

Sistemas de Tempo-Real

Aula 2

Modelos computacionais

**Modelos de tarefas com restrições temporais explícitas,
implementação
Controlo lógico e temporal (por eventos -ET e por tempo -TT)**

Adaptado dos slides desenvolvidos pelo Prof. Doutor Luís Almeida para a disciplina “Sistemas de Tempo-Real”

Aula anterior (1)

- Relembrando ...
 - Noção de **tempo real** e de **sistema de tempo real**
 - Antagonismo **tempo real** vs **best effort**
 - Objetivo do estudo dos STR – obter **garantias** de **comportamento temporal adequado**
 - Aspectos a considerar: **tempo de execução**, de **resposta**, e **regularidade** de eventos periódicos
 - Requisitos dos STR: **funcionais**, **temporais** e de **dependabilidade**
 - Noção de **base de dados de tempo real**
 - Restrições **soft**, **firm** e **hard**, e **hard real time** vs **soft real time**
 - Importância de ter em conta o **cenário de pior caso**

Modelos computacionais

Modelo transformacional

Segundo o qual um programa inicia e termina, transformando dados de entrada em resultados ou dados de saída.

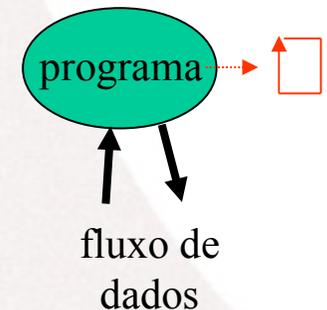


Modelo reativo

Segundo o qual um programa pode executar indefinidamente uma sequência de interações, por exemplo operando sobre um fluxo de dados.

Modelo de tempo-real

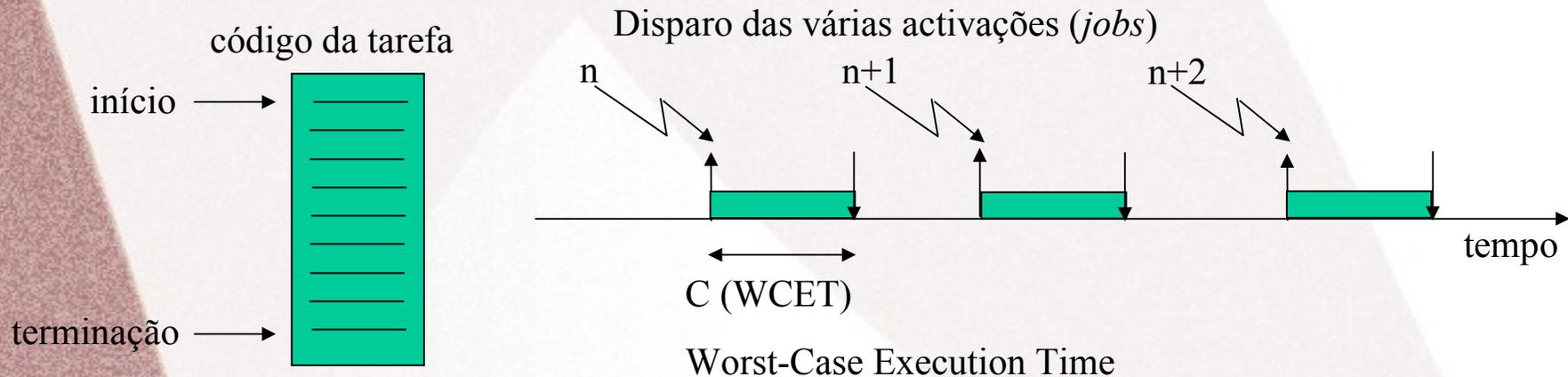
Modelo reativo em que o programa tem de se manter sincronizado com o fluxo de dados, o qual impõe restrições temporais à execução do programa.



Modelo de tempo-real

Definição de tarefa (processo, atividade)

Sequência de ativações (instâncias ou *jobs*), cada uma composta por um conjunto de instruções que, na ausência de outras atividades, é executada pelo CPU sem interrupção.



