

Linguagem C

Uma revisão com foco em sistemas embarcados

Marcelo Barros e Daniel Carvalho

<https://github.com/marcelobarrosalmeida/mbedc>

UFU/FEELT

6 de março de 2023

Sumário

Introdução

Préprocessador

Organização de arquivos de inclusão

Classes de armazenamento

Seções de um programa

Uso da pilha

Passagem por valor e referência

Uso de ponteiros

Qualificadores const e volatile

Enumerações, estruturas e uniões

Organização de arquivos fonte

Versões utilizadas

- ▶ Versão C11 (ISO/IEC 9899:2011)
- ▶ Compilador GNU GCC¹

¹https://www.onlinegdb.com/online_c_compiler

Linha do tempo da linguagem C

B (1972): Primeira implementação, Dennis Ritchie and Ken Thompson e colegas para o PDP11.

K&R (1978): Primeira especificação informal.

C89/C90 (1989/1990): Adoção como padrão pela ANSI (C89) e depois pela ISO (C90).

C99 (1999): Primeira grande revisão do padrão, amplamente utilizada.

C11 (2011): Segunda revisão da linguagem. Aproximação ao C++.

C17 (2018): Sem características novas. Apenas correções.

C2x (2023?) ²

²<https://en.wikipedia.org/wiki/C2x>

Embedded C

Existe uma linguagem “Embedded C” ?

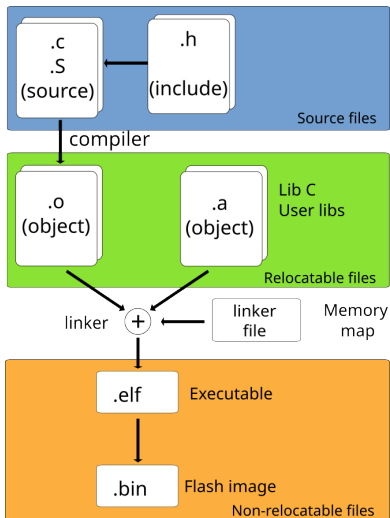
- ▶ Tecnicamente é apenas uma extensão do C, cobrindo:
 - ▶ Aritmética de ponto fixo
 - ▶ Espaço de endereçamento
 - ▶ Endereçamento de hardware básico para I/O
- ▶ Norma: *Programming languages — C — Extensions to support embedded processors* ISO/IEC TR 18037:2008

Palavras Reservadas

- ▶ Não devem ser usadas como nomes de funções ou variáveis
- ▶ São *case sensitive*
- ▶ Em azul, as adições do C11 em relação ao C99

```
auto break case char const continue default  
do double else enum extern float for goto if  
inline int long register restrict return short  
signed sizeof static struct switch typedef  
union unsigned void volatile while _Bool  
_Complex _Imaginary  
_Alignas _Alignof _Atomic _Generic _Noreturn  
_Static_assert _Thread_local
```

Estrutura e organização de uma aplicação (linkagem estática)



Diretivas de pré-processamento

Permitem o processamento do arquivo C antes que ele seja compilado. Podem definir macros, incluir arquivos, selecionar partes do código que serão compiladas ou não, gerar erros, etc. As diretivas mais importantes são:

- ▶ `#include`
- ▶ `#define` e `#undef`
- ▶ `#if`, `#ifdef`, `#ifndef`, `#elif`, `#else` e `#endif`
- ▶ `#error`
- ▶ `#pragma`

Diretiva #include

Provavelmente a mais conhecida das diretivas. Permite a inclusão do conteúdo do arquivo citado antes da compilação.

```
// Procura por inclusoes nos arquivos de inclusao do compilador  
#include <stdio.h>  
// Procura por inclusoes no diretorio corrente ou em diretorios  
// indicados para o compilador (depende da implementacao)  
#include "gps.h"  
#include "drivers/accel.h"
```

Indicando diretórios de inclusão para o compilador:

```
gcc -I<local1> -I<local2> ..  
gcc -I. -I.. -Iinc ...
```

Muitas vezes a IDE oculta esses detalhes do desenvolvedor mas eles devem ser informados em algum momento.

Diretiva #define

Permite criar macros que serão posteriormente substituídas (*object-like macros*) ou avaliadas como função (*function-like macros*), sempre antes da compilação, na fase de pré-processamento dos arquivos fonte.

```
// object-like macros (from gcc manual)
//
#define BUFFER_SIZE 1024
#define NUMBERS 1, \
                2, \
                3
#define GPIO_PIN_0    ((uint16_t)0x0001)

int main(void)
{
    int x[] = { NUMBERS };
    char *foo = (char *) malloc (BUFFER_SIZE);
    // ...
    return 0;
}
```

