da memória, e a arquitetura é arm. Em seguida temos as seções do arquivo objeto que, para este arquivo, são cinco: **.text**, **.data**, **.bss**, **.comment** e **.ARM.attributes**.

Toda seção "carregável" (**loadable**), ou alocável, (**allocatable**), possui dois endereços. O primeiro é o VMA (**Virtual Memory Address**). Este é o endereço que a seção irá ter quando o arquivo for "executado". O segundo é o LMA (**Load Memory Address**). Este é o endereço no qual a seção será carregada. Na maioria das vezes os dois endereços serão os mesmos. Um exemplo de quando serão diferentes é a seção **.data** que é salva na **FLASH** e, durante a inicialização, tem seus dados copiados para a memória **SRAM**. Esta técnica é frequentemente utilizada em sistemas embarcados baseados em **FLASH** para inicializar variáveis globais. Neste caso o endereço da **FLASH** será o LMA e o endereço na **SRAM** o LMA. Como o código ainda é relocável, os endereços não foram definidos e estão com valores zerados. No executável final será possível ver valores diferentes de zero.

Como dito anteriormente a seção **.text** armazena o código do programa e, neste caso, possui tamanho **0xc8**. Podemos analizar o conteúdo desta seção fazendo o ***disassembly*** do código

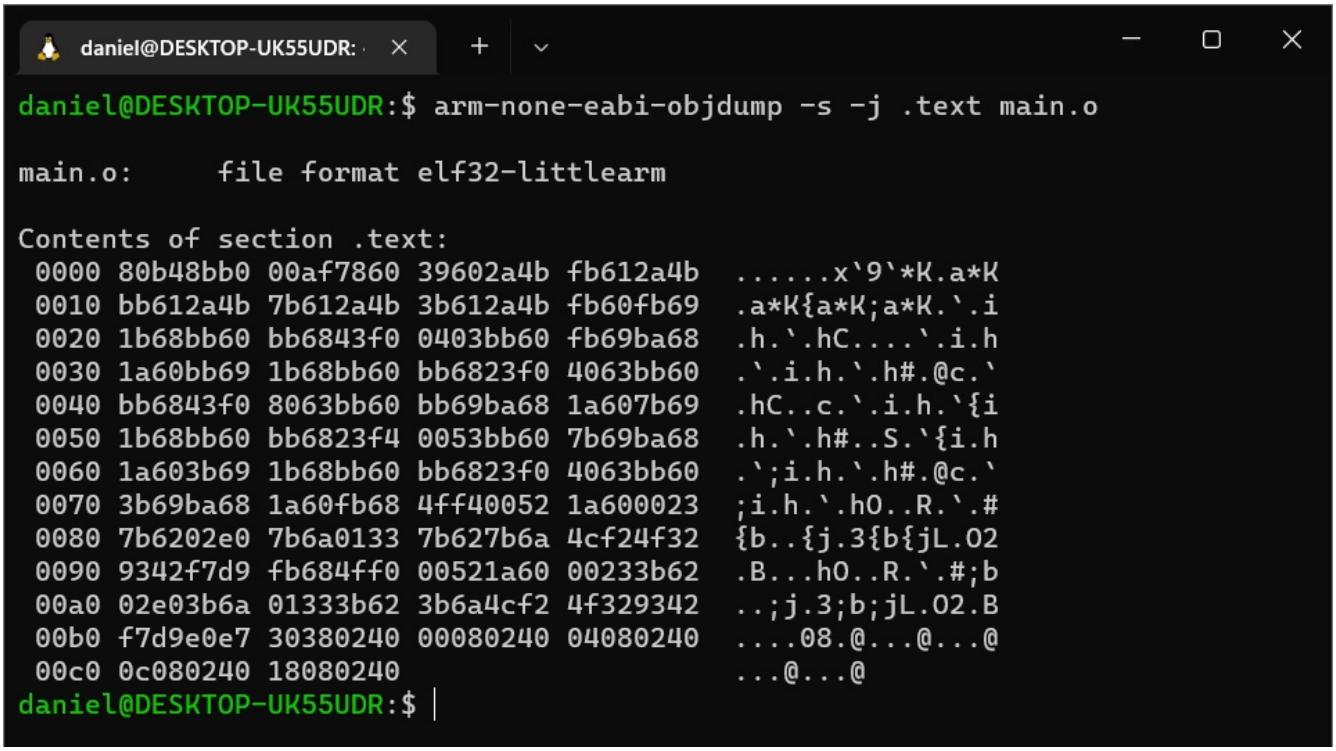
```
foo@bar:~$ arm-none-eabi-objdump -d main.o
```



Note que o endereço base da função **main()** é **0x0000 0000**. Este não é o endereço que o código da função irá ocupar, ao final, na memória do microcontrolador uma vez que sabemos que a faixa de endereços ocupada pelo código no STM32 se inicia em **0x0800 0000**. Novamente, a posição final que o código irá ocupar será determinada durante o processo de *linking* de acordo com as configurações fornecidas pelo *linker script*. Por esta razão chamamos o arquivo **main.o** de arquivo objeto realocável. Perceba também que existem instruções de 16 e de 32 bits, algo normal para o Cortex M e seu conjunto de instruções T32.

Outra forma de vizualizarmos o conteúdo de uma seção é realizar um ***hexdump*** do contéudo da seção. Por exemplo:

```
foo@bar:~$ arm-none-eabi-objdump -s -j .text main.o
```



As seções **.data** e **.bss** armazenam as variáveis inicializadas e não inicializadas, respecectivamente. Como podemos observar seu tamanho é 0, não temos variáveis globais no nosso programa. Para ententer melhor como estas seções funcionam alterar nosso programa para criar uma variável global que irá armazenar o estado do LED.