Modelo de tempo-real

Quanto à periodicidade as tarefas podem ser

- **periódicas**

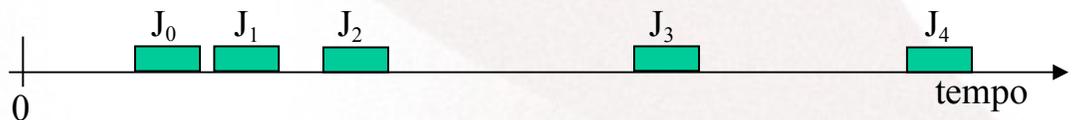
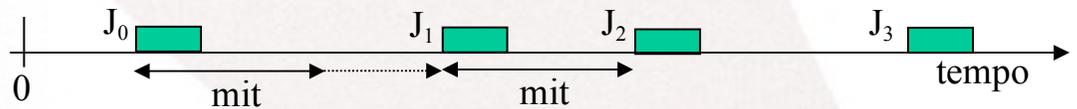
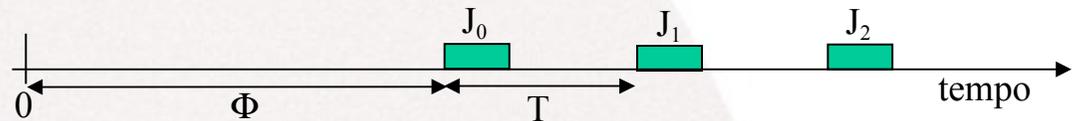
instância n ativada em $a_n = n * T + \Phi$

- **esporádicas**

tempo mínimo entre ativações consecutivas (*mit*)

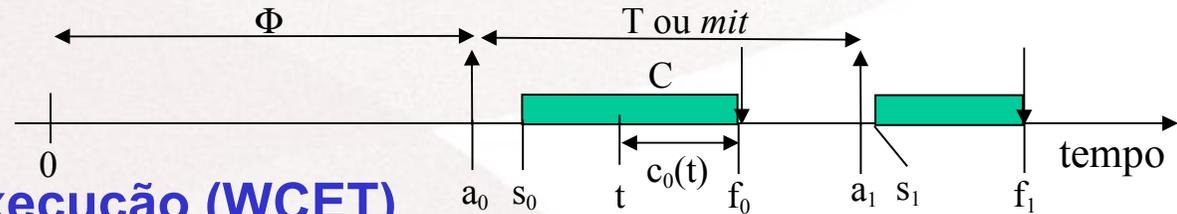
- **aperiódicas**

só se caracterizam de forma probabilística



Modelo de tempo-real

Caracterização das tarefas



- **C** – tempo máximo de execução (WCET)
- **T** – período (periódica)
- Φ – fase relativa = instante da 1ª ativação (periódica)
- **mit** – *minimum interarrival time* (esporádica)
- a_n – instante de ativação da n^a instância
- s_n – instante de início de execução da n^a instância
- f_n – instante de terminação da n^a instância
- $c_n(t)$ – tempo máximo de execução residual da n^a instância no instante t

Modelo de tempo-real

Os requisitos das tarefas podem ser:

- **Temporais** – limites temporais aos **instantes de terminação** ou de geração de determinados eventos de saída.
- **Precedência** – estabelecem uma determinada **ordem de execução** entre tarefas.
- **Uso de recursos** – necessidade de utilização de **recursos partilhados** (e.g. portos de comunicação, um *buffer* em memória partilhada, variáveis globais, periféricos do sistema). Pode implicar uso de **operações atómicas** (cuja sequência não pode ser interrompida)