Diretiva #define (exemplo de herança)

```
#include <stdio.h>
#include <stdint.h>
// it is too easy to change base class for all derived classes
#define BASE_CLASS \
    uint8_t id;      \
    uint32_t size

#define BASE_CLASS_INIT(a,b) (a), (b)

typedef struct
{
    BASE_CLASS; // this position must be fixed if you use castings to base class
    uint32_t member_a1;
    uint32_t member_a2;
} class_a;

typedef struct
{
    BASE_CLASS; // this position must be fixed if you use castings to base class
    uint32_t member_b1;
    uint32_t member_b2;
} class_b;

int main()
{
    class_a a = { BASE_CLASS_INIT(1,10), 0 ,0};
    class_b b = { BASE_CLASS_INIT(2,20), 0 ,0};
    printf("Class a: %u, %u, %u, %u\r", a.id, a.size, a.member_a1, a.member_a2);
    printf("Class b: %u, %u, %u, %u\r", b.id, b.size, b.member_b1, b.member_b2);

    return 0;
}
```

Diretiva #define

Exemplos com function-like macros:

```
// function-like macros ()  
//  
#define MIN_VAL(a,b) ((a) <= (b) ? (a) : (b))  
#define PI 3.141592  
#define RAD2DEG(rad) ((rad)*180.0/PI)  
#define DEG2RAD(deg) ((deg)*PI/180.0)  
  
int main(void)  
{  
    printf("Min val is: %d\n", MIN_VAL(5,7));  
    printf("90 degrees in radians is %f\n", DEG2RAD(90));  
    return 0;  
}
```

- ▶ Podem ser passados vários argumentos e inclusive uma lista variável.
- ▶ Considere se não é melhor ter uma função de fato.

Diretiva #define (buffer circular)

```
#include <stdio.h>
#include <stdint.h>
#include <stdbool.h>

#define CBF_INC(v,mv) (((v)+1) >= (mv)) ? \
    0 : (v)+1

typedef struct cbf_s
{
    volatile uint16_t prod;
    volatile uint16_t cons;
    uint16_t size;
    uint8_t *buffer;
} cbf_t;

bool cbf_put(cbf_t *cb, uint8_t c)
{
    uint16_t next_prod = CBF_INC(cb->prod,cb
        ->size);

    if(next_prod == cb->cons)
        return false;

    cb->buffer[cb->prod] = c;
    cb->prod = next_prod;
    return true;
}
```

```
bool cbf_get(cbf_t *cb, uint8_t *c)
{
    if(cb->cons == cb->prod)
        return false;

    *c = cb->buffer[cb->cons];
    cb->cons = CBF_INC(cb->cons,cb->size);
    return true;
}

// ## is the token-pasting operator
#define CBF_DECLARE_AND_INIT(name,sz) \
    static uint8_t name##buffer[sz + 1]; \
    static cbf_t name = { \
        .prod = 0, \
        .cons = 0, \
        .size = sz+1, \
        .buffer = name##buffer, \
    }

CBF_DECLARE_AND_INIT(eth_drv_cb,100);

int main(void) {
    uint8_t c;
    cbf_put(&eth_drv_cb,'a');
    cbf_get(&eth_drv_cb,&c);
    printf("Char = %c\n", (char)c);
    return 0;
}
```

Diretivas #if e #error

```
// This define could be provided by command line:  
// gcc -DVERSION=2 ...  
  
#define VERSION 2  
  
#if VERSION == 1  
    #define INCFILE "vers1.h"  
#elif VERSION == 2  
    #define INCFILE "vers2.h" // and so on  
#else  
    // Generates an error message on console  
    #error "Wrong version !"  
#endif  
  
#include INCFILE  
  
// Ref: Example modified from C11 standard
```

No caso de uma versão inválida, teremos:

Compilation failed due to following error(s).

```
main.c:9:4: error: #error "Wrong version !"  
  9 |   #error "Wrong version !"  
    |   ^~~~~~  
main.c:12:10: error: #include expects "FILENAME" or  
 12 | #include INCFILE  
    |   ^~~~~~
```

Organização dos arquivos de inclusão

```
#ifndef __DEMO_H__
#define __DEMO_H__

#ifdef __cplusplus
extern "C" {
#endif

// defines

// enumeracoes compartilhadas

// tipos de dados compartilhados
// (estruturas, unioes, typedefs)

// prototipo de funcoes

#ifdef __cplusplus
}
#endif

#endif /* __DEMO_H__ */
```

- ▶ Pense como API: só exporte interfaces e o que elas precisarem !
- ▶ Não esqueça a proteção de inclusão recursiva !
- ▶ Não é ANSI-C mas `#pragma once` pode ser interessante
- ▶ Não definir variáveis ou funções em `.h`
- ▶ Evite colocar arquivos de inclusão em `.h` (boa prática)
- ▶ E o `__cplusplus` e `extern "C"` ?