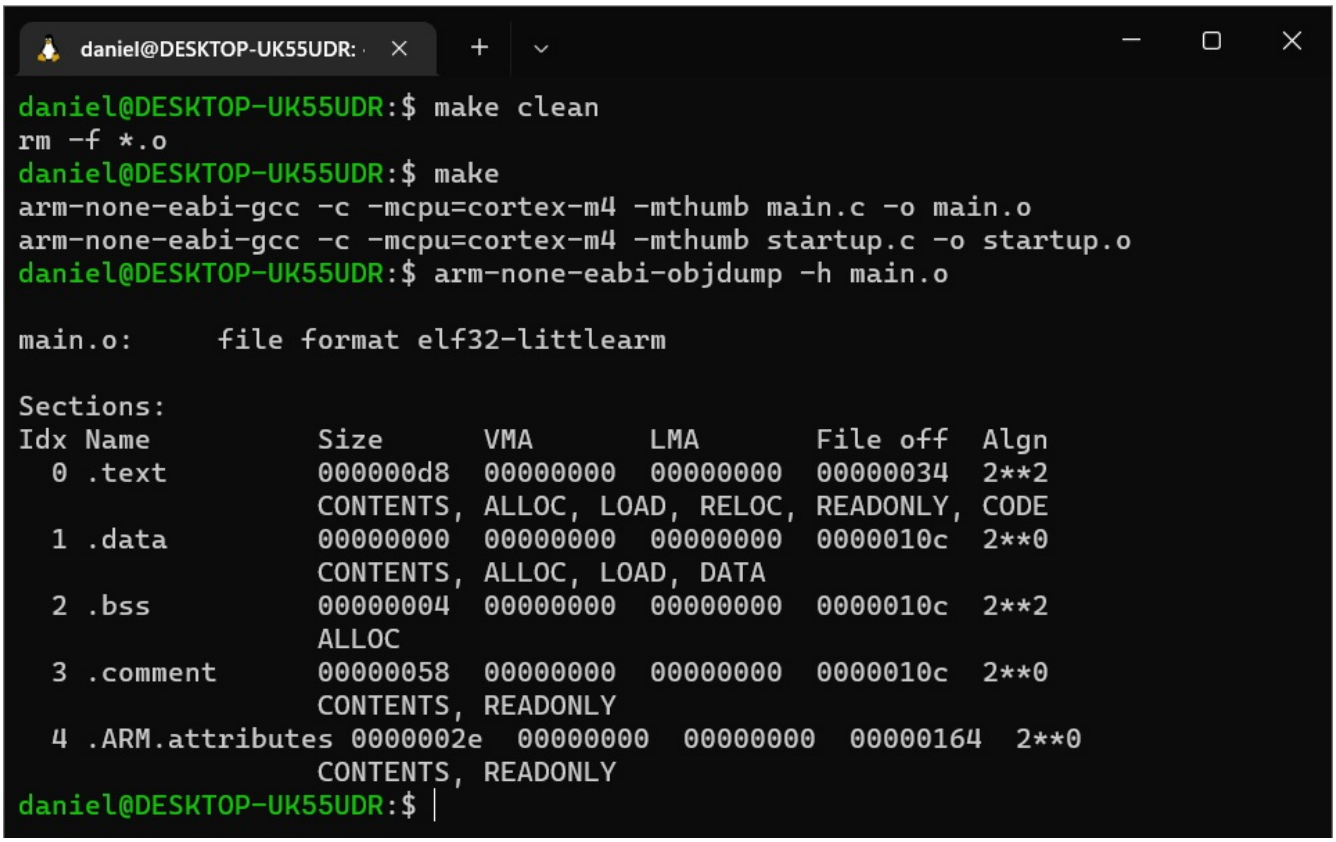
```
  .
  .
static uint32_t led_status;

int main(int argc, char *argv[])
{
  .
  .
  .
  while(1)
    {
      *pGPIOC_BSRR = GPIO_BSRR13_SET;
      led_status = 0;
      for (uint32_t i = 0; i < LED_DELAY; i++);
      *pGPIOC_BSRR = GPIO_BSRR13_RESET;
      led_status = 1;
      for (uint32_t i = 0; i < LED_DELAY; i++);
    }

  return EXIT_SUCCESS;
}
```

Ao recompilar e checar novamente o conteúdo das seções do arquivo objeto vemos que agora o tamanho da seção **.bss** é 4 bytes, equivalente ao tamanho da variável **led_status**.

```
foo@bar:~$ arm-none-eabi-objdump -h main.o
```