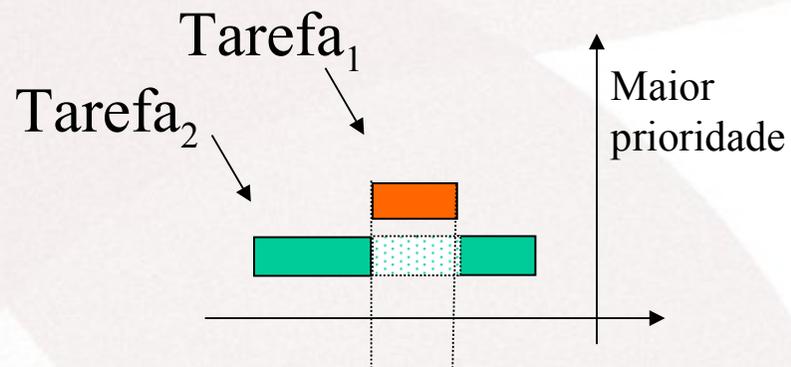
Modelo de tempo-real

Preempção

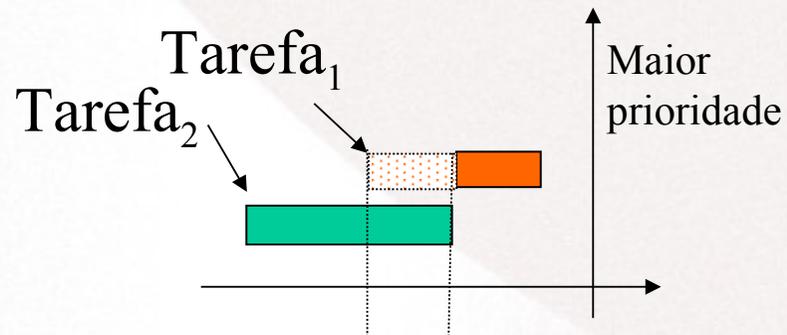
- Quando uma tarefa pode ser **interrompida temporariamente** para execução de outra **mais prioritária**, diz-se que admite **preempção**.
- Quando um sistema utiliza a propriedade de preempção das tarefas que executa diz-se **preemptivo**.
- Um conjunto de tarefas diz-se admitir **preempção total** quando todas as tarefas admitem preempção em qualquer ponto da sua execução (tarefas independentes)
- **Nota:** o acesso a **recursos partilhados** (tarefas com **dependências**) pode impor restrições sobre o grau de preempção que uma tarefa admite.

Modelo de tempo-real

Com preempção



Sem preempção



Modelo de tempo-real

Os requisitos temporais podem ser de vários tipos:

- **Deadline** – Limitação ao tempo máximo para terminação da tarefa.
- **Janela** – Delimitação máxima e mínima ao instante de terminação.
- **Sincronismo** – Limitação à diferença temporal entre a geração de dois eventos de saída (existem outras formas).
- **Distância** – Limitação ao atraso (distância) entre a terminação, ou ativação, de duas instâncias consecutivas (e.g., a mudança do óleo do motor num carro)
- Tipo **deadline** é o mais comum!

Modelo de tempo-real

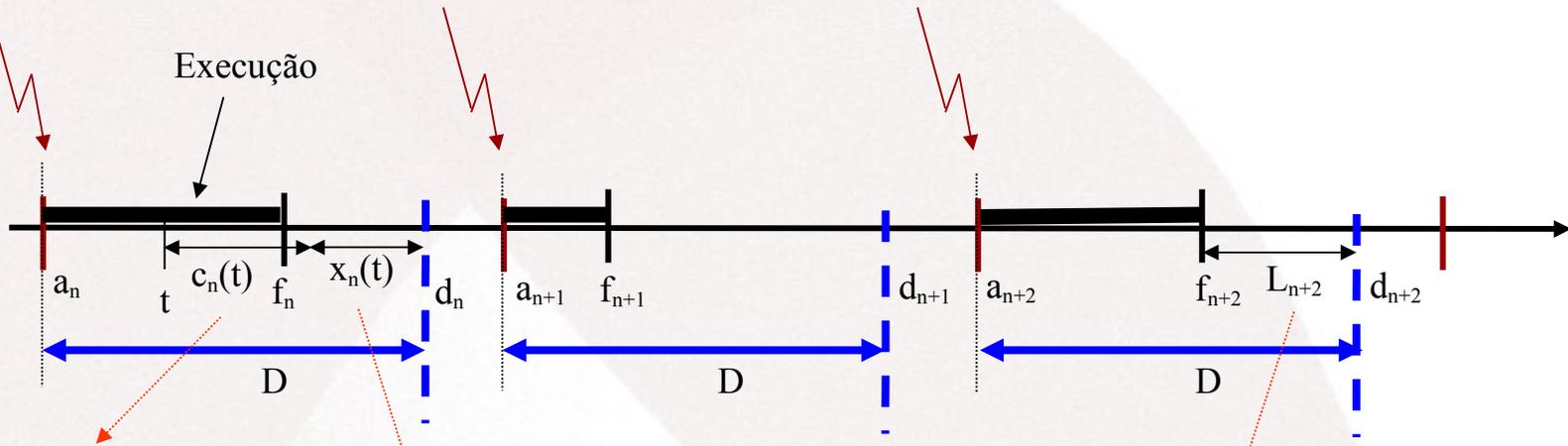
Deadline

$$\forall n, f_n - a_n < D \text{ (relativa)}$$

$$\forall n, f_n < d_n \text{ (absoluta)}$$

Evento de ativação

Execução



$c_n(t)$ = **majorante** do tempo de execução residual no instante t

$x_n(t)$ = **minorante** do relaxamento (*slack* da tarefa)

