RELATÓRIO TÉCNICO: PROGRAMAS DE SISTEMAS OPERACIONAIS EMBARCADOS

Disciplina: Sistemas Operacionais Embarcados
Aluno: Fábio Braz
Data: Novembro de 2025
Ambiente: Ubuntu WSL2 no Windows, Visual Studio Code
Repositório //github.com/FBR4Z/trabalho_sis_op_emb.git

SUMÁRIO

---

1. INTRODUÇÃO

Este relatório documenta a implementação e execução de 20 programas didáticos que exploram conceitos fundamentais de sistemas operacionais embarcados, incluindo gerenciamento de processos, threads, comunicação entre processos (IPC), sincronização e sistemas operacionais de tempo real (RTOS). Os programas foram desenvolvidos em C e executados em ambiente Linux (Ubuntu via WSL2).

1.1 Objetivos

- Compreender mecanismos de criação e gerenciamento de processos
- Implementar técnicas de comunicação inter-processos (IPC)
- Aplicar mecanismos de sincronização (semáforos, mutex)
- Estudar escalonamento de processos e threads
- Desenvolver aplicações com FreeRTOS

---

2. AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO

2.1 Sistema Operacional

- **SO Host:** Windows 11
- **SO Virtualizado:** Ubuntu 22.04 LTS via WSL2
- **IDE:** Visual Studio Code com Remote WSL

2.2 Ferramentas e Bibliotecas

- **Compilador:** GCC 11.4.0
- **Bibliotecas POSIX:** pthread, semaphore, mqueue, shm
- **RTOS:** FreeRTOS (clonado de https://github.com/FreeRTOS/FreeRTOS.git)
- **Ferramentas de análise:** ps, top, htop

2.3 Configuração Inicial

```
# Instalação de dependências
sudo apt update
sudo apt install build-essential gdb git

# Estrutura de diretórios
mkdir -p ~/trabalho_sis_op_emb_fabiobraz
cd ~/trabalho_sis_op_emb_fabiobraz

# Download do FreeRTOS
git clone https://github.com/FreeRTOS/FreeRTOS.git
```

---

3. PROGRAMAS DESENVOLVIDOS

PROGRAMA 01 - Criação de Processos com fork()

Arquivo: `01_fork_example.c`
Página de Referência: Aula 2 - Laboratório, pág. 5

Objetivo: Demonstrar a criação de processos em Linux utilizando a system call `fork()` e comunicação básica entre processos pai e filho.

Conceitos Abordados: - System call `fork()` - Identificação de processos (PID) - Diferenciação entre processo pai e filho - Duplicação de espaço de endereçamento

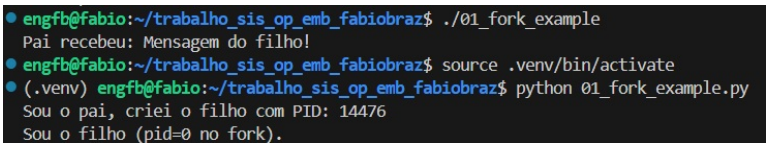
Código Principal:

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

int main() {
    int fd[2];
    char buffer[50];

    pipe(fd);  // Cria pipe para comunicação

    if (fork() == 0) {
        // PROCESSO FILHO
        close(fd[0]);  // Fecha leitura
        char msg[] = "Mensagem do filho!";
        write(fd[1], msg, strlen(msg)+1);
        close(fd[1]);
    } else {
        // PROCESSO PAI
        close(fd[1]);  // Fecha escrita
        read(fd[0], buffer, sizeof(buffer));
```

```
            printf("Pai recebeu: %s\n", buffer);
            close(fd[0]);
        }
    }
```

Compilação e Execução:

```
gcc 01_fork_example.c -o fork_example
./fork_example
```



alt text

Saída Esperada:

```
Pai recebeu: Mensagem do filho!
```

Análise: O programa demonstra como `fork()` cria uma cópia do processo atual. O valor de retorno diferencia pai (retorna PID do filho) e filho (retorna 0). A comunicação ocorre através de um pipe anônimo.

PROGRAMA 02 - Comunicação entre Processos (Pipe)

Arquivo: `02_pipe_example.c`
Página de Referência: Aula 2 - Laboratório, pág. 6

Objetivo: Implementar comunicação unidirecional entre processos pai e filho através de pipes anônimos.

Conceitos Abordados: - Pipe anônimo (unnamed pipe) - Descritores de arquivo: fd[0] (leitura), fd[1] (escrita) - Comunicação unidirecional - Bloqueio em operações de leitura

Código Principal:

```
int main() {
    int fd[2];
    char buffer[50];

    pipe(fd); // cria o pipe

    if (fork() == 0) {
        close(fd[0]); // fecha leitura
        char msg[] = "Mensagem do filho!";
        write(fd[1], msg, strlen(msg)+1);
        close(fd[1]);
    } else {
        close(fd[1]); // fecha escrita
        read(fd[0], buffer, sizeof(buffer));
        printf("Pai recebeu: %s\n", buffer);
        close(fd[0]);
    }
}
```

Compilação e Execução:

```
gcc 02_pipe_example.c -o pipe_example
./pipe_example
```

```
(.venv) engfb@fabio:~/trabalho_sis_op_emb_fabiobraz$ ./02_pipe_example
Pai recebeu: Mensagem do filho!
(.venv) engfb@fabio:~/trabalho_sis_op_emb_fabiobraz$ python 02_pipe_example.py
Pai recebeu: Mensagem do filho!
```

alt text

Observações Importantes: - Pipes são buffers de tamanho limitado (geralmente 65536 bytes no Linux) - Operação `read()` bloqueia até haver dados disponíveis - É fundamental fechar descritores não utilizados para evitar deadlock

---

PROGRAMA 03 - Sincronização com Semáforos

Arquivo: `03_semaphore_example.c`
Página de Referência: Aula 2 - Laboratório, pág. 8

Objetivo: Demonstrar sincronização entre threads utilizando semáforos POSIX.

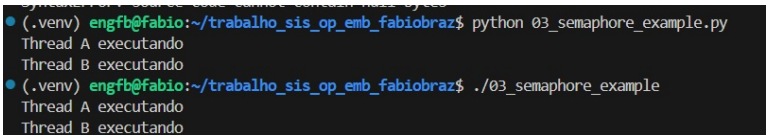
Conceitos Abordados: - Semáforos POSIX (`sem_t`) - Operações `sem_wait()` e `sem_post()` - Seção crítica - Exclusão mútua

Código Principal:

```c
#include <stdio.h>
#include <pthread.h>
#include <semaphore.h>

sem_t sem;

void* tarefa(void* arg) {
    sem_wait(&sem);  // P(sem) - decrementa
    printf("Thread %s executando\n", (char*)arg);
    sem_post(&sem);  // V(sem) - incrementa
    return NULL;
}

int main() {
    pthread_t t1, t2;

    sem_init(&sem, 0, 1);  // semáforo binário (mutex)

    pthread_create(&t1, NULL, tarefa, "A");
    pthread_create(&t2, NULL, tarefa, "B");

    pthread_join(t1, NULL);
    pthread_join(t2, NULL);

    sem_destroy(&sem);
    return 0;
}
```

Compilação e Execução:

```
gcc 03_semaphore_example.c -o semaphore_example -lpthread
./semaphore_example
```



alt text

Saída Esperada:

```
Thread A executando
Thread B executando
```

Análise: O semáforo inicializado com valor 1 funciona como mutex, garantindo que apenas uma thread execute a seção crítica por vez.

PROGRAMA 04 - Tratamento de Sinais (Signal Handling)

Arquivo: `04_signal_example.c`
Página de Referência: Aula 2 - Laboratório, pág. 11

Objetivo: Capturar e tratar sinais do sistema operacional, especificamente SIGINT (Ctrl+C).

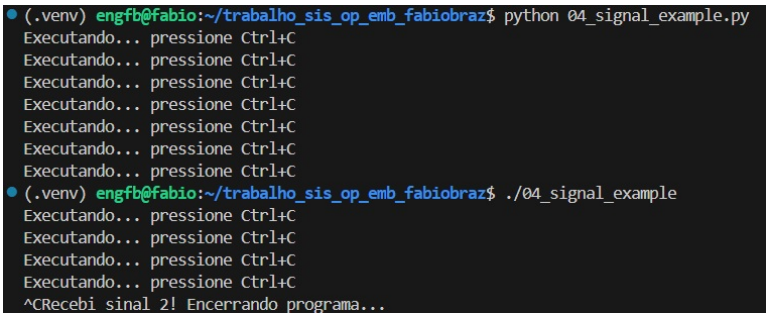
Conceitos Abordados: - Sinais Unix/Linux - Manipuladores de sinais (signal handlers) - SIGINT (interrupção por teclado) - Tratamento assíncrono de eventos

Código Principal:

```c
#include <stdio.h>
#include <signal.h>
#include <unistd.h>
#include <stdlib.h>

void handler(int sig) {
    printf("Recebi sinal %d! Encerrando programa...\n", sig);
    exit(0);
}

int main() {
    signal(SIGINT, handler);  // Captura Ctrl+C

    while (1) {
        printf("Executando... pressione Ctrl+C\n");
        sleep(1);
    }
    return 0;
}
```

Compilação e Execução:

```
gcc 04_signal_example.c -o signal_example
./04_signal_example
```



alt text

Comportamento: - Programa entra em loop infinito - Ao pressionar Ctrl+C, executa o handler customizado - Programa encerra de forma controlada

Sinais Comuns: - SIGINT (2): Interrupção do teclado (Ctrl+C) - SIGTERM (15): Terminação solicitada - SIGKILL (9): Terminação forçada (não pode ser capturado) - SIGSTOP (19): Pausa o processo (não pode ser capturado)

PROGRAMA 05 - Preempção por Fatia de Tempo (Time Slice)

Arquivo: `05_preempt_timeslice.c`
Página de Referência: Aula 2 - Laboratório, pág. 13

Objetivo: Demonstrar o conceito de preempção no escalonador CFS (Completely Fair Scheduler) do Linux.

Conceitos Abordados: - Escalonamento SCHED_OTHER (CFS) - Preempção por tempo - Threads CPU-bound - Variáveis atômicas

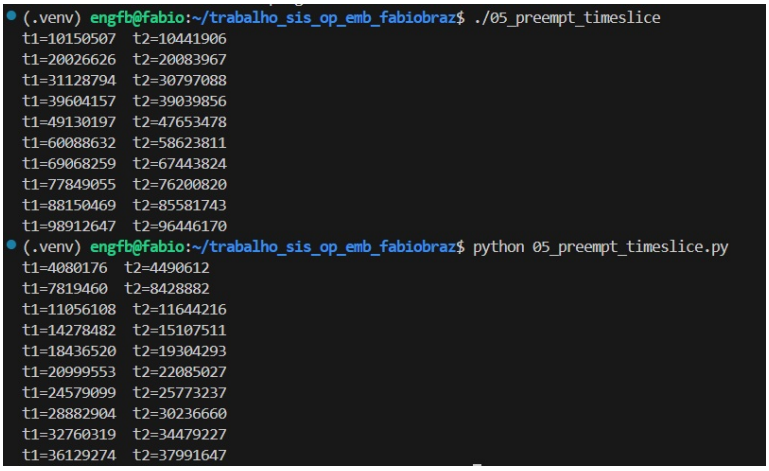
Código Principal:

```c
#include <stdio.h>
#include <pthread.h>
#include <stdatomic.h>
#include <time.h>

atomic_ulong c1 = 0, c2 = 0;

void* t1(void* _) {
    for (;;) {
        c1++;  // Loop infinito incrementando contador
    }
}

void* t2(void* _) {
    for (;;) {
        c2++;  // Loop infinito incrementando contador
    }
}

int main() {
    pthread_t a, b;

    pthread_create(&a, NULL, t1, NULL);
    pthread_create(&b, NULL, t2, NULL);
```

```c
            for (int i = 0; i < 10; i++) {
                struct timespec ts = { .tv_sec = 0, .tv_nsec = 300*1000*1000
};
                nanosleep(&ts, NULL);

                unsigned long x = c1, y = c2;
                printf("t1=%lu  t2=%lu\n", x, y);
            }

            return 0;
        }
```

Compilação e Execução:

```
gcc 05_preempt_timeslice.c -o preempt_timeslice -lpthread
./preempt_timeslice
```



alt text

Saída Observada:

```
t1=10150507  t2=10441906
t1=20026626  t2=20083967
t1=31128794  t2=30797088
t1=39604157  t2=39039856
t1=49130197  t2=47653478
```

Análise: Mesmo sem `sleep()` ou `yield()`, ambas as threads progridem devido à preempção do kernel. O escalonador CFS distribui tempo de CPU de forma justa, mesmo para threads que tentam monopolizar o processador.

PROGRAMA 06 - Tempo Real e Starvation (SCHED_FIFO)

Arquivo: `06_rt_starvation.c`
Página de Referência: Aula 2 - Laboratório, pág. 22

Objetivo: Demonstrar a diferença entre escalonamento de tempo real (SCHED_FIFO) e escalonamento normal (SCHED_OTHER).

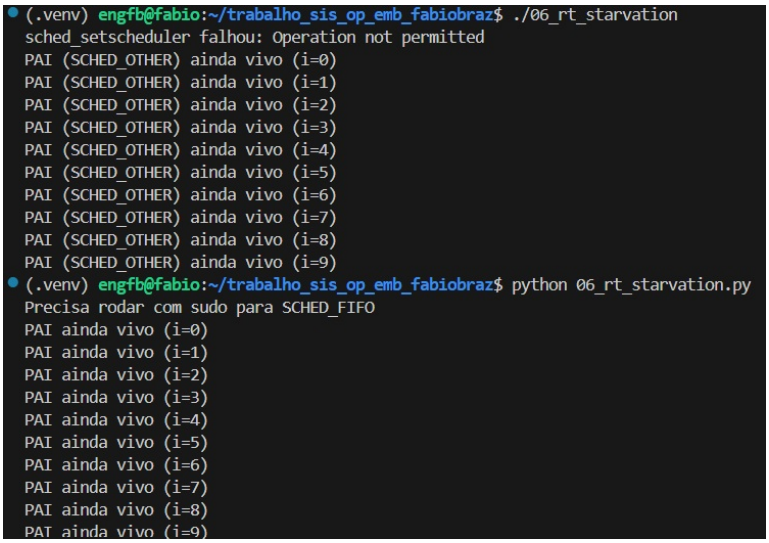
Conceitos Abordados: - Política de escalonamento SCHED_FIFO - Prioridades de tempo real (1-99) - Starvation de processos normais - RT throttling do kernel

Código Principal:

```c
#define _GNU_SOURCE
#include <stdio.h>
#include <unistd.h>
#include <sched.h>
#include <stdlib.h>

int main(void) {
    pid_t pid = fork();

    if (pid == 0) {
        // FILHO: Política de tempo real
        struct sched_param sp = { .sched_priority = 80 };

        if (sched_setscheduler(0, SCHED_FIFO, &sp) != 0) {
            perror("sched_setscheduler falhou");
            exit(1);
        }

        // Busy-loop com mensagens periódicas
        volatile unsigned long long x = 0;
        const unsigned long long N = 80ULL * 1000ULL * 1000ULL;

        for (;;) {
            x++;
            if ((x % N) == 0) {
                printf("FILHO (SCHED_FIFO) rodando\n");
            }
        }
    } else {
        // PAI: Tarefa normal (SCHED_OTHER)
        for (int i = 0; i < 10; i++) {
            struct timespec ts = { .tv_sec = 0, .tv_nsec =
500*1000*1000 };
            nanosleep(&ts, NULL);
            printf("PAI (SCHED_OTHER) ainda vivo (i=%d)\n", i);
        }

        kill(pid, SIGKILL);
        waitpid(pid, NULL, 0);
    }
    return 0;
}
```

Compilação e Execução:

```c
gcc 06_rt_starvation.c -o rt_starvation
sudo taskset -c 0 ./rt_starvation  # Força execução no mesmo core
```



alt text

Observação Importante: Requer privilégios de superusuário (sudo) para elevar processo a SCHED_FIFO.

Comportamento Observado: - Processo filho (SCHED_FIFO) domina a CPU - Processo pai (SCHED_OTHER) raramente consegue executar - Demonstra starvation de processos não-RT

Configuração de RT Throttling:

```
# Desabilitar throttling (cuidado! pode travar o sistema)
sudo sysctl -w kernel.sched_rt_runtime_us=-1

# Restaurar throttling (padrão)
sudo sysctl -w kernel.sched_rt_runtime_us=950000
```

PROGRAMA 07 - Supervisor de Processos

Arquivo: `07_supervisor.c`
Página de Referência: Aula 3, pág. 39

Objetivo: Criar um processo supervisor que monitora estados de processos filhos usando `waitpid()`.

Conceitos Abordados: - System call `waitpid()` - Flags: WUNTRACED, WCONTINUED - Macros de análise de status: WIFEXITED, WIFSIGNALED, WIFSTOPPED, WIFCONTINUED - Monitoramento de eventos de processos

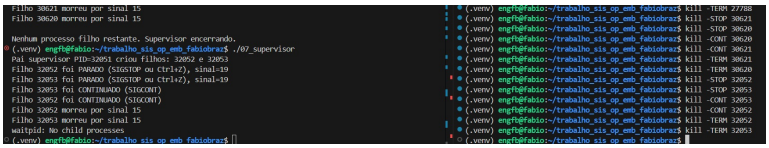
Código Principal:

```
#define _XOPEN_SOURCE 700

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <unistd.h>
#include <signal.h>
#include <sys/wait.h>

int main() {
```

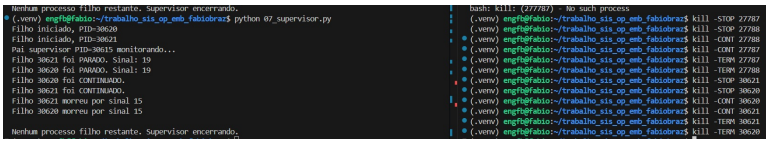
```
    pid_t pid1, pid2;

    // Cria primeiro filho
    pid1 = fork();
    if (pid1 == 0) {
        while (1) {
            pause();  // aguarda sinais
        }
        exit(0);
    }

    // Cria segundo filho
    pid2 = fork();
    if (pid2 == 0) {
        while (1) {
            pause();  // aguarda sinais
        }
        exit(0);
    }

    printf("Pai supervisor PID=%d criou filhos: %d e %d\n",
           getpid(), pid1, pid2);

    // Loop de supervisão
    while (1) {
        int status;
        pid_t w = waitpid(-1, &status, WUNTRACED | WCONTINUED);

        if (w == -1) {
            perror("waitpid");
            exit(1);
        }

        if (WIFEXITED(status)) {
            printf("Filho %d terminou normalmente com código %d\n",
                   w, WEXITSTATUS(status));
        }
        else if (WIFSIGNALED(status)) {
            printf("Filho %d morreu por sinal %d\n", w,
WTERMSIG(status));
        }
        else if (WIFSTOPPED(status)) {
            printf("Filho %d foi PARADO (SIGSTOP), sinal=%d\n",
                   w, WSTOPSIG(status));
        }
        else if (WIFCONTINUED(status)) {
            printf("Filho %d foi CONTINUADO (SIGCONT)\n", w);
        }
    }

    return 0;
}
```

Compilação e Execução:

```
gcc 07_supervisor.c -o supervisor
./supervisor
```



alt text



alt text

Teste em Outro Terminal:

```
# Obter PIDs dos filhos
ps aux | grep supervisor

# Enviar sinais aos filhos
kill -STOP <PID_FILHO>   # Pausa o processo
kill -CONT <PID_FILHO>   # Retoma o processo
kill -TERM <PID_FILHO>   # Encerra o processo
```

Saída Esperada:

```
Filho 32052 foi PARADO (SIGSTOP), sinal=19
Filho 32052 foi CONTINUADO (SIGCONT)
Filho 32052 morreu por sinal 15
```

PROGRAMA 08 - Estados de Processos (R, S, Z, T)

Arquivo: `08_process_states.c`
Página de Referência: Aula 3, pág. 27

Objetivo: Demonstrar os diferentes estados que um processo pode assumir no Linux.

Conceitos Abordados: - Estados de processos: R (Running), S (Sleeping), Z (Zombie), T (Stopped) - Criação de processos zumbis - Envio de sinais SIGSTOP - Análise com `ps` e `top`

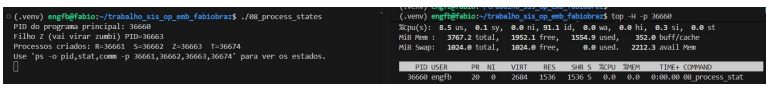
Código Principal:

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <unistd.h>
#include <signal.h>
#include <sys/wait.h>

int main() {
    pid_t pidR, pidS, pidZ, pidT;

    printf("PID do programa principal: %d\n", getpid());

    // 1. Processo em RUNNING (R)
    pidR = fork();
    if (pidR == 0) {
        while (1) {
            // Loop infinito (sempre R ou pronto)
```

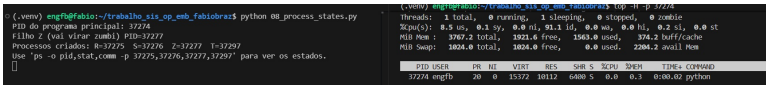
```
        }
        exit(0);
    }

    // 2. Processo em SLEEPING (S)
    pidS = fork();
    if (pidS == 0) {
        while (1) {
            sleep(10);  // estado "S" (esperando)
        }
        exit(0);
    }

    // 3. Processo em ZOMBIE (Z)
    pidZ = fork();
    if (pidZ == 0) {
        printf("Filho Z (vai virar zumbi) PID=%d\n", getpid());
        exit(0);  // termina imediatamente
    } else {
        sleep(1);  // pai NÃO chama wait() → filho fica em Z
    }

    // 4. Processo em STOPPED (T)
    pidT = fork();
    if (pidT == 0) {
        while (1) {
            pause();  // espera por sinais
        }
        exit(0);
    } else {
        sleep(1);
        kill(pidT, SIGSTOP);  // envia SIGSTOP → processo fica em T
    }

    printf("Processos criados: R=%d  S=%d  Z=%d  T=%d\n",
           pidR, pidS, pidZ, pidT);

    printf("Use 'ps -o pid,stat,comm -p %d,%d,%d,%d' para ver os
estados.\n",
           pidR, pidS, pidZ, pidT);

    while (1) {
        sleep(30);
    }

    return 0;
}
```

Compilação e Execução:

```
gcc 08_process_states.c -o process_states
./process_states
```



alt text



alt text

Análise com ps:

```
ps -o pid,stat,comm -p 36661,36662,36663,36674
```

Saída Esperada:

```
  PID STAT COMM
36661 R    process_states  # Running (usando CPU)
36662 S    process_states  # Sleeping (aguardando sleep)
36663 Z    process_states  # Zombie (terminou, não foi coletado)
36674 T    process_states  # Stopped (recebeu SIGSTOP)
```

Estados Detalhados: - **R (Running):** Processo executando ou pronto para executar - **S (Sleeping):** Aguardando evento (I/O, timer, sinal) - **Z (Zombie):** Processo terminou mas ainda não foi coletado pelo pai - **T (Stopped):** Processo pausado por sinal SIGSTOP ou Ctrl+Z

PROGRAMA 09 - Fork e Execve (Multitarefa)

Arquivo: `09_fork_execve.c`
Página de Referência: Aula 4, pág. 11

Objetivo: Demonstrar a substituição de código de processo usando `execve()`.