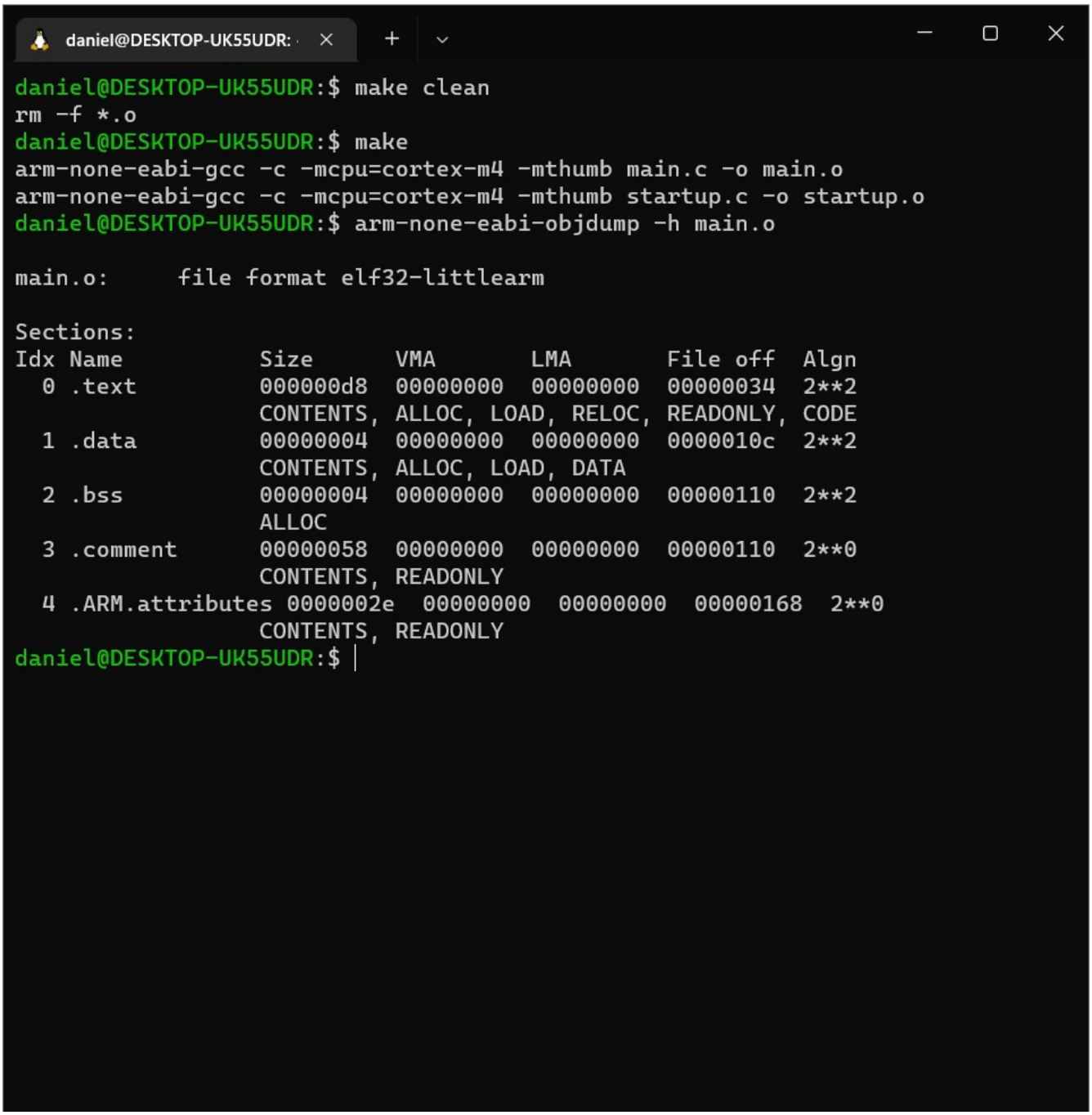
O conteúdo da seção **.bss** não é muito interessante pois ela apenas armazena *arrays* e variáveis não inicializadas que devem ser preenchidas com 0 pelo *"loader"* antes do início do programa. O mesmo não acontece com a seção **.data**, que vamos explorar a seguir.

Para isso, vamos criar um *array* para armazenar informações referentes à versão do programa.

```
  .
  .
static char     fw_version[] = {'V', '1', '.', '0'};
static uint32_t led_status;
  .
  .
```

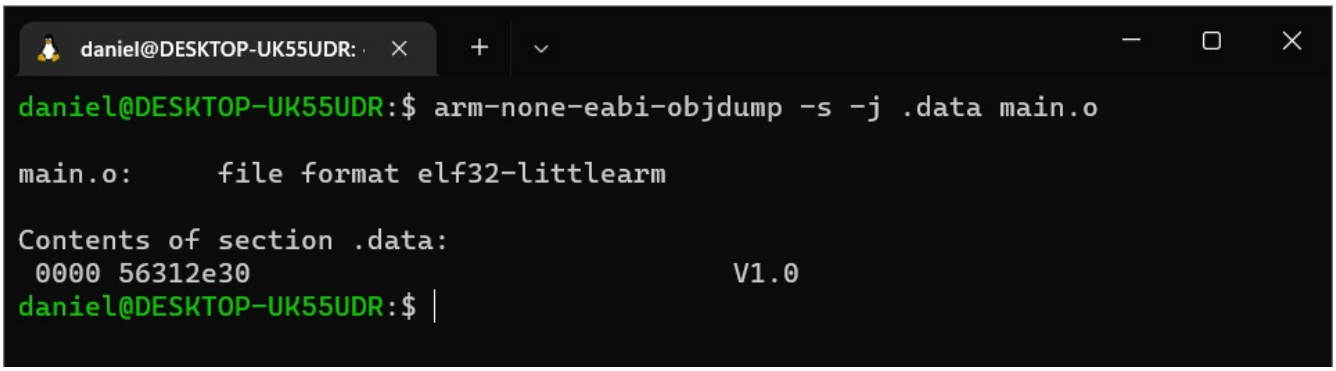
Agora, ao recompilar e checar o conteúdo das seções do arquivo objeto vemos que agora o tamanho da seção **.data** é de 4 bytes, equivalente aos 4 caracteres armazenados no *array* **fw_version**[].

```
foo@bar:~$ arm-none-eabi-objdump -h main.o
```



Se fizermos um ***hexdump*** da seção **.data** teremos

```
foo@bar:~$ arm-none-eabi-objdump -s -j .data main.o
```