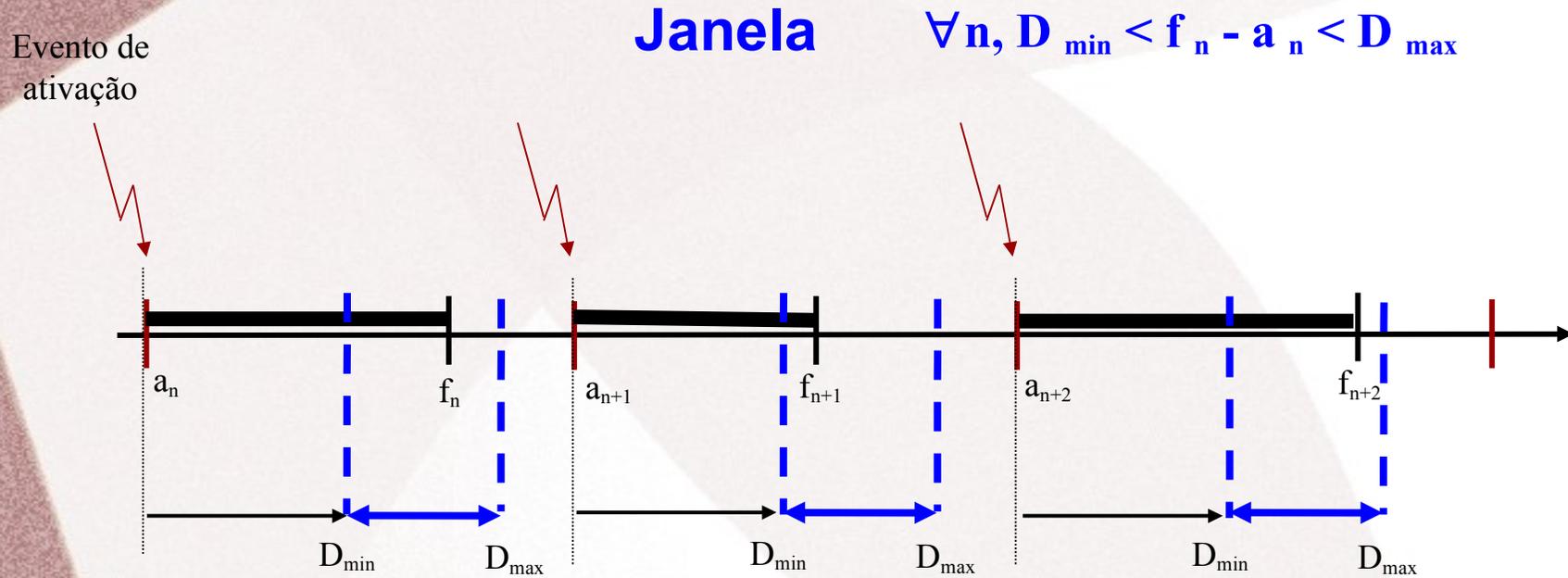
$$x_n(t) = d_n - t - c_n(t)$$

$$L_n = f_n - d_n = \text{atraso da } n^{\text{a}} \text{ ativação}$$

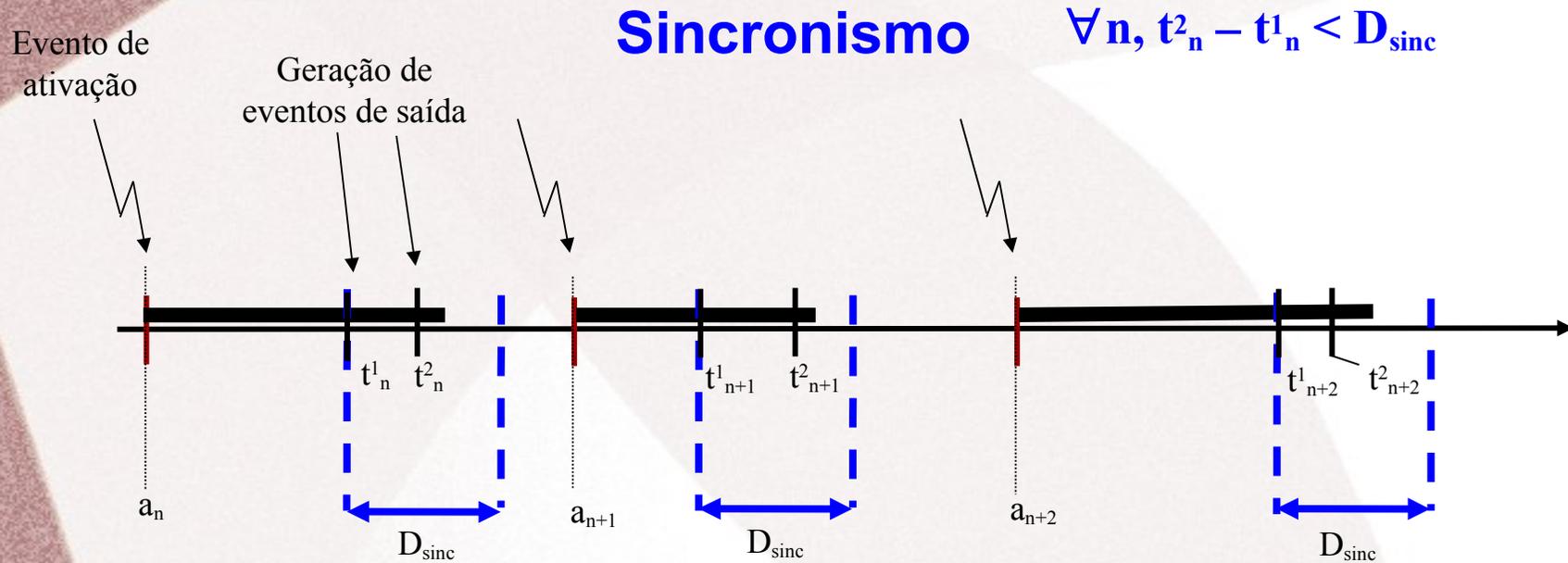
$$L_n \leq 0 \rightarrow \text{terminação a tempo}$$