Conceitos Abordados: - System call `execve()` - Substituição de imagem do processo - Espera de processos filhos com `wait()` - Execução de programas externos

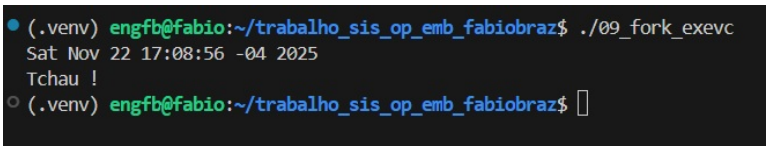
Código Principal:

```c
#include <unistd.h>
#include <sys/types.h>
#include <sys/wait.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

int main(int argc, char *argv[], char *envp[])
{
    int pid;

    pid = fork();  // cria processo filho

    if (pid < 0) {
        perror("Erro: ");
        exit(-1);
    }
    else if (pid > 0) {
        // PROCESSO PAI
        wait(0);  // espera o filho terminar
    }
    else {
        // PROCESSO FILHO
        // substitui o código por outro programa
        execve("/bin/date", argv, envp);

        // se execve retornar, houve erro
        perror("Erro: ");
```

```
    }

    printf("Tchau !\n");
    exit(0);
}
```

Compilação e Execução:

```
gcc 09_fork_execve.c -o fork_execve
./fork_execve
```



alt text

Saída Esperada:

```
Sat Nov 22 17:08:56 -04 2025
Tchau !
```

Análise: 1. Pai cria filho com `fork()` 2. Filho substitui seu código com `execve("/bin/date")` 3. Comando `date` executa e termina 4. Pai imprime “Tchau !” e encerra

Observação: Se `execve()` falhar (arquivo não existe, sem permissão), retorna -1 e o código original continua executando.

PROGRAMA 10 - Threads POSIX

Arquivo: `10_ex_threads.c`
Página de Referência: Aula 4, pág. 30

Objetivo: Criar múltiplas threads POSIX e demonstrar execução concorrente.

Conceitos Abordados: - Biblioteca pthread - Criação de threads com `pthread_create()` - Sincronização com `pthread_join()` - Passagem de argumentos para threads

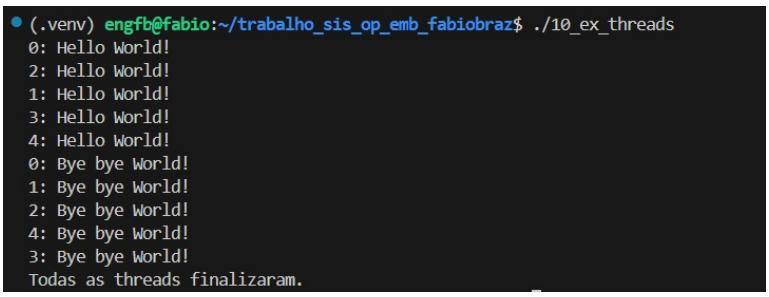
Código Principal:

```
#include <pthread.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <unistd.h>

#define NUM_THREADS 5

void* print_hello(void* arg)
{
    long id = *(long*)arg;

    printf("%ld: Hello World!\n", id);
    sleep(5);
    printf("%ld: Bye bye World!\n", id);

    pthread_exit(NULL);
```

```c
}

int main(void)
{
    pthread_t th[NUM_THREADS];
    long* ids = malloc(sizeof(long) * NUM_THREADS);

    if (!ids) {
        perror("malloc");
        exit(1);
    }

    // Criar threads
    for (long i = 0; i < NUM_THREADS; i++) {
        ids[i] = i;
        int rc = pthread_create(&th[i], NULL, print_hello, &ids[i]);
        if (rc != 0) {
            perror("pthread_create");
            free(ids);
            exit(1);
        }
    }

    // Esperar threads terminarem
    for (int i = 0; i < NUM_THREADS; i++) {
        int rc = pthread_join(th[i], NULL);
        if (rc != 0) {
            perror("pthread_join");
            free(ids);
            exit(1);
        }
    }

    free(ids);
    printf("Todas as threads finalizaram.\n");
    return 0;
}
```

Compilação e Execução:

```
gcc 10_ex_threads.c -o ex_threads -lpthread
./ex_threads
```



alt text

Saída Esperada:

```
0: Hello World!
2: Hello World!
1: Hello World!
3: Hello World!
```

```
4: Hello World!
0: Bye bye World!
1: Bye bye World!
2: Bye bye World!
4: Bye bye World!
3: Bye bye World!
Todas as threads finalizaram.
```

Análise: As threads executam concorrentemente, resultando em ordem de impressão não determinística. O uso de `pthread_join()` garante que o processo principal aguarde todas as threads terminarem antes de encerrar.

PROGRAMA 11 - Função system()

Arquivo: `11_teste_systems.c`
Página de Referência: Aula 4, pág. 48

Objetivo: Demonstrar o uso da função `system()` para executar comandos shell.

Conceitos Abordados: - Função `system()` da stdlib - Execução de comandos shell - Criação implícita de processos filhos - Espera automática do término

Código Principal:

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <sys/types.h>
#include <unistd.h>

int main(void)
{
    printf("PID do Pai: %d\n", getpid());

    // Chama outro programa usando system()
    // Cria um processo FILHO para rodar "./teste"
    // O Pai espera o Filho terminar antes de continuar
    system("./teste");

    printf("\n[PAI] Programa continuou apos a funcao system()\n");

    return 0;
}
```

Compilação e Execução:

```
gcc 11_teste_systems.c -o teste_system
./teste_system
```

Saída Observada:

```
PID do Pai: 38987
PID do processo: 38989
Testando fork()...
Sou o processo PAI! PID: 38989, filho: 38990
Sou o processo FILHO! PID: 38990

[PAI] Programa continuou apos a funcao system()
```

```
(.venv) engfb@fabio:~/trabalho_sis_op_emb_fabiobraz$ ./11_teste_systems
PID do Pai: 38987
PID do processo: 38989
Testando fork()...
Sou o processo PAI! PID: 38989, filho: 38990
Sou o processo FILHO! PID: 38990

[PAI] Programa continuou apos a funcao system()
```

alt text

Análise: - `system()` internamente usa `fork()` + `execve()` + `wait()` - Cria shell intermediário que executa o comando - Menos eficiente que `fork()`+`execve()` direto - Útil para comandos simples e scripts

---

PROGRAMA 12 - FreeRTOS: Tasks Básicas

Arquivo: `main.c` (Exemplo 01 - 3 Tasks)
Página de Referência: Aula 6, pág. 26

Objetivo: Criar três tarefas concorrentes em FreeRTOS com diferentes períodos de execução.

Conceitos Abordados: - Tasks do FreeRTOS - Prioridades de tarefas - Delay não-bloqueante (`vTaskDelay`) - Escalonador cooperativo/preemptivo

Código Principal:

```c
#include <stdio.h>
#include <unistd.h>
#include "FreeRTOS.h"
#include "task.h"

void vTaskA(void *pvParameters) {
    while (1) {
        printf("Task A executando...\n");
        vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(500));
    }
}

void vTaskB(void *pvParameters) {
    while (1) {
        printf("Task B executando...\n");
        vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(1000));
    }
}

void vTaskC(void *pvParameters) {
    while (1) {
        printf("Task C executando...\n");
        vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(1500));
    }
}

int main(void) {
    printf("=== FreeRTOS: Exemplo com 3 Tasks ===\n");

    xTaskCreate(vTaskA, "TaskA", 1024, NULL, 2, NULL);
    xTaskCreate(vTaskB, "TaskB", 1024, NULL, 1, NULL);
    xTaskCreate(vTaskC, "TaskC", 1024, NULL, 1, NULL);
```

```
    vTaskStartScheduler();  // Inicia o escalonador

    for(;;);  // Nunca deve chegar aqui
}
```

Compilação:

```
cd ~/trabalho_sis_op_emb_fabiobraz/LabFreeRTOS/Exemplo01_3Tasks
make
```

Execução:

```
./build/meu_exemplo1_3tasks
```

Estrutura Necessária:

```
trabalho_sis_op_emb_fabiobraz/
├── FreeRTOS/              # Clone do repositório oficial
└── LabFreeRTOS/
    └── Exemplo01_3Tasks/
        ├── main.c
        ├── FreeRTOSConfig.h
        └── Makefile
```

```
engfb@fabio:~/trabalho_sis_op_emb_fabiobraz$ cd Exemplo01_3Tasks/
engfb@fabio:~/trabalho_sis_op_emb_fabiobraz/Exemplo01_3Tasks$ ./build/meu_exemplo1_3tasks
=== FreeRTOS: Exemplo com 3 Tasks ===
Task A executando...
Task B executando...
Task C executando...
Task A executando...
Task A executando...
Task B executando...
Task A executando...
Task C executando...
Task A executando...
Task B executando...
Task A executando...
Task A executando...
Task C executando...
Task B executando...
Task A executando...
```

alt text

Observações: - TaskA tem prioridade 2 (mais alta) - TaskB e TaskC têm prioridade 1 - Tarefas com mesma prioridade executam em round-robin - `vTaskDelay()` libera CPU para outras tarefas

---

PROGRAMA 13 - FreeRTOS: Semáforo Binário

Arquivo: `main.c` (Exemplo 02 - Semáforo)
Página de Referência: Aula 6, pág. 36

Objetivo: Sincronizar duas tarefas usando semáforo binário para comunicação produtor-consumidor.

Conceitos Abordados: - Semáforos binários no FreeRTOS - `xSemaphoreCreateBinary()` - `xSemaphoreGive()` e `xSemaphoreTake()` - Sincronização entre tarefas

Código Principal:

```
#include <stdio.h>
#include "FreeRTOS.h"
#include "task.h"
#include "semphr.h"
```

```c
SemaphoreHandle_t xSemaforo = NULL;

void vTaskProdutora(void *pvParameters)
{
    for (;;)
    {
        printf("[Produtora] Liberando semáforo...\n");
        vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(1000));
        xSemaphoreGive(xSemaforo);  // Sinaliza
    }
}

void vTaskConsumidora(void *pvParameters)
{
    for (;;)
    {
        if (xSemaphoreTake(xSemaforo, portMAX_DELAY) == pdTRUE)
        {
            printf("  [Consumidora] Recebeu sinal!\n");
            vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(500));
        }
    }
}

int main(void)
{
    printf("=== FreeRTOS: Semáforo Binário ===\n");

    xSemaforo = xSemaphoreCreateBinary();

    if (xSemaforo == NULL) {
        printf("Falha ao criar semáforo!\n");
        return -1;
    }

    xTaskCreate(vTaskProdutora, "Produtora", 1024, NULL, 2, NULL);
    xTaskCreate(vTaskConsumidora, "Consumidora", 1024, NULL, 1,
NULL);

    vTaskStartScheduler();

    for (;;);
}
```

```
engfb@fabio:~/trabalho_sis_op_emb_fabiobraz/Exemplo02_semaforo$ ./build/meu_exemplo2_semaforo
=== FreeRTOS: Exemplo 02 - Semáforo Binário ===
[Produtora] Fazendo trabalho e liberando semáforo...
[Produtora] Fazendo trabalho e liberando semáforo...
  [Consumidora] Recebeu sinal! Executando ação...
[Produtora] Fazendo trabalho e liberando semáforo...
  [Consumidora] Recebeu sinal! Executando ação...
[Produtora] Fazendo trabalho e liberando semáforo...
  [Consumidora] Recebeu sinal! Executando ação...
[Produtora] Fazendo trabalho e liberando semáforo...
  [Consumidora] Recebeu sinal! Executando ação...
[Produtora] Fazendo trabalho e liberando semáforo...
  [Consumidora] Recebeu sinal! Executando ação...
```

alt text

Comportamento: - Produtora sinaliza semáforo a cada 1 segundo - Consumidora aguarda sinal (bloqueia se não houver) - Sincronização temporal entre tarefas

---

PROGRAMA 14 - FreeRTOS: Filas (Queues)

Arquivo: `main.c` (Exemplo 03 - Queue)
Página de Referência: Aula 6, pág. 46

Objetivo: Implementar comunicação entre tarefas através de filas (queues).

Conceitos Abordados: - Filas FIFO do FreeRTOS - `xQueueCreate()`, `xQueueSend()`, `xQueueReceive()` - Comunicação inter-tarefas com dados

Código Principal:

```
#include <stdio.h>
#include "FreeRTOS.h"
#include "task.h"
#include "queue.h"

QueueHandle_t xFila = NULL;

void vTaskProdutora(void *pvParameters)
{
    int contador = 0;

    for (;;)
    {
        contador++;
        if (xQueueSend(xFila, &contador, portMAX_DELAY) == pdPASS)
        {
            printf("[Produtora] Enviou valor %d\n", contador);
        }
        vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(1000));
    }
}

void vTaskConsumidora(void *pvParameters)
{
    int recebido;

    for (;;)
    {
        if (xQueueReceive(xFila, &recebido, portMAX_DELAY) ==
pdTRUE)
        {
            printf("  [Consumidora] Recebeu valor %d\n", recebido);
        }
        vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(500));
    }
}

int main(void)
{
    printf("=== FreeRTOS: Comunicação com Fila ===\n");

    xFila = xQueueCreate(5, sizeof(int));  // Fila com 5 elementos

    if (xFila == NULL) {
        printf("Falha ao criar fila!\n");
        return -1;
    }
```

```
            xTaskCreate(vTaskProdutora, "Produtora", 1024, NULL, 2, NULL);
            xTaskCreate(vTaskConsumidora, "Consumidora", 1024, NULL, 1,
NULL);

            vTaskStartScheduler();

            for (;;);
        }
```

```
engfb@fabio:~/trabalho_sis_op_emb_fabiobraz/Exemplo03_Queue$ ./build/meu_exemplo3_queue
=== FreeRTOS: Exemplo 03 - Comunicação com Fila ===
[Produtora] Enviou valor 1 para a fila.
  [Consumidora] Recebeu valor 1 da fila!
[Produtora] Enviou valor 2 para a fila.
  [Consumidora] Recebeu valor 2 da fila!
[Produtora] Enviou valor 3 para a fila.
  [Consumidora] Recebeu valor 3 da fila!
```

alt text

Características: - Fila armazena até 5 inteiros - Comunicação bidirecional possível - Operações thread-safe (seguras para concorrência)

PROGRAMA 15 - FreeRTOS: Mutex

Arquivo: `main.c` (Exemplo 04 - Mutex)
Página de Referência: Aula 6, pág. 51

Objetivo: Proteger recurso compartilhado usando mutex (exclusão mútua).

Conceitos Abordados: - Mutex do FreeRTOS - Inversão de prioridade - Herança de prioridade - Seção crítica

Código Conceitual:

```
        SemaphoreHandle_t xMutex;

        void vTaskCritical(void *pvParameters)
        {
            for (;;)
            {
                if (xSemaphoreTake(xMutex, portMAX_DELAY) == pdTRUE)
                {
                    // Seção crítica: acesso exclusivo ao recurso
                    printf("Task %s na seção crítica\n",
(char*)pvParameters);
                    vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(100));

                    xSemaphoreGive(xMutex);
                }
            }
        }

        int main(void)
        {
            xMutex = xSemaphoreCreateMutex();

            xTaskCreate(vTaskCritical, "Task1", 1024, "A", 2, NULL);
            xTaskCreate(vTaskCritical, "Task2", 1024, "B", 1, NULL);

            vTaskStartScheduler();
```

```
    for (;;);
}
```

```
engfb@fabio:~/trabalho_sis_op_emb_fabiobraz/Exemplo04_Mutex$ ./build/meu_exemplo4_mutex
=== FreeRTOS: Exemplo 04 – Mutex ===
[TaskA] entrou na seção crítica
  [TaskA] imprimindo linha 1
  [TaskA] imprimindo linha 2
  [TaskA] imprimindo linha 3
[TaskA] saindo da seção crítica