Name mangling ou name decoration

- ▶ É uma forma de adicionar informações adicionais a nomes de funções, variáveis, etc, de forma a remover ambiguidade e gerar informação adicional ao linker³.
- ▶ Por exemplo, como o compilador C++ irá gerar nomes únicos para uma função com *overloading* ?

```
void accel_read(float &x, float &y, float &x) {}  
void accel_read(accel_t &data) {};
```

- ▶ Nomes decorados gerados pelo GCC (objdump -d <binário>):

```
00000000000001149 <_Z9accel_readRfS_S_>:  
00000000000001160 <_Z9accel_readR7accel_s_>:
```

³ <https://bit.ly/3CuvCYe>

Name mangling ou name decoration

- ▶ Logo, se você linkar um programa em C com outras partes em C++, o compilador C++ irá gerar um padrão de name decoration para as suas funções em C que é diferente dos símbolos gerados pelo C !
- ▶ A convenção de chamada padrão do C (`_cdecl`)⁴ apenas adiciona “_” antes do nome das funções.
- ▶ Assim, se declarar a função como `extern "C" void func(void);` você está explicitando que a decoração de `func` deve seguir o padrão do C (`_func`).
- ▶ O `__cplusplus` é a forma de se identificar se é o compilador C++ quem está compilando o arquivo

⁴ https://en.wikipedia.org/wiki/Name_mangling

E o extern ?

O externo permite explicitar a exportação do símbolo:

Para variáveis: diz para o compilador que a variável citada existe em algum lugar, não aloca memória para ela. O linker vai cuidar de “encontrar” onde a declaração foi feita.

```
extern uint8_t buffer[16];
```

Para funções: evidencia que a função tem linkagem externa, ou seja, o linker vai deixá-la disponível para ser “encontrada” por qualquer arquivo C. Esse é o default da linguagem. É o inverso do “static”.

Atenção: `extern "C" <nome>` é um dialeto C++ !

Arquivos de inclusão (exemplo)

```
#ifndef __ACCEL_H__
#define __ACCEL_H__

#ifdef __cplusplus
extern "C" {
#endif

#define ACCEL_NUM_AXIS 3

typedef struct accel_data_s
{
    float axis[ACCEL_NUM_AXIS];
} accel_data_t;

void accel_read(accel_data_t *data);
void accel_init(void);

#ifdef __cplusplus
}
#endif

#endif /* __ACCEL_H__ */
```

Especificadores de classes de armazenamento

- ▶ `extern` é uma das classes de armazenamento do C
- ▶ Existem outros especificadores !
- ▶ No entanto, precisamos entender antes como as variáveis são armazenadas e as seções de código !

```
extern static auto register
```

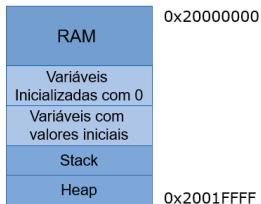
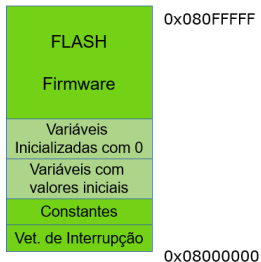
Seções de código e dados do programa para embarcados

Quando o programa é compilador, ele é dividido em **seções**:

- text (flash)**: Onde é armazenado o código executável de fato, geralmente em flash
- rodata (flash)**: Constantes do código (read only)
- bss (RAM)**: Local das variáveis que vão ser inicializadas com zero na partida (o usuário não fez uma inicialização de valor explícita)
- data (RAM)**: Locas das variáveis que tiveram valores iniciais definidos pelo usuário.
- stack (RAM)**: Parte da RAM usada para variável temporárias e passagem de parâmetros
- heap (RAM)**: Parte da RAM usada para alocações dinâmicas

Exemplo de seções para um microcontrolador STM32F411

- ▶ Um arquivo de *linkedição* (.ld) especifica as áreas de memória (flash e RAM) e como elas serão divididas para comportar as seções de text, bss, data, rodata, heap e stack.
- ▶ Um código de inicialização (que roda antes do `main()`) é responsável por preparar o terreno:
 - ▶ Zerar a seção bss
 - ▶ Inicializar a seção data
 - ▶ Inicializar o ponteiro da pilha
 - ▶ Inicializar o heap



Stack (Pilha) e heap

- ▶ Stack:
 - ▶ Geralmente usado para alocação de variáveis temporárias ou passagem de parâmetros.
 - ▶ É uma região linear de memória, normalmente gerida por um registro denominado de *Stack Pointer*.
 - ▶ O compilador analisa o código e gerar instruções para uso do stack.
- ▶ Heap: uma área de memória reservada para as alocações dinâmicas de memória pelo programa (via chamadas como calloc/malloc)

Stack (Exemplo)

```
#include <stdint.h>
#include <stdio.h>

uint32_t global_sum = 10;

uint32_t sum(uint32_t *values,
             uint32_t size)
{
    uint32_t sum = 0;

    for(size_t n = 0; n < size; n++)
        sum += values[n];

    return sum;
}

int main(void)
{
    uint32_t data[] = { 1, 2, 3 };
    global_sum = sum(data, 3);
    printf("Sum is %u\r\n", global_sum);
    return 0;
}
```

- ▶ `global_sum`: na seção `data`
- ▶ `data`: temporariamente no `stack`
- ▶ `sum`: temporariamente no `stack`
- ▶ variáveis passadas na chamada da função `sum`: temporariamente no `stack`
- ▶ retorno do valor da função `sum`: temporariamente no `stack`