$$L_n > 0 \rightarrow \text{terminação atrasada}$$

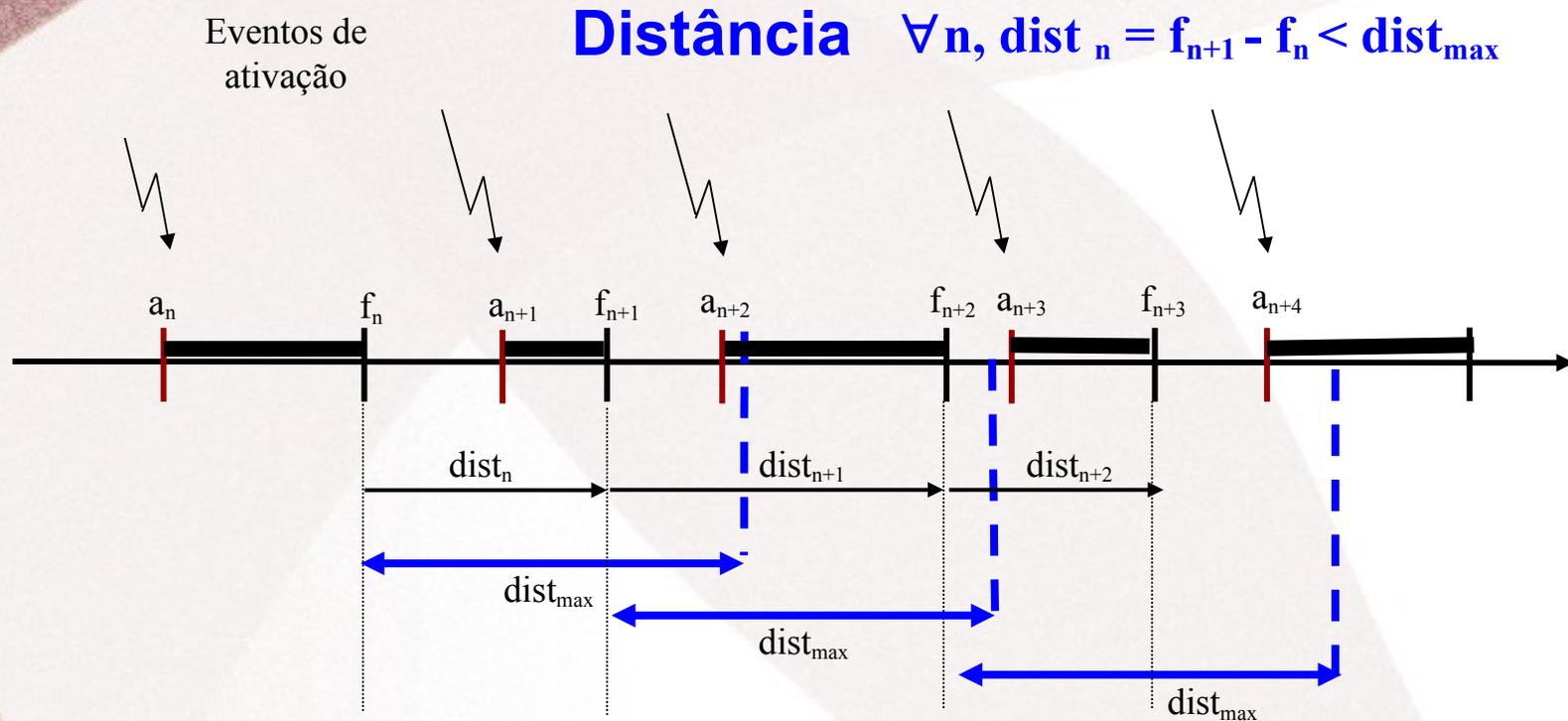
Modelo de tempo-real



Modelo de tempo-real



Modelo de tempo-real



Modelo de tempo-real

Exemplo de caracterização de tarefas:

- **Periódicas:** $\tau_i = \tau_i (C_i, \Phi_i, T_i, D_i)$

$$\tau_1 = \tau_1 (2, 5, 10, 10) \quad \tau_2 = \tau_2 (3, 10, 20, 20)$$

- **Esporádicas:** Semelhante às periódicas mas com mit_i em vez de T_i e Φ_i não é habitualmente usado (poderia significar um tempo mínimo até à primeira ativação).

$$\tau_i = \tau_i (C_i, mit_i, D_i)$$

$$\tau_1 = \tau_1 (2, 5, 5) \quad \tau_2 = \tau_2 (3, 10, 7)$$

Implementação de aplicações de tempo-real

A programação de aplicações de tempo real quando envolve apenas:

- **um ciclo principal** e, eventualmente,
- um **número muito reduzido de atividades assíncronas** (que podem ser encapsuladas em rotinas de interrupção)

é normalmente efetuada de **forma direta sobre o CPU**, i.e., sem recurso a estruturas de SW intermédias tipo Sistema Operativo ou Executivo (*Kernel*).

Implementação de aplicações de tempo-real

No caso de programação direta sobre o CPU, o disparo de atividades é normalmente feito por interrupções

- **Interrupções periódicas** (através de timers) para atividades periódicas. Estas interrupções são usadas para contar tempo.
- **Interrupções assíncronas** (comunicações, externas, etc.) para atividades disparadas por eventos (alterações do estado do sistema, e.g., disparo de um alarme, recepção de dados por um meio de comunicação, ação do operador)

Implementação de aplicações de tempo-real

Mas a utilização de interrupções:

- **Impõe um custo computacional** adicional necessário para a salvaguarda do estado do CPU no momento de cada interrupção (i.e., salvaguarda dos registos na *stack*).
- **Retira capacidade computacional** à execução do programa interrompido. Quanto mais interrupções surgirem mais devagar o programa executa pois está constantemente a ser interrompido. No limite, a execução do programa fica completamente bloqueada.

Implementação de aplicações de tempo-real

A utilização de interrupções pode ser feita **com** ou **sem encadeamento (nesting)**

- **Com encadeamento** – é permitida a interrupção de rotinas de atendimento a interrupção (ISRs) por interrupções de maior prioridade.
 - Maior dificuldade de dimensionamento do *stack*
 - Melhor resposta temporal das ISRs de maior prioridade
- **Sem encadeamento** – cada ISR executa até final sem interrupção. Outras interrupções pendentes são atrasadas.
 - Características opostas do caso anterior
 - Notar o bloqueio das ISRs de maior prioridade pelas de menor.

Implementação de aplicações de tempo-real

Por outro lado, quando a aplicação envolve **múltiplas atividades**, assíncronas ou não:

- a respetiva programação é facilitada pela utilização de **Sistemas Operativos** ou **Executivos multi-tarefa** (*muti-tasking*) os quais suportam diretamente múltiplas tarefas que podem executar de forma independente, ou partilhando recursos do sistema,

cada **atividade** é encapsulada numa **tarefa**.

Executivos Multi-Tarefa

A programação de aplicações com recurso a estruturas de SW tipo **Sistema Operativo** ou **Executivo** permite:

- **Maior nível de abstração**
- **Menor dependência relativamente ao HW**
- **Maior facilidade de manutenção do SW**

Nota: Mas mesmo nestes casos, o disparo das tarefas é feito por interrupções. Há uma interrupção periódica que fornece uma medida de tempo ao SO ou Executivo e é possível usar interrupções assíncronas embora, normalmente, estejam encapsuladas em *device drivers*.