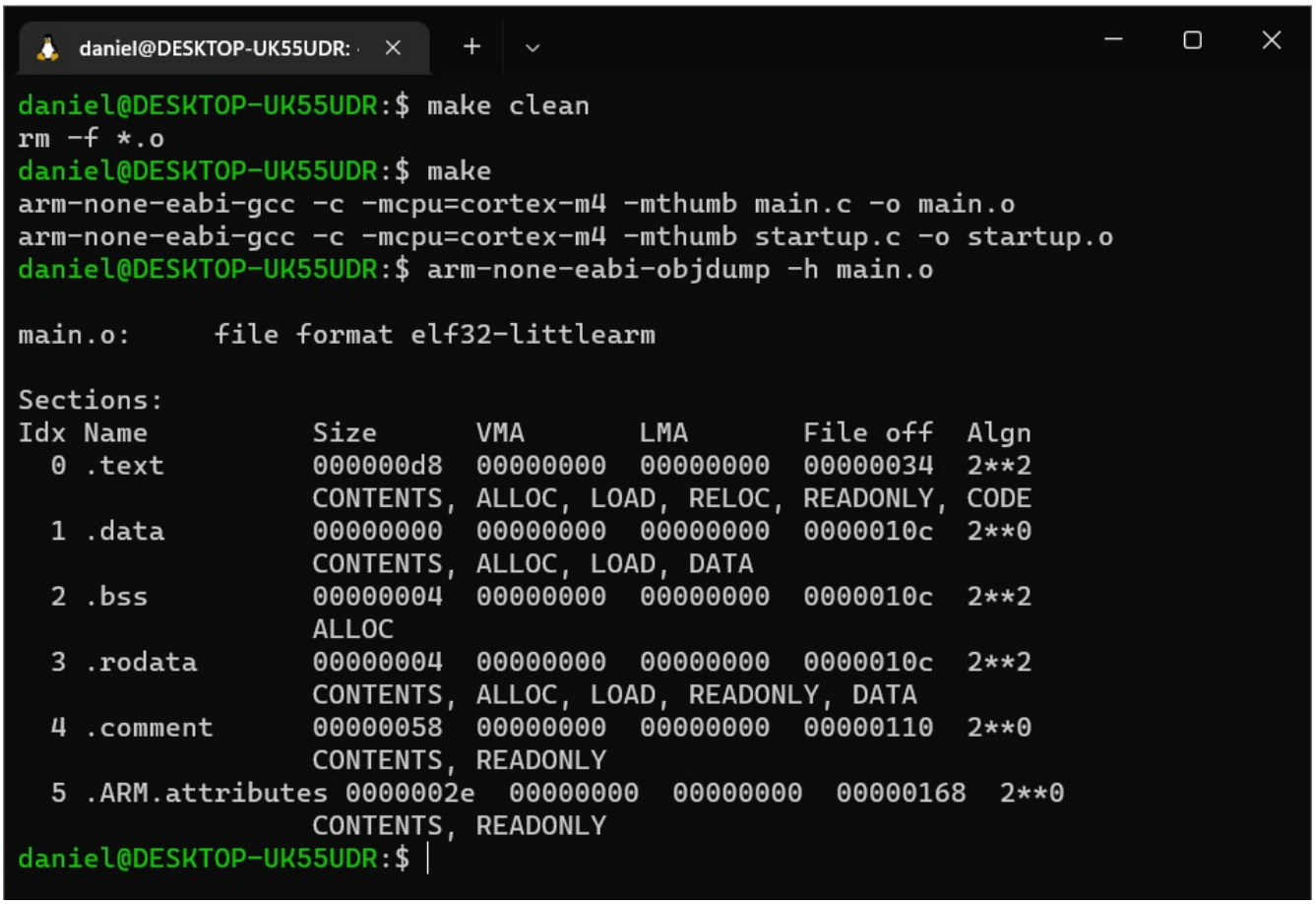
segundo a tabela ASCII os números 0x56, 0x31, 0x2e e 0x30 equivalem aos caracteres 'V', '1', '.' e '0' respectivamente.

As informações sobre a versão do software não deveriam ser alteradas durante a execução do programa. Assim, é mais seguro declarar esta variável como sendo constante.

```
  .
  .
static const char fw_version[] = {'V', '1', '.', '0'};
static uint32_t   led_status;
  .
  .
```

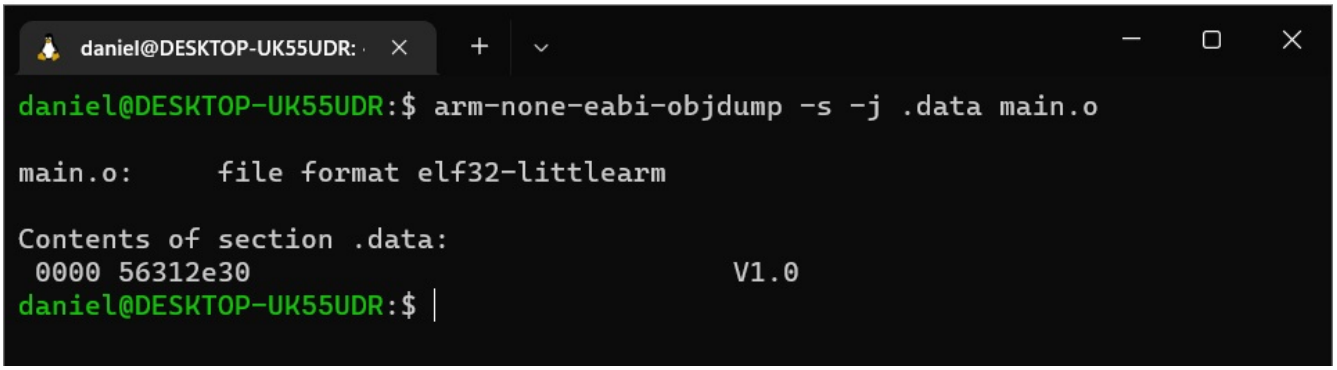
Ao recompilar e checar o conteúdo das seções do arquivo objeto vemos que agora o tamanho da seção **.data** é 0 e temos uma nova seção, **.rodata**, com tamanho equivalente aos 4 caracteres armazenados no *array* **fw_version**[]. Como dito anteriormente, esta seção armazena os dados de leitura apenas.

```
foo@bar:~$ arm-none-eabi-objdump -h main.o
```