Cuidados no uso da pilha

- ▶ Tamanho de variáveis e estouro de pilha
- ▶ Recursão ou longo encadeamento de chamadas
- ▶ Retorno de valores locais
- ▶ Dimensionamento da pilha

Formas de dimensionamento da pilha

- ▶ Análises estáticas
 - ▶ Usando o próprio compilador (`-fstack-usage` e `-fcallgraph-info` no GCC) e analisando o uso da pilha a partir do `main()` (análise estática)
 - ▶ Usando ferramentas (PC-Lint, valgrind, cppcheck)
 - ▶ Problemas: podem falhar em casos de recursão, interrupções, chamadas indiretas (ponteiros para função)
- ▶ Análises dinâmicas: técnica da marca d'agua na região do stack (verificação dinâmica, útil em caso de recursão, interrupção)

Retomando: especificadores de classe de armazenamento

Uso de static em variáveis e funções:

- ▶ static em variáveis locais:
 - ▶ Escopo local (não visível fora da função)
 - ▶ Armazenamento em área global (não usa pilha)
 - ▶ Permite valores de inicialização.
- ▶ static em variáveis globais: linkagem interna para a variável (não “visível” por outros arquivos). Isso permite, por exemplo, ter *nomes de variáveis iguais em arquivos diferentes*.
- ▶ static em funções: linkagem interna para a função, similar a variáveis.

Exemplo de static e variáveis locais

```
#include <stdint.h>
#include <stdbool.h>

#define DATA_SIZE 128

int drv_init(void)
{
    static bool initialized = false;
    static uint32_t data[DATA_SIZE];

    if(!initialized)
    {
        for(size_t n = 0 ; n < DATA_SIZE; n++)
            data[n] = n;

        initialized = true;
    }
}
```

- ▶ initialized: na seção de variáveis globais mas sem visibilidade fora de drv_init, com valor inicial false e mantendo o valor entre chamadas da função
- ▶ data: idem, não penalizando o stack

Detalhes: retorno de valores locais, da pilha, pode ?

```
typedef struct accel_s {
    float x;
    float y;
    float z;
} accel_t;

uint32_t rand_perc(void)
{
    uint32_t val = rand() % 100;
    return val;
}

accel_t accel_axis_get1(void)
{
    accel_t accel = { 0 };
    accel_read(&accel);
    return accel;
}

accel_t accel_axis_get2(void)
{
    accel_t *accel = calloc(1, sizeof(accel_t));
    accel_read(accel);
    return *accel;
}
```

Detalhes: retorno de valores locais, da pilha, pode ?

```
typedef struct accel_s {  
    float x;  
    float y;  
    float z;  
} accel_t;  
  
uint32_t rand_perc(void)  
{  
    uint32_t val = rand() % 100;  
    return val;  
}  
  
accel_t accel_axis_get1(void)  
{  
    accel_t accel = { 0 };  
    accel_read(&accel);  
    return accel;  
}  
  
accel_t accel_axis_get2(void)  
{  
    accel_t *accel = calloc(1, sizeof(accel_t));  
    accel_read(accel);  
    return *accel;  
}
```



Detalhes: retorno de valores locais, da pilha, pode ?

```
typedef struct accel_s {
    float x;
    float y;
    float z;
} accel_t;

accel_t *accel_axis_get3(void)
{
    accel_t *accel = calloc(1, sizeof(accel_t));
    accel_read(accel);
    return accel;
}

accel_t *accel_axis_get4(void)
{
    /* auto */ accel_t accel = { 0 };
    accel_read(&accel);
    return &accel;
}

accel_t *accel_axis_get5(void)
{
    static accel_t accel = { 0 };
    accel_read(&accel);
    return &accel;
}
```

Detalhes: retorno de valores locais, da pilha, pode ?

```
typedef struct accel_s {  
    float x;  
    float y;  
    float z;  
} accel_t;  
  
accel_t *accel_axis_get3(void)  
{  
    accel_t *accel = calloc(1, sizeof(accel_t));  
    accel_read(accel);  
    return accel;  
}  
  
accel_t *accel_axis_get4(void)  
{  
    /* auto */ accel_t accel = { 0 };  
    accel_read(&accel);  
    return &accel;  
}  
  
accel_t *accel_axis_get5(void)  
{  
    static accel_t accel = { 0 };  
    accel_read(&accel);  
    return &accel;  
}
```



Especificadores de classes de armazenamento (auto)

```
#include <stdint.h>
#include <stdio.h>

int main(void)
{
    /* auto */ uint32_t val = 0;
    printf("Val is %u\r\n", val);

    { // creating a new scope
        /* auto */ uint32_t val = 10;
        printf("Val is %u\r\n", val);
    }

    val++;
    printf("Val is %u\r\n", val);

    return 0;
}
```

auto

- ▶ É a classe padrão, de escopo local, armazenadas na RAM (pilha), valor inicial pode ser lixo.
- ▶ Pode ser omitida, por simplicidade.