[TaskB] entrou na seção crítica
  [TaskB] imprimindo linha 1
  [TaskB] imprimindo linha 2
  [TaskB] imprimindo linha 3
[TaskB] saindo da seção crítica

[TaskC] entrou na seção crítica
  [TaskC] imprimindo linha 1
  [TaskC] imprimindo linha 2
  [TaskC] imprimindo linha 3
[TaskC] saindo da seção crítica
```

alt text

Diferença entre Mutex e Semáforo Binário: - **Mutex:** Só quem pegou pode liberar (ownership) - **Mutex:** Implementa herança de prioridade - **Semáforo:** Qualquer task pode dar give

---

PROGRAMA 16 - FreeRTOS: Software Timers

Arquivo: `main.c` (Exemplo 05 - Timer)
Página de Referência: Aula 6, pág. 55

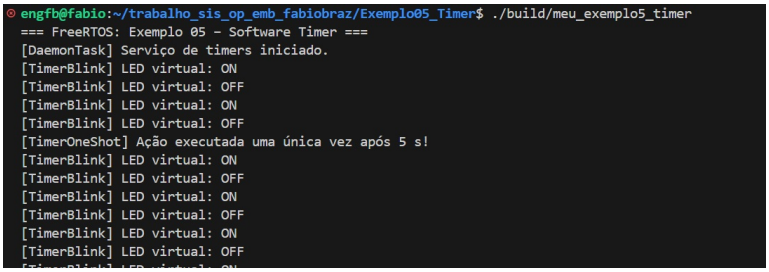
Objetivo: Criar timers periódicos e de disparo único no FreeRTOS.

Conceitos Abordados: - Software Timers - Timers periódicos (`pdTRUE`) - Timers one-shot (`pdFALSE`) - Callbacks de timers

Código Principal:

```c
#include <stdio.h>
#include "FreeRTOS.h"
#include "task.h"
#include "timers.h"

TimerHandle_t xTimerBlink;
TimerHandle_t xTimerOneShot;

void vTimerBlinkCallback(TimerHandle_t xTimer)
{
    static int estado = 0;
    estado = !estado;
    printf("[TimerBlink] LED virtual: %s\n", estado ? "ON" : "OFF");
}

void vTimerOneShotCallback(TimerHandle_t xTimer)
{
    printf("[TimerOneShot] Ação executada uma única vez!\n");
}

int main(void)
{
    printf("=== FreeRTOS: Software Timer ===\n");

    // Timer periódico: 1 segundo
```

```
    xTimerBlink = xTimerCreate("TimerBlink",
                               pdMS_TO_TICKS(1000),
                               pdTRUE,  // Periódico
                               NULL,
                               vTimerBlinkCallback);

    // Timer one-shot: 5 segundos
    xTimerOneShot = xTimerCreate("TimerOneShot",
                                 pdMS_TO_TICKS(5000),
                                 pdFALSE,  // Uma vez só
                                 NULL,
                                 vTimerOneShotCallback);

    if (xTimerBlink == NULL || xTimerOneShot == NULL) {
        printf("Falha ao criar timers!\n");
        return -1;
    }

    xTimerStart(xTimerBlink, 0);
    xTimerStart(xTimerOneShot, 0);

    vTaskStartScheduler();

    for (;;);
}
```



alt text

Comportamento: - Timer periódico executa a cada 1 segundo indefinidamente - Timer one-shot executa apenas uma vez após 5 segundos - Callbacks executam no contexto do Daemon Task

---

PROGRAMA 17 - Pipe POSIX

Arquivo: `mypipe.c`
Página de Referência: Aula 7, pág. 32

Objetivo: Implementar comunicação unidirecional pai→filho através de pipe.

Conceitos Abordados: - Pipes anônimos - Comunicação unidirecional - Fechamento de extremidades não utilizadas

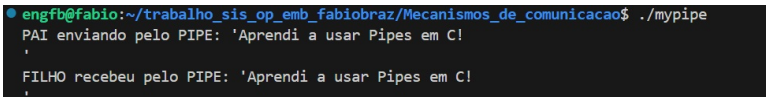
Código Principal:

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <sys/types.h>
#include <unistd.h>
```

```c
#define BUFFER 256

int main(void) {
    int fd[2];
    pid_t pid;

    if (pipe(fd) < 0) {
        perror("Erro ao criar pipe");
        return -1;
    }

    if ((pid = fork()) < 0) {
        perror("Erro ao criar processo");
        exit(1);
    }

    if (pid > 0) {
        // PROCESSO PAI
        close(fd[0]);  // Fecha leitura

        char str[BUFFER] = "Aprendi a usar Pipes em C!\n";
        printf("PAI enviando: '%s'\n", str);
        write(fd[1], str, sizeof(str));

        exit(0);
    }
    else {
        // PROCESSO FILHO
        char str_recebida[BUFFER];

        close(fd[1]);  // Fecha escrita
        read(fd[0], str_recebida, sizeof(str_recebida));

        printf("FILHO recebeu: '%s'\n", str_recebida);

        exit(0);
    }

    return 0;
}
```

Compilação e Execução:

```
gcc mypipe.c -o mypipe
./mypipe
```



alt text

Saída:

```
PAI enviando: 'Aprendi a usar Pipes em C!
'
FILHO recebeu: 'Aprendi a usar Pipes em C!
'
```

PROGRAMA 18 - Filas de Mensagens POSIX

Arquivos: `mq-send.c` e `mq-recv.c`
Página de Referência: Aula 7, pág. 35

Objetivo: Implementar comunicação entre processos independentes usando filas de mensagens.

Conceitos Abordados: - Message Queues POSIX (`mqueue.h`) - `mq_open()`, `mq_send()`, `mq_receive()` - Comunicação assíncrona entre processos - Persistência de filas

Código - Consumidor (mq-recv.c):

```c
#define _POSIX_C_SOURCE 200809L

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <mqueue.h>
#include <sys/stat.h>
#include <fcntl.h>

#define QUEUE "/my_queue"

int main (int argc, char *argv[])
{
    mqd_t queue;
    struct mq_attr attr;
    int msg;

    attr.mq_maxmsg  = 10;
    attr.mq_msgsize = sizeof(msg);
    attr.mq_flags   = 0;

    queue = mq_open(QUEUE, O_RDWR | O_CREAT, 0666, &attr);
    if (queue == (mqd_t)-1) {
        perror("mq_open");
        exit(1);
    }

    printf("=== Consumidor: aguardando mensagens ===\n");

    for (;;) {
        if (mq_receive(queue, (void *)&msg, sizeof(msg), 0) < 0) {
            perror("mq_receive");
            exit(1);
        }
        printf("Consumidor recebeu valor: %d\n", msg);
    }

    return 0;
}
```

Código - Produtor (mq-send.c):

```c
#define _POSIX_C_SOURCE 200809L

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <mqueue.h>
#include <unistd.h>
#include <fcntl.h>
```

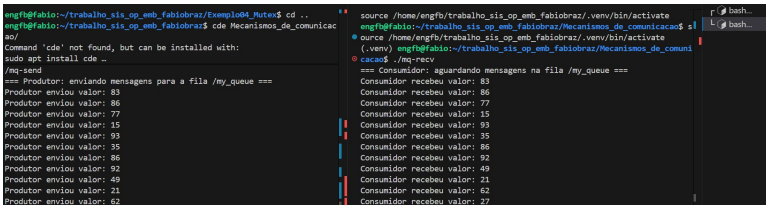
```c
#define QUEUE "/my_queue"

int main (int argc, char *argv[])
{
    mqd_t queue;
    int msg;

    queue = mq_open(QUEUE, O_RDWR);
    if (queue == (mqd_t)-1) {
        perror("mq_open - Execute o consumidor primeiro!");
        exit(1);
    }

    printf("=== Produtor: enviando mensagens ===\n");

    for (;;) {
        msg = random() % 100;

        if (mq_send(queue, (void *)&msg, sizeof(msg), 0) < 0) {
            perror("mq_send");
            exit(1);
        }

        printf("Produtor enviou valor: %d\n", msg);
        sleep(1);
    }

    return 0;
}
```

Compilação:

```
gcc mq-recv.c -o mq-recv -lrt
gcc mq-send.c -o mq-send -lrt
```

Execução (dois terminais):

```
# Terminal 1
./mq-recv

# Terminal 2
./mq-send
```



alt text

Vantagens sobre Pipes: - Processos não precisam ter relação de parentesco - Mensagens têm prioridades - Não-bloqueante (opcional) - Persiste até `mq_unlink()`

PROGRAMA 19 - Memória Compartilhada POSIX

Arquivos: `shmem_write.c` e `shmem_read.c`
Página de Referência: Aula 7, pág. 45

Objetivo: Compartilhar região de memória entre processos independentes.