Se fizermos um *hexdump* da seção **.rodata** teremos exatamente o mesmo conteúdo da seção **.data** anterior à modificação

```
foo@bar:~$ arm-none-eabi-objdump -s -j .rodata main.o
```



6 - Escrever o arquivo *linker script*

Ao final do processo de compilação temos um conjunto de arquivos objeto. Entretanto, estes arquivos ainda estão incompletos. Normalmente um programa em linguagem C traz referências a funções que se encontram nas bibliotecas padrão ou, em muitos casos, faz referências a variáveis, funções e bibliotecas privadas definidas pelos programadores do projeto.

Após compilarmos com sucesso nosso programa devemos combinar os arquivos objetos de modo a resolver estas

pendências e combinar os arquivos objeto em um único arquivo executável. Este processo é chamado de **linkedição** (ou *linking* em inglês) e é realizado ***linker***. O linker tem por objetivo juntar o código objeto (relocável) em um local e gerar um único arquivo executável (em posição fixa, no caso dos microcontroladores em *bare metal*). Caso ocorra algum erro no processo de linkedição, retorna-se ao código fonte para identificar e corrigir o erro e depois, compilar e linkar novamente o código. Se não ocorrer nenhum erro, então o processo prossegue até gerar o programa executável.

A linkedição é controlada por um arquivo denominado *linker script* escrito na linguagem *linker command language*. O principal objetivo do *linker script* é descrever como as seções dos arquivos objeto de entrada devem ser mapeados e controlar o *layout* da memória no arquivo de saída. Entretanto, quando necessário, o *linker* também pode realizar outras operações utilizando *linker commands*. Consulte a referência [1] para mais detalhes.

Como dito anteriormente, o *linker script* é um arquivo de texto que descreve como as diferentes seções dos arquivos objetos realocáveis deverão ser combinadas para gerar o arquivo objeto executável. Além disso, durante o processo de linkedição serão atribuídos os endereços absolutos das diferentes seções do arquivo objeto executável. Para isso o *linker script* inclui informações sobre os endereços de código e dados do dispositivo.

Os principais comandos utlizados em um *linker script* são:

- **ENTRY**;
- **MEMORY**;
- **SECTIONS**;
- **KEEP**;
- **ALIGN**; e;
- **AT>**.

O comando **ENTRY** é utilizado para informar o endereço do ponto de entrada, *Entry Point Address*, no cabeçalho do arquivo objeto executável. No nosso caso o ponto de entrada da nossa aplicação é a função **reset_handler()**, o primeiro código a ser executado pelo processador após o *reset*.

Este comando não é obrigatório mas o **debugger** utiliza esta informação para identificar a primeira função a ser executada. A sintaxe do comando **ENTRY** é

```
ENTRY(_symbol_name_)
```

Vamos começar nosso *linker script* pelo comando **ENTRY**. Crie um novo arquivo chamado **stm32f411-rom.ld** e em seguida digite

```
ENTRY(reset_handler)
```

O comando **MEMORY** descreve o *layout* de memória do dispositivo, isto é, o endereço e o tamanho das memórias ROM e RAM. O **linker** irá utilizar estas informações para atribuir endereços às seções de memória combinadas. Esta informação também é utilizada para que o **linker** indique uma mensagem de erro caso não seja possível alocar na memória disponível as seções de código, de dados, a pilha, etc.

Por meio do comando **MEMORY** você pode configurar precisamente as várias memórias disponíveis no seu dispositivo e fazer com que diferentes seções ocupem diferentes regiões na memória. Tipicamente um *linker script* possui apenas um comando **MEMORY**.

A sintaxe do comando **MEMORY** é:

```
MEMORY
{
  NAME(attr): ORIGIN = origin, LENGTH = len
}
```

NAME define um nome para a região de memória que está sendo criada de forma que esta região possa ser referenciada em outras parte do *linker script*. No corpo do comando podemos definir quantas regiões forem necessárias. **ORIGIN** é o endereço inicial da região de memória e **LENGTH** é o tamanho desta região.

Para cada região de memória deve ser informada uma lista de atributos. Os atributos válidos são:

- **r** - seção somente de leitura. Utilizada para descrever memórias ROM;
- **w** - seção de leitura e escrita. Utilizada para descrever a memória RAM;

- **x** - seção que contém código executável. Pode ser utilizada em memórias ROM ou RAM;
- **a** - seções alocadas;
- **i** - seções inicializadas, e;
- **!** - inverte o sentido do atributo.