Especificadores de classe de armazenamento (extern)

```
// file1.c
uint32_t var = 10;
uint32_t var_get(void)
{
    return var;
}
```

```
// file2.c
#include <stdint.h>
#include <stdio.h>

// not recommended!
extern uint32_t var;
extern uint32_t var_get(void);

int main(void)
{
    printf("Val is %u\r\n", var);
    printf("Val is %u\r\n", var_get());
    return 0;
}
```

- ▶ Por default, o compilador C externa todos os símbolos gerados (main, var).
- ▶ Com `extern`, você pode explicitamente dizer que existe algo externo ao seu arquivo (file2.c) e que pretende usar.
- ▶ No entanto, mesmo que não especifique nada, o linker vai tentar encontrar algo na tabela de símbolos que resolva a referência.

Especificadores de classe de armazenamento (static/extern)

```
// file1.h
uint32_t var_get(void);
```

```
// file1.c
static uint32_t var = 10;
uint32_t var_get(void)
{
    return var;
}
```

```
// file2.c
#include <stdint.h>
#include <stdio.h>
#include "file1.h"

int main(void)
{
    printf("Val is %u\r\n", var_get());
    return 0;
}
```

- ▶ Agora `var` tem **linkagem interna**, não é mais vista fora de `file2.c` (o símbolo não é exportado)
- ▶ Conceito também válido para funções `static` !
- ▶ Princípio de encapsulamento ou API.

Especificadores de classe de armazenamento

`register`

- ▶ Se usada com variáveis dentro de funções.
- ▶ Indica ao compilador que deseja o armazenamento da variável em um registro do processador (geralmente para maior performance).
- ▶ Pouco útil atualmente, em geral o compilador resolve bem essas situações.

Passagem por valor x passagem por referência

- ▶ Passagem por valor: o valor original é copiado e não pode ser alterado pela função
- ▶ Passagem por referência:
 - ▶ O valor original não é copiado e pode ser alterado pela função.
 - ▶ É utilizado um ponteiro para essa operação, ou seja, deve ser passado o endereço do dado (referência) e não o seu valor.
 - ▶ Também é interessante quando se passam estruturas muito grandes, economizando memória e processamento

```
// passagem por valor
void func1(uint32_t v){ v = v + 5; }
// passagem por referencia
void func2(uint32_t *v){ *v = *v + 5; }

int main(void)
{
    uint32_t v = 10;
    func1(v); // v nao sera alterado
    func2(&v); // v sera alterado (15)
    return 0;
}
```

Ponteiros

- ▶ Um ponteiro armazena endereço de memória e não um valor !
- ▶ São referências indiretas para outras variáveis ou funções
- ▶ São declarados com o emprego do asterisco "*"
- ▶ Endereços de variáveis podem ser obtidos com o uso do operador "&"
- ▶ Declaração básica de uma variável ponteiro:

```
<tipo_de_dado> *variavel;  
uint8_t *pbuffer;  
struct accel_s *paccel;
```

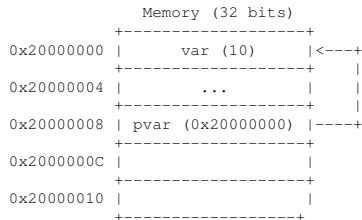
Ponteiros para variáveis

```
#include <stdint.h>
#include <stdio.h>

void add(uint32_t *pv)
{
    *pv = *pv + 1;
}

int main(void)
{
    uint32_t var = 10;
    uint32_t *pvar = &var;

    add(pvar);
    printf("%u\r\n", var);
    add(&var);
    printf("%u\r\n", var);
}
```



Ponteiros para estruturas

```
#include <stdint.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>

typedef struct frame_s
{
    uint8_t size;
    uint8_t cmd;
    uint8_t payload[32];
} frame_t;

void frame_print(frame_t *cmd)
{
    printf("C:%u S:%u P:%s\r\n",
        cmd->cmd, cmd->size, (char *) cmd->payload);
}

int main(void)
{
    frame_t frame = { 0 };
    frame.cmd = 1;
    frame.size = 6;
    strcpy((char *) frame.payload, "teste");
    frame_print(&frame);
    return 0;
}
```


Ponteiros e vetores

```
#include <stdio.h>
#include <inttypes.h>

uint32_t v[4];

int main(void)
{
    printf("V      = 0x%08lX\n", (uintptr_t)v);
    printf("&V      = 0x%08lX\n", (uintptr_t)&v);
    printf("&V[0] = 0x%08lX\n", (uintptr_t)&v[0]);
    printf("&V[1] = 0x%08lX\n", (uintptr_t)&v[1]);
    printf("&V[2] = 0x%08lX\n", (uintptr_t)(v + 2));
    printf("&V[2] = 0x%08lX\n", (uintptr_t)(v + 3));
    return 0;
}
```

```
V      = 0x55D2EBB8F020
&V      = 0x55D2EBB8F020
&V[0] = 0x55D2EBB8F020
&V[1] = 0x55D2EBB8F024
&V[2] = 0x55D2EBB8F028
&V[2] = 0x55D2EBB8F02C
```