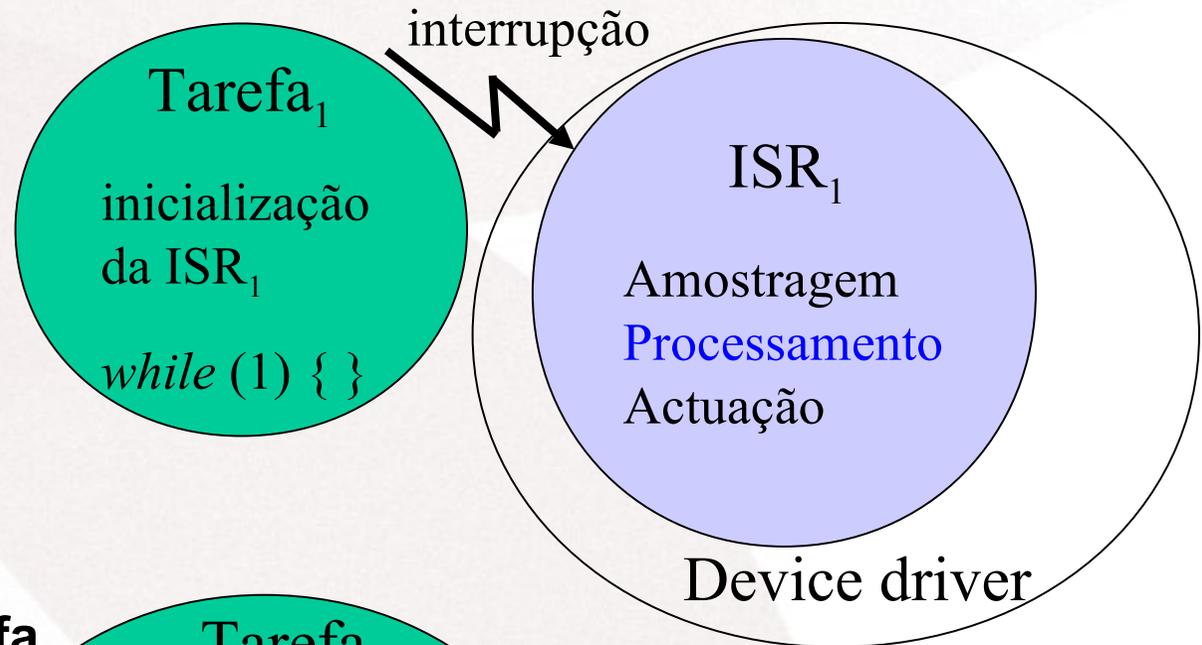
Executivos Multi-Tarefa

- **processamento** associado a uma dada atividade pode ser efetuado:
 - **Ao nível de uma ISR (*Interrupt Service Routine*)**
 - Não se tira partido de algumas vantagens do SO ou Executivo (programação de baixo nível – muito dependente do HW)
 - Elevada reatividade a eventos externos (micro-segundos...)
 - Grande interferência ao nível das tarefas
 - N° limitado de ISRs
 - **Ao nível de uma tarefa**
 - Tira partido das vantagens do SO ou Executivo (programação de alto nível, menor dependência do HW, melhor manutenção)
 - Menor reatividade a eventos externos (maior *overhead*)
 - ISRs reduzidas para menor perturbação sobre as tarefas