Conceitos Abordados: - Shared Memory POSIX - `shm_open()`, `mmap()`, `ftruncate()` - Comunicação de alta velocidade - Sincronização necessária (não fornecida)

Código - Escritor (shmem_write.c):

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <fcntl.h>
#include <sys/stat.h>
#include <sys/mman.h>
#include <unistd.h>

int main(void) {
    int fd, value, *ptr;

    // Criar/abrir memória compartilhada
    fd = shm_open("/sharedmem", O_RDWR | O_CREAT, S_IRUSR |
S_IWUSR);
    if (fd == -1) {
        perror("shm_open");
        exit(1);
    }

    // Definir tamanho
    if (ftruncate(fd, sizeof(int)) == -1) {
        perror("ftruncate");
        exit(1);
    }

    // Mapear memória
    ptr = mmap(NULL, sizeof(int), PROT_READ | PROT_WRITE,
               MAP_SHARED, fd, 0);
    if (ptr == MAP_FAILED) {
        perror("mmap");
        exit(1);
    }

    printf("=== ESCRITOR ===\n");
    printf("PID: %d\n\n", getpid());

    // Loop: escrever valores
    for (;;) {
        value = random() % 1000;
        *ptr = value;  // ESCREVE na memória compartilhada

        printf("[ESCRITOR PID %d] ESCREVEU: %d\n", getpid(), value);
        sleep(2);
    }

    return 0;
}
```

Código - Leitor (shmem_read.c):

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

```c
#include <sys/stat.h>
#include <sys/mman.h>
#include <unistd.h>

int main(void) {
    int fd, value, *ptr;

    // Abrir memória compartilhada existente
    fd = shm_open("/sharedmem", O_RDWR, S_IRUSR | S_IWUSR);
    if (fd == -1) {
        perror("shm_open - Execute o ESCRITOR primeiro!");
        exit(1);
    }

    // Mapear memória
    ptr = mmap(NULL, sizeof(int), PROT_READ | PROT_WRITE,
               MAP_SHARED, fd, 0);
    if (ptr == MAP_FAILED) {
        perror("mmap");
        exit(1);
    }

    printf("=== LEITOR ===\n");
    printf("PID: %d\n\n", getpid());

    // Loop: ler valores
    for (;;) {
        value = *ptr;  // LÊ da memória compartilhada

        printf("[LEITOR PID %d] LEU: %d\n", getpid(), value);
        sleep(1);
    }

    return 0;
}
```

Compilação:

```
gcc shmem_write.c -o shmem_write -lrt
gcc shmem_read.c -o shmem_read -lrt
```

Execução (dois terminais):

```
# Terminal 1
./shmem_write

# Terminal 2
./shmem_read
```

alt text

Problema Encontrado e Solução:

No código original (`shmem.c`), as seções de escrita estavam comentadas, resultando em leitura constante de zero:

```
// Código original (com bug):
for (;;) {
    // value = random() % 1000;   // Comentado
    // *ptr = value;              // Comentado
    value = *ptr;
    printf("[PID %d] READ value = %d\n", getpid(), value);
    sleep(1);
}
```

Solução: Separar em dois programas distintos (escritor e leitor) conforme mostrado acima.

Observações: - Memória compartilhada é o IPC mais rápido - **Não fornece sincronização** (usar semáforos se necessário) - Persistente até reboot ou `shm_unlink()`

PROGRAMA 20 - Semáforos e Mutex POSIX

Referência: Aula 8, pág. 48 e 54

Objetivo: Demonstrar coordenação entre tarefas usando semáforos e mutex POSIX.

Conceitos Abordados: - Semáforos nomeados e não-nomeados - Mutex POSIX - Diferenças entre semáforos e mutex - Proteção de seções críticas

Exemplo - Semáforo:

```
#include <stdio.h>
#include <pthread.h>
#include <semaphore.h>

sem_t sem;
int contador_global = 0;

void* incrementar(void* arg) {
    for (int i = 0; i < 100000; i++) {
        sem_wait(&sem);
        contador_global++;
        sem_post(&sem);
    }
    return NULL;
}

int main() {
    pthread_t t1, t2;

    sem_init(&sem, 0, 1);

    pthread_create(&t1, NULL, incrementar, NULL);
    pthread_create(&t2, NULL, incrementar, NULL);

    pthread_join(t1, NULL);
    pthread_join(t2, NULL);

    printf("Contador final: %d (esperado: 200000)\n",
```

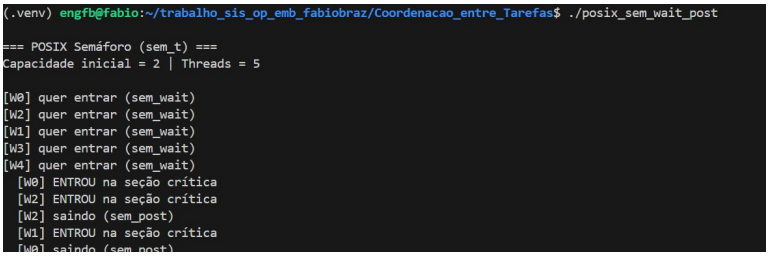
```
contador_global);

            sem_destroy(&sem);
            return 0;
        }
```

Exemplo - Mutex:

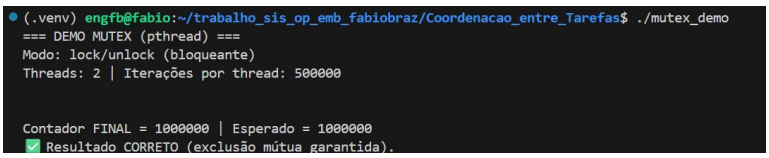
```
        #include <stdio.h>
        #include <pthread.h>

        pthread_mutex_t mutex = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;
        int contador_global = 0;

        void* incrementar(void* arg) {
            for (int i = 0; i < 100000; i++) {
                pthread_mutex_lock(&mutex);
                contador_global++;
                pthread_mutex_unlock(&mutex);
            }
            return NULL;
        }

        int main() {
            pthread_t t1, t2;

            pthread_create(&t1, NULL, incrementar, NULL);
            pthread_create(&t2, NULL, incrementar, NULL);

            pthread_join(t1, NULL);
            pthread_join(t2, NULL);

            printf("Contador final: %d (esperado: 200000)\n",
contador_global);

            pthread_mutex_destroy(&mutex);
            return 0;
        }
```

Compilação:

```
        gcc posix_sem.c -o posix_sem -lpthread
        gcc mutex_demo.c -o mutex_demo -lpthread
```



alt text



alt text

Diferenças:

Característica	Semáforo	Mutex
Propriedade	Não tem dono	Tem dono (quem travou)
Sinalização	Qualquer thread pode dar post	Só quem travou pode destravar
Contador	Pode ter valor > 1	Sempre binário (0 ou 1)
Uso típico	Sinalização entre threads	Proteção de seção crítica

---

4. DESAFIOS E SOLUÇÕES

4.1 Configuração do Ambiente WSL

Desafio: Configurar ambiente de desenvolvimento C no WSL2 integrado ao VS Code.

Solução:

```
# Instalação de ferramentas essenciais
sudo apt update
sudo apt install build-essential gdb git

# Extensões VS Code necessárias:
# - Remote - WSL (ms-vscode-remote.remote-wsl)
# - C/C++ (ms-vscode.cpptools)
```

4.2 Compilação do FreeRTOS

Desafio: Estrutura de diretórios e dependências do FreeRTOS.

Solução:

```
# Estrutura correta:
trabalho_sis_op_emb_fabiobraz/
├── FreeRTOS/              # Clone do GitHub
│   └── FreeRTOS/
│       └── Source/
└── LabFreeRTOS/
    └── Exemplo01_3Tasks/
        ├── main.c
        ├── FreeRTOSConfig.h
        └── Makefile

# Makefile deve apontar para ../FreeRTOS/FreeRTOS
```

4.3 Permissões para SCHED_FIFO

Desafio: Erro “Operation not permitted” ao tentar elevar prioridade para tempo real.

Solução:

```
# Executar com sudo:
sudo ./rt_starvation

# Ou configurar capabilities:
sudo setcap cap_sys_nice=ep ./rt_starvation
```

4.4 Memória Compartilhada (shmem.c)

Desafio: Programa original sempre lia valor zero.

Causa Raiz: Seções de escrita estavam comentadas no código original.

Solução: Criar dois programas separados: - `shmem_write.c`: Escreve valores aleatórios - `shmem_read.c`: Lê valores escritos

4.5 Filas de Mensagens

Desafio: "No such file or directory" ao executar `mq-send` antes de `mq-recv`.

Solução: Sempre executar o consumidor (`mq-recv`) primeiro, pois ele cria a fila com `O_CREAT`.

4.6 Linking de Bibliotecas

Desafio: Undefined references em tempo de link.

Solução:

```
# Threads POSIX
gcc programa.c -o programa -lpthread

# Message Queues e Shared Memory
gcc programa.c -o programa -lrt

# Semáforos (geralmente incluído em -lpthread)
gcc programa.c -o programa -lpthread
```

4.7 Acesso a Arquivos no WSL

Desafio: Transferir arquivos entre Windows e WSL.

Solução:

```
# Do Windows, acessar WSL:
\\wsl$\Ubuntu\home\engfb\trabalho_sis_op_emb_fabiobraz

# Do WSL, acessar Windows:
/mnt/c/Users/Fabio/Documents/
```

---

5. CONCLUSÃO

Este trabalho proporcionou experiência prática com conceitos fundamentais de sistemas operacionais, abrangendo desde mecanismos básicos de criação de processos até implementações de sistemas de tempo real.

5.1 Principais Aprendizados

1. **Gerenciamento de Processos:**
   - Criação e controle de processos com `fork()`, `execve()` e `wait()`
   - Estados de processos e transições (R, S, Z, T)
   - Hierarquia de processos e monitoramento
2. **Comunicação Inter-Processos (IPC):**
   - Pipes (comunicação simples e rápida)
   - Message Queues (comunicação estruturada)
   - Shared Memory (comunicação de alta velocidade)
3. **Sincronização:**
   - Semáforos (sinalização e contagem)
   - Mutex (exclusão mútua)
   - Diferenças e casos de uso apropriados
4. **Concorrência:**
   - Threads POSIX (paralelismo leve)
   - Preempção e escalonamento
   - Políticas SCHED_OTHER vs SCHED_FIFO
5. **Sistemas de Tempo Real:**
   - FreeRTOS como RTOS educacional
   - Tasks, semáforos, filas e timers
   - Escalonamento preemptivo baseado em prioridades

5.2 Observações sobre o Ambiente de Desenvolvimento

O uso do WSL2 mostrou-se adequado para o desenvolvimento, oferecendo: - Compatibilidade total com ferramentas POSIX - Integração com VS Code através da extensão Remote WSL - Performance aceitável para aplicações didáticas

Limitações observadas: - Necessidade de `sudo` para operações de tempo real - Overhead da virtualização em testes de performance - Complexidade na transferência de arquivos entre Windows e Linux

5.3 Aplicabilidade dos Conceitos

Os programas desenvolvidos formam uma base sólida para: - Desenvolvimento de sistemas embarcados - Programação de aplicações multithreaded - Design de sistemas de controle em tempo real - Compreensão de internals do Linux

5.4 Trabalhos Futuros

Extensões possíveis deste estudo: - Implementação de deadlock detection e recovery - Análise de performance com ferramentas de profiling - Port dos exemplos para microcontroladores reais (ESP32, STM32) - Estudo de escalonadores alternativos (SCHED_DEADLINE)

---

6. REFERÊNCIAS

6.1 Materiais do Curso

- Aulas 2, 3, 4, 6, 7 e 8 da disciplina Sistemas Operacionais Embarcados
- Laboratórios práticos disponíveis em: https://github.com/fscard/Sistemas-Operacionais-Embarcados

6.2 Documentação Técnica

1. **POSIX Thread Programming**
   Lawrence Livermore National Laboratory
   https://hpc-tutorials.llnl.gov/posix/

2. **The Linux Programming Interface**
   Michael Kerrisk, 2010
   No Starch Press

3. **FreeRTOS Documentation**
   https://www.freertos.org/Documentation/RTOS_book.html

4. **Linux Kernel Documentation - Scheduler**
   https://docs.kernel.org/scheduler/index.html

6.3 Man Pages Consultadas

```
man 2 fork      # Criação de processos
man 2 pipe      # Pipes anônimos
man 3 pthread   # POSIX threads
man 7 sem_overview  # Semáforos POSIX
man 7 mq_overview   # Message queues
man 7 shm_overview  # Shared memory
man 2 sched_setscheduler  # Políticas de escalonamento
```

6.4 Ferramentas Utilizadas

- **GCC 11.4.0** - Compilador C/C++
- **GDB** - GNU Debugger
- **Visual Studio Code 1.85** - IDE
- **WSL2 (Ubuntu 22.04)** - Ambiente Linux no Windows
- **Git 2.34** - Controle de versão

APÊNDICE A - Comandos Úteis

Análise de Processos

```
# Ver todos os processos
ps aux

# Ver estados específicos
ps -eo pid,stat,comm

# Monitoramento em tempo real
top -H -p <PID>

# Árvore de processos
pstree -p
```

```
# Ver threads de um processo
ps -T -p <PID>
```

Análise de IPC

```
# Listar message queues
ls -l /dev/mqueue/

# Remover message queue
rm /dev/mqueue/my_queue

# Listar shared memory
ls -l /dev/shm/

# Ver semáforos
ipcs -s
```

Compilação e Debug

```
# Compilação com símbolos de debug
gcc -g programa.c -o programa

# Debug com GDB
gdb ./programa
(gdb) break main
(gdb) run
(gdb) step
(gdb) print variavel

# Verificar dependências
ldd ./programa
```

APÊNDICE B - Troubleshooting Comum

Problema: “command not found” ao executar programa

Solução:

```
# Verificar permissão de execução
ls -l programa
chmod +x programa

# Executar com caminho relativo
./programa
```

Problema: Processo zumbi não desaparece

Solução:

```
# Matar processo pai (força coleta de filhos)
kill -9 <PID_DO_PAI>

# Verificar zumbis
ps aux | grep Z
```

Problema: “Cannot allocate memory” em shared memory

Solução:

```
# Limpar shared memory órfã
rm /dev/shm/*

# Aumentar limite (se necessário)
sudo sysctl -w kernel.shmmax=268435456
```

Problema: FreeRTOS não compila

Solução:

```
# Verificar estrutura de diretórios
ls -la ../FreeRTOS/FreeRTOS/Source/

# Limpar build e recompilar
make clean
make
```

Fim do Relatório

Data de Conclusão: Novembro de 2025
Total de Programas Implementados: 20