Ponteiros e arrays de caracteres

```
#include <stdio.h>
#include <inttypes.h>
#include <string.h>
int main (void)
{
    uint8_t str1[] = { 'a', 'b', '\0' };
    uint8_t *str2 = "ab";
    uint8_t *str3[] = { "ab", "12" };
    printf("STR1 = 0x%08lX\n", (uintptr_t) str1);
    printf("STR2 = 0x%08lX\n", (uintptr_t) str2);
    printf("STR3 = 0x%08lX\n", (uintptr_t) str3);
    printf("STR1      %s,%lu\n", str1, strlen(str1));
    printf("STR2      %s,%lu\n", str2, strlen(str2));
    printf("STR3[0]    %s,%lu\n", str3[0], strlen(str3[0]));
    printf("STR3[1]    %s,%lu\n", str3[1], strlen(str3[1]));
    return 0;
}
```

```
STR1 = 0x7FFE326EC8E5    <== stack
STR2 = 0x5585446ED004    <== global
STR3 = 0x7FFE326EC8D0    <== stack
STR1      ab,2
STR2      ab,2
STR3[0]    ab,2
STR3[1]    12,2
```

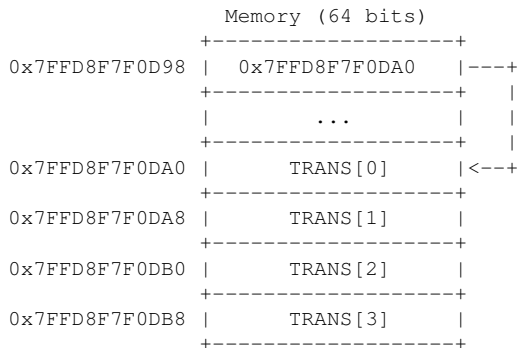
Aritmética de ponteiros

Regra básica: ao incrementar/decrementar um ponteiro, o valor adicionado/subtraído é igual ao tamanho do tipo de dado para o qual ele aponta.

```
#include <stdio.h>
#include <inttypes.h>
typedef struct trans_s
{
    uint32_t ID;
    float value;
} trans_t;
int main(void)
{
    trans_t trans[4] = { 0 } ;
    trans_t *ptrans = trans;
    printf("SIZE      = %lu\n", sizeof(trans_t));
    printf("TRANS      = 0x%08lX\n", (uintptr_t)trans);
    printf("PTRANS      = 0x%08lX\n", (uintptr_t)ptrans);
    printf("&PTRANS   = 0x%08lX\n", (uintptr_t)&ptrans);
    printf("TRAN[0]     = 0x%08lX\n", (uintptr_t)&trans[0]);
    printf("TRAN[1]     = 0x%08lX\n", (uintptr_t)(ptrans + 1));
    return 0;
}
```

Aritmética de ponteiros

```
SIZE      = 8
TRANS     = 0x7FFD8F7F0DA0
PTRANS    = 0x7FFD8F7F0DA0
&PTRANS   = 0x7FFD8F7F0D98
TRAN[0]   = 0x7FFD8F7F0DA0
TRAN[1]   = 0x7FFD8F7F0DA8
```



Ponteiros para função

- ▶ O nome da função é um sempre um ponteiro !
- ▶ O grande problema é a notação, que é confusa !

```
#include <stdio.h>
#include <inttypes.h>

int64_t sum(int32_t a, int32_t b)
{
    return a + b;
}

int main (void)
{
    printf("%lu\n", sum(10, 20)); // 30

    int64_t (*pfun)(int32_t a, int32_t b) = sum;

    printf("%lu\n", pfun(30, 40)); // 70

    uintptr_t pf = (uintptr_t) sum;
    int64_t r = ((int64_t (*)(int32_t a, int32_t b))pf)(50, 60);

    printf("%lu\n", r); // 110

    return 0;
}
```

Ponteiros para função

- ▶ Mas não precisa ser confuso assim ! O uso de typedef pode ajudar.
- ▶ Acompanhe como criar um ponteiro pra função e como o programa se transforma depois disso.

```
int64_t sum(int32_t a, int32_t b);  
typedef int64_t sum(int32_t a, int32_t b);  
typedef int64_t (sum)(int32_t a, int32_t b);  
typedef int64_t (sum_t)(int32_t a, int32_t b);  
typedef int64_t (*sum_t)(int32_t a, int32_t b);
```

```
typedef <retorno> (*nome_do_tipo)(lista,de,parametros);
```

Ponteiros para função

► Bem mais legível:

```
#include <stdio.h>
#include <inttypes.h>

typedef int64_t (*sum_t)(int32_t a, int32_t b);

int64_t sum(int32_t a, int32_t b)
{
    return a + b;
}

int main (void)
{
    printf("%lu\n", sum(10, 20)); // 30

    sum_t pfun = sum;
    printf("%lu\n", pfun(30, 40)); // 70

    // generic data type that can hold a pointer address
    uintptr_t pf = (uintptr_t) sum;
    // function casting
    int64_t r = ((sum_t)pf)(50, 60);

    printf("%lu\n", r); // 100

    return 0;
}
```