Para obtermos os endereços de início e o tamanho de cada região de memória devemos utilizar o *datasheet* do STM32F411. De acordo com o *datasheet* temos:

- **Flash Memory** - endereço de origem *0x0800 0000* e endereço final *0x0807 FFFF* com tamanho total de 512KB;
- **SRAM** - endereço de origem *0x2000 0000* e endereço final *0x2002 0000* com tamanho total de 128KB;

Com estas informações podemos escrever o comando **MEMORY** no nosso *linker script*.

A primeira seção que iremos definir é a seção **FLASH**. Esta seção irá armazenar o código do nosso programa e, não pode ser escrita por nosso programa. Portanto, esta seção possui os atritutos **rx**.

A outra seção que iremos definir é a seção **SRAM**. Este tipo de memória é do tipo leitura e escrita e também pode conter código executável. Assim, esta seção possui os atritutos **rwx**.

```
ENTRY(reset_handler)

MEMORY
{
  FLASH(rx): ORIGIN = 0x08000000, LENGTH = 512K
  SRAM(rwx): ORIGIN = 0x20000000, LENGTH = 128K
}
```

O comando **SECTION** é utilizado para criar diferentes seções no arquivo executável gerado, ele instrui o **linker** sobre como combinar diferentes seções dos arquivos objeto de entrada para gerar uma seção de saída. Além disto, este comando também controla a ordem na qual as diferentes seções de saída irão aparecer no arquivo executável final.

Ao utilizar o comando **SECTION** é necessário especificar em qual região da memória a seção deverá ser alocada. Por exemplo, devemos instruir o **linker** para alocar as seções **.isr_vectors** (Vetores de Interrupção), **.text** e **.rodata** (Dados de leitura apenas) na memória **FLASH** descrita previamente pelo comando **MEMORY**.

Abaixo temos a sintaxe do comando **SECTION**

```
SECTIONS
{
  /* Esta secao deve incluir a secao .text de todos arquivos objeto de entrada */
  .text :
  {
    /* combinar todas as secoes .isr_vectors de todos arquivos de entrada */
    /* combinar todas as secoes .text de todos arquivos de entrada */
    /* combinar todas as secoes .rodata de todos arquivos de entrada */
  }>(vma) AT>(lma)

  /* Esta secao deve incluir a secao .data de todos arquivos objeto de entrada */
  .data :
  {

  }>(vma) AT>(lma)

  /* Esta secao deve incluir a secao .bss de todos arquivos objeto de entrada */
  .bss :
  {

  }
}
```

A linha **>(vma) AT>(lma)** indica ao **linker** em qual região de memória alocar a seção. Para o caso da seção **FLASH** não será necessário realizar nenhum tipo de realocação de memória, os endereços **vma** e **lma** serão os mesmos. Assim, basta mencionarmos a região de memória **vma**.

```
.
.
.
SECTIONS
{
  /* combinar todas as secoes .isr_vectors de todos arquivos de entrada */
  /* combinar todas as secoes .text de todos arquivos de entrada */
  /* combinar todas as secoes .rodata de todos arquivos de entrada */
  .text :
  {
    *(.isr_vectors)
    *(.text)
    *(.rodata)
  }>FLASH
}
```

Devemos solicitar que o linker não realize nenhum tipo de otimização nas seções **.isr_vectors**. Isto é realizado por meio do comando **KEEP()**

```
.
.
.
SECTIONS
{
  /* combinar todas as secoes .isr_vectors de todos arquivos de entrada */
  /* combinar todas as secoes .text de todos arquivos de entrada */
  /* combinar todas as secoes .rodata de todos arquivos de entrada */
  .text :
  {
    KEEP(*(.isr_vectors))
    *(.text)
    *(.rodata)
  }>FLASH
}
```

Por outro lado, a seção **.data** deverá ser gravada na memória **FLASH** já que possui valores de inicialização mas também precisa ser copiada, na partida, para a **SRAM** pois são variáveis voláteis que podem ter seus valores modificados durante a execução do programa, algo que é possível na memória **SRAM**. Assim, devemos indicar como **vma** a região de memória **SRAM** e como **lma** a região de memória **FLASH**.

```
.
.
.
SECTIONS
{
  /* combinar todas as secoes .isr_vectors de todos arquivos de entrada */
  /* combinar todas as secoes .text de todos arquivos de entrada */
  /* combinar todas as secoes .rodata de todos arquivos de entrada */
  .text :
  {
    KEEP(*(.isr_vectors))
    *(.text)
    *(.rodata)
  }> FLASH
```

```
  /* Esta secao deve incluir a secao .data de todos arquivos objeto de entrada */
  .data :
  {
    *(.data)
  }> SRAM AT> FLASH
}
```

A seção **.bss** não necessita ser armazenada na **FLASH**, apenas na **SRAM**. Assim, precisamos apenas alocar a **vma** na região de memória **SRAM**.

```
.
.
.
SECTIONS
{
  /* combinar todas as secoes .isr_vectors de todos arquivos de entrada */
  /* combinar todas as secoes .text de todos arquivos de entrada */
  /* combinar todas as secoes .rodata de todos arquivos de entrada */
  .text :
  {
    KEEP(*(.isr_vectors))
    *(.text)
    *(.rodata)
  }> FLASH

  /* Esta secao deve incluir a secao .data de todos arquivos objeto de entrada */
  .data :
  {
    *(.data)
  }> SRAM AT> FLASH

  /* Esta secao deve incluir a secao .bss de todos arquivos objeto de entrada */
  .bss :
  {
    *(.bss)
  }> SRAM
}
```

Até o momento nosso *linker script* descreveu as regiões de memória disponíveis no nosso dispositivo e alocou as seções criadas de acordo com o mapa de memória que especficamos. O próximo passo é exportar os símbolos necessários para carregar os dados da seção **.data** da **FLASH** para **SRAM** e zerar a seção **.bss** na **SRAM**.