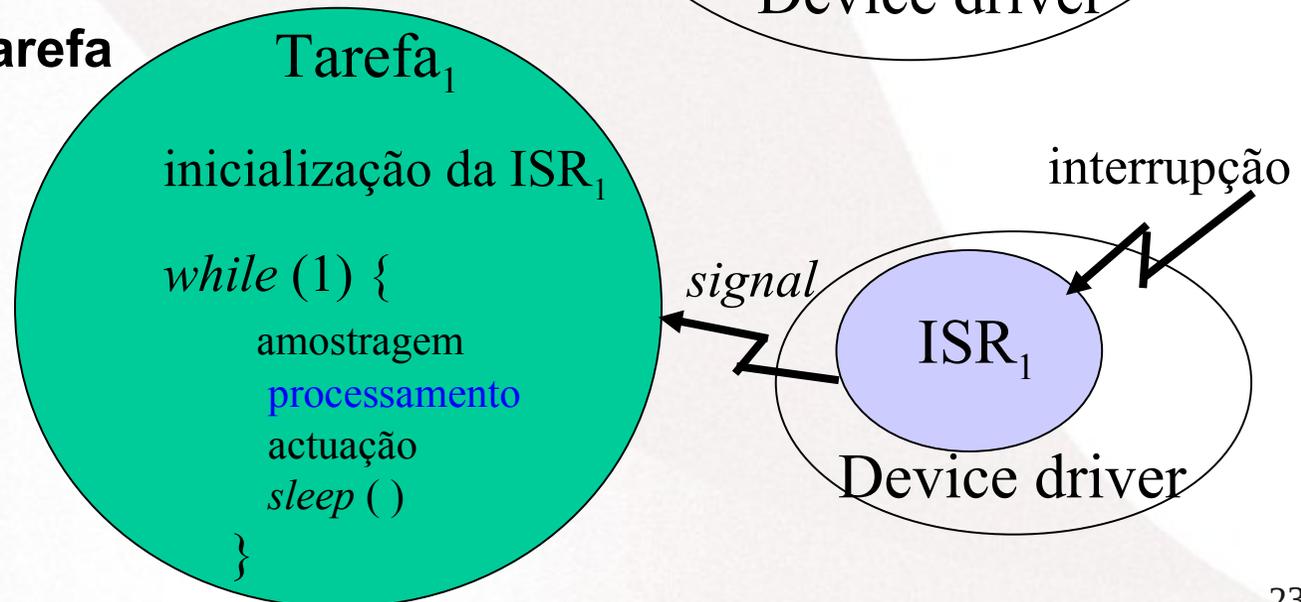
Executivos Multi-Tarefa

Processamento:

- Ao nível de uma ISR
(não standard)



- Ao nível de uma tarefa
(standard)



Executivos Multi-Tarefa

Classificação dos SOs e Executivos relativamente às **garantias temporais**

Não Tempo-Real (*time-sharing*)

(e.g., Unix, Linux, Windows NT, seguem modelo transformacional)

- Não é possível majorar o tempo de resposta a um evento (e.g., devido a *swapping*, bloqueio no acesso a periféricos, escalonamento que favorece a distribuição equitativa do CPU)

- **Soft Real-Time**

(e.g. OS9)

- Usam técnicas de tempo-real (exclusão de memória virtual, mecanismos de IPC rápidos e com bloqueios reduzidos, chamadas ao sistema curtas) mas não oferecem garantias temporais (tipo *best-effort*)

- **Hard Real-Time**

(e.g. SHaRK, RTLinux, QNX, VxWorks, ...)

- Oferecem garantias temporais

Controlo lógico e controlo temporal

- Controlo lógico

- Controlo do fluxo de programa, i.e., sequência efetiva das operações a ser executadas (e.g., descrito através de um fluxograma) – **fundamental para se determinar C (WCET)**

- Controlo temporal

- Controlo dos **instantes de execução** das operações do programa (e.g., disparo de atividades, verificação do cumprimento de restrições temporais,...)

Controlo temporal

Disparo de atividades (funções)

- **Por tempo (*time-triggered*)**
 - A execução de atividades (funções) é disparada por intermédio de um sinal de controlo baseado na progressão do tempo (e.g., através de uma interrupção periódica).
- **Por eventos (*event-triggered*)**
 - A execução de atividades (funções) é disparada por intermédio de um sinal de controlo assíncrono baseado na alteração do estado do sistema (e.g., através de uma interrupção externa).

Controlo temporal

Sistemas disparados por tempo

time-triggered (TT) systems

- Típicos em aplicações de controlo (amostragem de variáveis contínuas).
- Existe uma referência temporal comum (permite estabelecer uma relação de fase)
- Taxa de utilização do CPU constante mesmo quando não há variações no estado do sistema.
 - Situação de **pior caso bem definida**

Controlo temporal

Sistemas disparados por eventos

event-triggered (ET) systems

- Típicos na monitorização de condições esporádicas no estado do sistema (e.g., verificação de alarmes ou de solicitações assíncronas).
- Taxa de utilização do sistema computacional (e.g. CPU) variável consoante a frequência de ocorrência de eventos.
 - Situação de **pior caso mal definida**
ou se utilizam *argumentos probabilísticos*
ou se impõe uma *limitação à máxima taxa de eventos*

Controlo temporal

- Exemplo
 - Considere os seguintes conjuntos de tarefas e calcule o atraso máximo que cada tarefa pode sofrer:
 - TT $\{\tau_i = \tau_i (C_i=1, \Phi_i=i, T_i=5, D_i=T_i \ i=1..5)\}$
 - ET $\{\tau_i = \tau_i (C_i=1, (\Phi_i=0), \text{mit}_i=5, D_i=\text{mit}_i \ i=1..5)\}$
 - Determine também a taxa média e máxima de **utilização de CPU** para ambos os casos, considerando no caso médio que as tarefas ET são ativadas em média de 100 em 100 unidades de tempo.

Nota: a taxa de utilização de CPU é dada por:

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{T_i}$$

Resumo da Aula 2

- Modelos computacionais (**modelo de tempo-real**)
- Tarefas de tempo-real: periódicas, esporádicas e aperiódicas
- Restrições temporais do tipo **deadline**, janela, sincronismo e distância
- Implementação de tarefas e utilização de um **kernel multitasking**
- **Controlo lógico e controlo temporal**
- Tarefas **event-triggered** e **time-triggered**