Ponteiros para função (Exemplo completo)

```
#include <stdio.h>
#include <stdint.h>

void spi_dev1_write(uint8_t *buf, uint16_t size){ /* driver here */ }
void spi_dev1_read(uint8_t *buf, uint16_t size){ /* driver here */ }
void spi_dev2_write(uint8_t *buf, uint16_t size){ /* driver here */ }
void spi_dev2_read(uint8_t *buf, uint16_t size){ /* driver here */ }

typedef void (*write_t)(uint8_t *buf, uint16_t size);
typedef void (*read_t)(uint8_t *buf, uint16_t size);

typedef struct drv_s
{
    write_t write;
    read_t read;
} drv_t;

int main(void)
{
    uint8_t data[] = {10,11,12,13,14};
    drv_t drv = { .write = spi_dev1_write, .read = spi_dev1_read };
    drv.write(data,5); // write on dev1

    drv.write = spi_dev2_write;
    drv.read = spi_dev2_read;
    drv.write(data,5); // write on dev2
    return 0;
}
```


Qualificadores

`const volatile`

const: indica que a variável é constante, ou seja, que seu valor não muda durante a execução. O compilador pode usar essa informação para colocar essa variável em flash e encontrar erros em tempo de compilação.

volatile: indica que o valor da variável pode ser alterado por outros elementos além do fluxo de programa principal em execução. Exemplos:

- ▶ Uma variável global compartilhada entre duas tarefas ou entre o programa principal e uma interrupção associadas a uma opção de compilação com maior nível de otimização.
- ▶ Uma variável que aponta para um registro do processador, ou seja, que pode ter o valor modificado pelo próprio hardware.

Volatile

The screenshot shows the Godbolt compiler explorer interface. The C source code on the left defines a pointer `p` and enters a `while` loop that decrements `*p` until it reaches zero. The assembly output in the center, generated by ARM gcc 11.2.1, shows that the compiler has optimized away the loop body, leaving only the initialization of `p` at address 16777216. The detailed compiler flags on the right specify the target architecture as `-mcpu=cortex-m4`.

```
#include <stdint.h>
#define REGADDR 0x01000000

uint32_t *p = (uint32_t *) REGADDR

int main(void)
{
    while(*p == 0)
    {
    }
}
```

```
main:
2       ldr    r3, .L7
3       ldr    r3, [r3]
4       ldr    r3, [r3]
5       cbnz   r3, .L5
6   .L4:
7       b      .L4
8   .L5:
9       movs   r0, #0
10      bx     lr
11   .L7:
12      .word   .LANCHOR0
13  p:
14      .word   16777216
```

Detailed Compiler Flags ARM

```
1 -mcpu=cortex-m4
2 -O2
```

This screenshot shows the same Godbolt compiler explorer interface, but with the pointer `p` declared as `volatile` in the C source code. The assembly output in the center now includes the loop body, which repeatedly loads the value from `*p`, compares it to zero, and branches back to the start of the loop if it is not zero. The detailed compiler flags on the right remain the same.

```
#include <stdint.h>
#define REGADDR 0x01000000

volatile uint32_t *p = (uint32_t *) REGADDR

int main(void)
{
    while(*p == 0)
    {
    }
}
```

```
main:
2       ldr    r3, .L6
3       ldr    r2, [r3]
4   .L2:
5       ldr    r3, [r2]
6       cmp    r3, #0
7       beq    .L2
8       movs   r0, #0
9       bx     lr
10   .L6:
11      .word   .LANCHOR0
12  p:
13      .word   16777216
```

Detailed Compiler Flags ARM

```
1 -mcpu=cortex-m4
2 -O2
```

Qualificadores e ponteiros

Usar adequadamente o qualificador `const` com ponteiros é, frequentemente, uma boa prática:

```
void lcd_write(const uint8_t *data)
{
    // o dado apontado deve ser constante,
    // a linha abaixo gera um erro de compilacao
    data[0] = 1; // error: assignment of read-only location
}

void lcd_write(uint8_t *const data)
{
    // o ponteiro dever ser constante,
    // a linha abaixo gera um erro de compilacao
    data++; // error: increment of read-only parameter
}

void lcd_write(const uint8_t *const data)
{
    // o ponteiro dever ser constante,
    // assim como o dado apontado por ele !
}
```

Estruturas

- ▶ Ajudam a organizar os dados, evitando variáveis espalhadas.
- ▶ Melhoram a visualização e entendimento do código (legibilidade e manutenção).
- ▶ Reduzem complexidade, se bem usadas.
- ▶ `typedef` pode ajudar !

```
struct coord_s
{
    uint32_t x;
    uint32_t y;
};

struct rect_s
{
    struct coord_s c1;
    struct coord_s c2;
};

struct rect_s rect = { 0 };
void func(struct rect_s *rect);
```

```
typedef struct coord_s
{
    uint32_t x;
    uint32_t y;
} coord_t;

typedef struct rect_s
{
    coord_t c1;
    coord_t c2;
} rect_t;

rect_t rect = { 0 };
void func(rect_t *rect);
```