Para realizar a cópia dos dados da seção **.data** da **FLASH** para **SRAM** precisamos saber qual o endereço da origem dos dados na **FLASH**, o endereço do destino dos dados na **SRAM**, do número de bytes que serão transferidos ou do endereço do final da seção **.data**. De acordo com nosso *linker script* a seção **.data** na **FLASH** começa logo após o término da seção **.text**. Salvaremos o endereço do término da seção **.text** no símbolo **_etext**. Iremos alocar a seção** .data** no início da **SRAM** e utilizaremos o símbolo **.sdata** para salvar o endereço do início desta seção. Por fim, salvaremos o endereço do fim da seção **.data** no símbolo **_edata**.

Para calcular o valor dos símbolos que serão exportados utilizaremos uma função do **linker** chamada *location counter*, denotada pelo símbolo **“.”** (ponto). Esse símbolo representa a posição atual na memória no processo de montagem. O **linker** atualiza o valor armazenado por este símbolo automaticamente à medida que vamos adicionando novos dados às seções. Logo, podemos utilizar o *location counter* para rastrear os limites das várias seções. Vale destacar que o *location counter* só é válido dentro do comando **SECTIONS** e é incrementado pelo tamanho da seção de saída.

O código abaixo mostra como exportar os símbolos **_etext, _sdata** e **_edata**:

```
.
.
```

```
.

SECTIONS
{
  /* combinar todas as secoes .isr_vectors de todos arquivos de entrada */
  /* combinar todas as secoes .text de todos arquivos de entrada */
  /* combinar todas as secoes .rodata de todos arquivos de entrada */
  .text :
  {
    KEEP(*(.isr_vectors))
    *(.text)
    *(.rodata)
    _etext = .;
    _la_data = _etext;
  }> FLASH

  .data :
  {
    _sdata = .;
    *(.data)
    _edata = .;
  }> SRAM AT> FLASH
.
.
.
}
```

Imagine que o final da seção **.text** esteja no endereço **0x0800 03fd**, isto faz com que o endereço inicial da seção **.data** não seja alinhado em 4 bytes. Uma consequência direta disto é que não poderíamos utilizar instruções **LDR** e **STR** múltiplas, impactando no desempenho. Para evitar problemas relacionados ao acesso não alinhado à memória devemos solicitar ao **linker** que, caso necessário, adicione um *padding* (bytes adicionais), ao final de cada seção utilizando o comando **ALIGN(4)**. No nosso caso, o alinhamento do início de cada seção está garantindo pelo seu endereço. Em alguns casos pode ser interessante também adicionar comandos de alinhamento também no início da seção, como no caso da **.bss**, que estará em alguma posição da **SRAM** no momento da montagem.

```
.
.
.

SECTIONS
{
  /* combinar todas as secoes .isr_vectors de todos arquivos de entrada */
  /* combinar todas as secoes .text de todos arquivos de entrada */
  /* combinar todas as secoes .rodata de todos arquivos de entrada */
  .text :
  {
    KEEP(*(.isr_vectors))
    *(.text)
    *(.rodata)
    . = ALIGN(4);
    _etext = .;
    _la_data = _etext;
  }> FLASH

  .data :
  {
    _sdata = .;
```

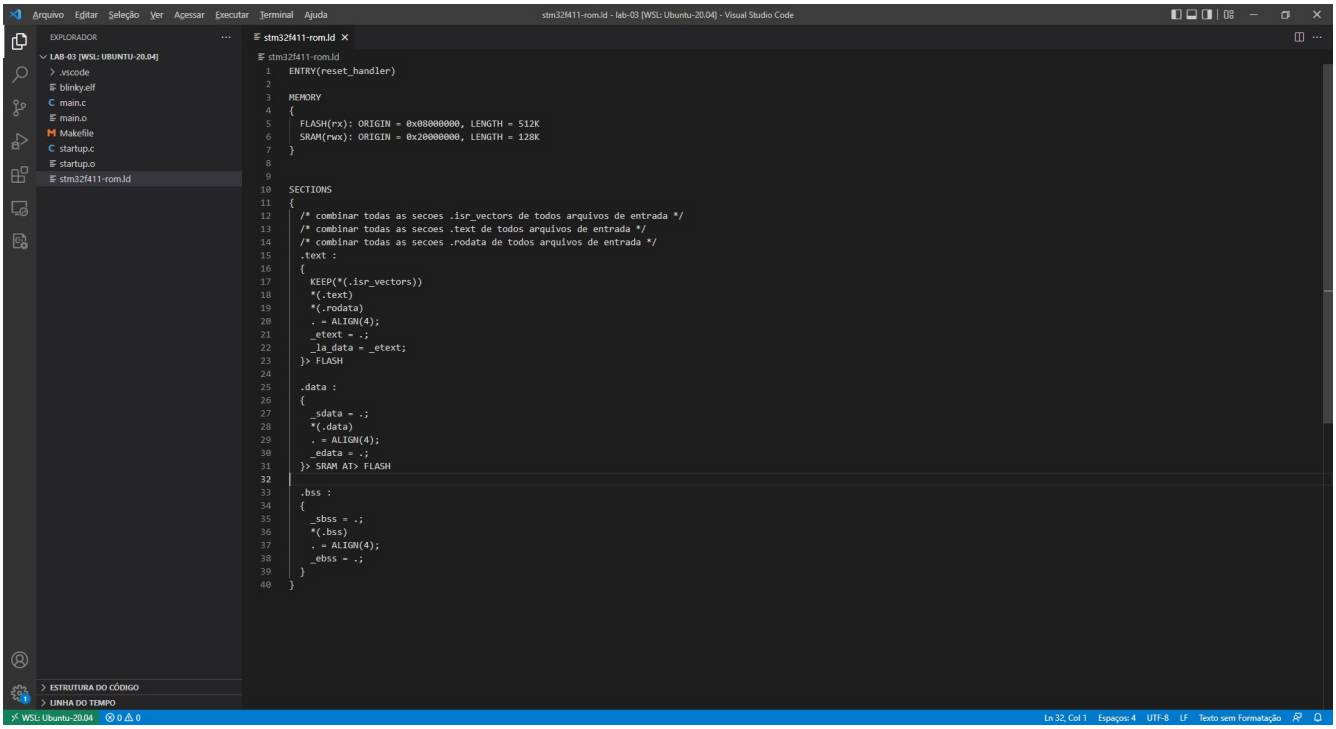
```
    *(.data)
    . = ALIGN(4);
    _edata = .;
  }> SRAM AT> FLASH
.
.
.
}
```