Enumerações

- ▶ Permitem organizar definições relacionadas.
- ▶ Pode ajudar na detecção de erros (valores inválidos).
- ▶ Reduzem complexidade, melhoram a legibilidade.
- ▶ Obedecem regras de escopo, algo que não é possível com defines.

```
#define RTC_WEEKDAY_SUN 0
#define RTC_WEEKDAY_MON 1
#define RTC_WEEKDAY_TUE 2
#define RTC_WEEKDAY_WED 3
#define RTC_WEEKDAY_THU 4
#define RTC_WEEKDAY_FRI 5
#define RTC_WEEKDAY_SAT 6

void rtc_wday_set(uint8_t wday)
{
}
```

```
typedef enum rtc_wday_e
{
    RTC_WEEKDAY_SUN = 0,
    RTC_WEEKDAY_MON = 1,
    RTC_WEEKDAY_TUE = 2,
    RTC_WEEKDAY_WED = 3,
    RTC_WEEKDAY_THU = 4,
    RTC_WEEKDAY_FRI = 5,
    RTC_WEEKDAY_SAT = 6,
} rtc_wday_t;

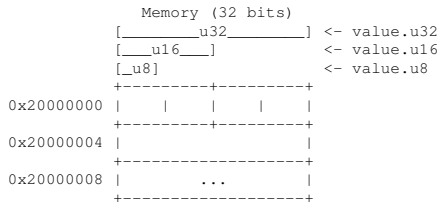
void rtc_wday_set(rtc_wday_t wday)
{
}
```

Uniãos

- ▶ Enquanto as estruturas dispõem sequencialmente os seus membros na memória, as uniões os armazenam na mesma posição.
- ▶ Isso permite “visualizar” a mesma área de memória com diferentes lentes.
- ▶ Em geral, muito útil em generalizações, evitando duplicações de memória.

```
typedef union kved_value_u
{
    uint8_t u8;
    uint16_t u16;
    uint32_t u32;
} kved_value_t;

typedef struct kved_data_s
{
    kved_value_t value;
    bool updated;
} kved_data_t;
```



Exemplo completo (1/2)

```
#include <stdint.h>
#include <stdio.h>

typedef enum obj_type_e
{
    OBJ_TYPE_RECT = 0,
    OBJ_TYPE_CIRCLE,
} obj_type_t;

typedef struct coord_s
{
    uint32_t x;
    uint32_t y;
} coord_t;

typedef struct rect_s
{
    coord_t c1;
    coord_t c2;
} rect_t;
```

```
typedef struct circle_s
{
    coord_t c;
    uint32_t radius;
} circle_t;

typedef union objs_u
{
    circle_t circle;
    rect_t rect;
} objs_t;

typedef struct obj_s
{
    obj_type_t type;
    objs_t elem;
} obj_t;
```

Exemplo completo (2/2)

```
void obj_print(obj_t *obj)
{
    if(obj->type == OBJ_TYPE_RECT)
    {
        printf("RECT: %u,%u,%u,%u\n",
            obj->elem.rect.c1.x,
            obj->elem.rect.c1.y,
            obj->elem.rect.c2.x,
            obj->elem.rect.c2.y);
    }
    else if(obj->type == OBJ_TYPE_CIRCLE)
    {
        printf("CIRCLE: %u,%u,%u\n",
            obj->elem.circle.c.x,
            obj->elem.circle.c.y,
            obj->elem.circle.radius);
    }
}
```

```
int main(void)
{
    obj_t obj1 =
    {
        .type = OBJ_TYPE_RECT,
        .elem.rect.c1 = { 0, 0},
        .elem.rect.c2 = {10,10}};

    obj_t obj2 =
    {
        .type = OBJ_TYPE_CIRCLE,
        .elem.circle.c = { 0,0 },
        .elem.circle.radius = 10};

    obj_print(&obj1);
    obj_print(&obj2);

    return 0;
}
```


Arquivos de código fonte (modelo)

```
// inclusoes da linguagem C (<>)
// inclusoes do projeto (")
// defines internos
// declaracao de enumeracoes
// declaracao tipos de dados internas
// (estruturas, unioes, typedefs)
// declaracao de constante internas (const)
// declaracao de variaveis internas (static)
// definicao de prototipos de funcoes internas
// (static)
// declaracao de funcoes internas (static)
// declaracao das funcoes externas (.h)
```

- ▶ Externe via funções o acesso a seus dados internos (encapsulamento)
- ▶ Dê escopo de arquivo para as suas funções e variáveis com `static` !
- ▶ Salve RAM colocando como `const` o que for realmente constante.

Arquivos de códigos fonte (Exemplo)

```
#include <stdint.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include "demo.h"

typedef enum accel_axis_e
{
    ACCEL_AXIS_X = 0,
    ACCEL_AXIS_Y,
    ACCEL_AXIS_Z,
} accel_axis_t;

static bool started = false;

static void accel_drv_init(void)
{
}

void accel_read(accel_data_t *data)
{
}

void accel_init(void)
{
    if(!started)
    {
        accel_drv_init();
        started = true;
    }
}
```