Podemos calcular os limites da seção **.bss** de maneira análoga. Assim teremos:

```
.
.
.
SECTIONS
{
  /* combinar todas as secoes .isr_vectors de todos arquivos de entrada */
  /* combinar todas as secoes .text de todos arquivos de entrada */
  /* combinar todas as secoes .rodata de todos arquivos de entrada */
  .text :
  {
    KEEP(*(.isr_vectors))
    *(.text)
    *(.rodata)
    . = ALIGN(4);
    _etext = .;
    _la_data = _etext;
  }> FLASH

  .data :
  {
    _sdata = .;
    *(.data)
    . = ALIGN(4);
    _edata = .;
  }> SRAM AT> FLASH

  .bss :
  {
    . = ALIGN(4);
    _sbss = .;
    *(.bss)
    . = ALIGN(4);
    _ebss = .;
  }> SRAM
}
```




```
ENTRY(reset_handler)

MEMORY
{
  FLASH(rx): ORIGIN = 0x08000000, LENGTH = 512K
  SRAM(rwx): ORIGIN = 0x20000000, LENGTH = 128K
}


SECTIONS
{
  /* combinar todas as secoes .isr_vectors de todos arquivos de entrada */
  /* combinar todas as secoes .text de todos arquivos de entrada */
  /* combinar todas as secoes .rodata de todos arquivos de entrada */
  .text :
  {
    KEEP(*(.isr_vectors))
    *(.text)
    *(.rodata)
    . = ALIGN(4);
    _etext = .;
    _la_data = _etext;
  }> FLASH

  .data :
  {
    _sdata = .;
    *(.data)
    . = ALIGN(4);
    _edata = .;
  }> SRAM AT> FLASH

  .bss :
  {
    _sbss = .;
    *(.bss)
    . = ALIGN(4);
    _ebss = .;
  }
}
```

7 - Modificar o Makefile

Para realizar a linkedição do nosso iremos utilizar o compilador, que se encarregará de chamar o **linker**, indicando o arquivo *linker script* os arquivos objeto de entrada e o arquivo de saída. Visto que não utilizamos nenhuma função da biblioteca padrão do **C** vamos informar ao **linker** para não utilizar a biblioteca padrão por meio da opção **-nostdlib**. A linha abaixo mostra como gerar o arquivo executável.

```
foo@bar$ make
foo@bar$ arm-none-eabi-gcc -nostdlib -T stm32f411-rom.ld main.o startup.o -o blinky.elf
```

Podemos alterar nosso **Makefile** para realizar o processo de ***linking*** automaticamente. Para isso vamos adicionar uma nova regra para o arquivo de saída **blinky.elf**, e colocar este arquivo como dependência do **target all** e colocar os arquivos objeto como dependência de **blinky.elf**.

Vamos criar as variáveis **LD** e **LDFLAGS** para armazenar o nome do **linker** e as opções, respectivamente.

```
CC = arm-none-eabi-gcc
LD = arm-none-eabi-gcc
CP = arm-none-eabi-objcopy
CFLAGS = -mcpu=cortex-m4 -mthumb
LFLAGS = -nostdlib -T stm32f411-rom.ld

all: blinky.elf

blinky.elf: main.o startup.o
   $(LD) $(LFLAGS) $^ -o $@
   $(CP) $(PROG).elf -O binary $(PROG).bin

%.o: %.c
   $(CC) -c $(CFLAGS) $< -o $@

clean:
   rm -f *.o *.elf
```

Para manter o **Makefile** mais genérico vamos substituir o nome do arquivo executável que estamos gerando por

uma variável e criar uma variável com uma lista dos arquivos objetos a serem gerados.

```
PROG = blinky

CC = arm-none-eabi-gcc
LD = arm-none-eabi-gcc
CP = arm-none-eabi-objcopy
CFLAGS = -mcpu=cortex-m4 -mthumb
LFLAGS = -nostdlib -T stm32f411-rom.ld

OBJS = startup.o \
       main.o

all: $(PROG).elf

$(PROG).elf: $(OBJS)
   $(LD) $(LFLAGS) $^ -o $@
   $(CP) $(PROG).elf -O binary $(PROG).bin

%.o: %.c
   $(CC) -c $(CFLAGS) $< -o $@

clean:
   rm -f $(OBJS) $(PROG).elf
```

Note que usamos o *objcopy* para gerar uma imagem binária do programa, pronto para ser gravado na flash do microcontrolador, com posição inicial 0x0800 0000.