
Estimação do WCET usando Análise Estática



Fundamentos dos Sistemas de Tempo Real
Rômulo Silva de Oliveira
eBook Kindle, 2018

www.romulosilvadeoliveira.eng.br/livrotemporeal

Outubro/2018

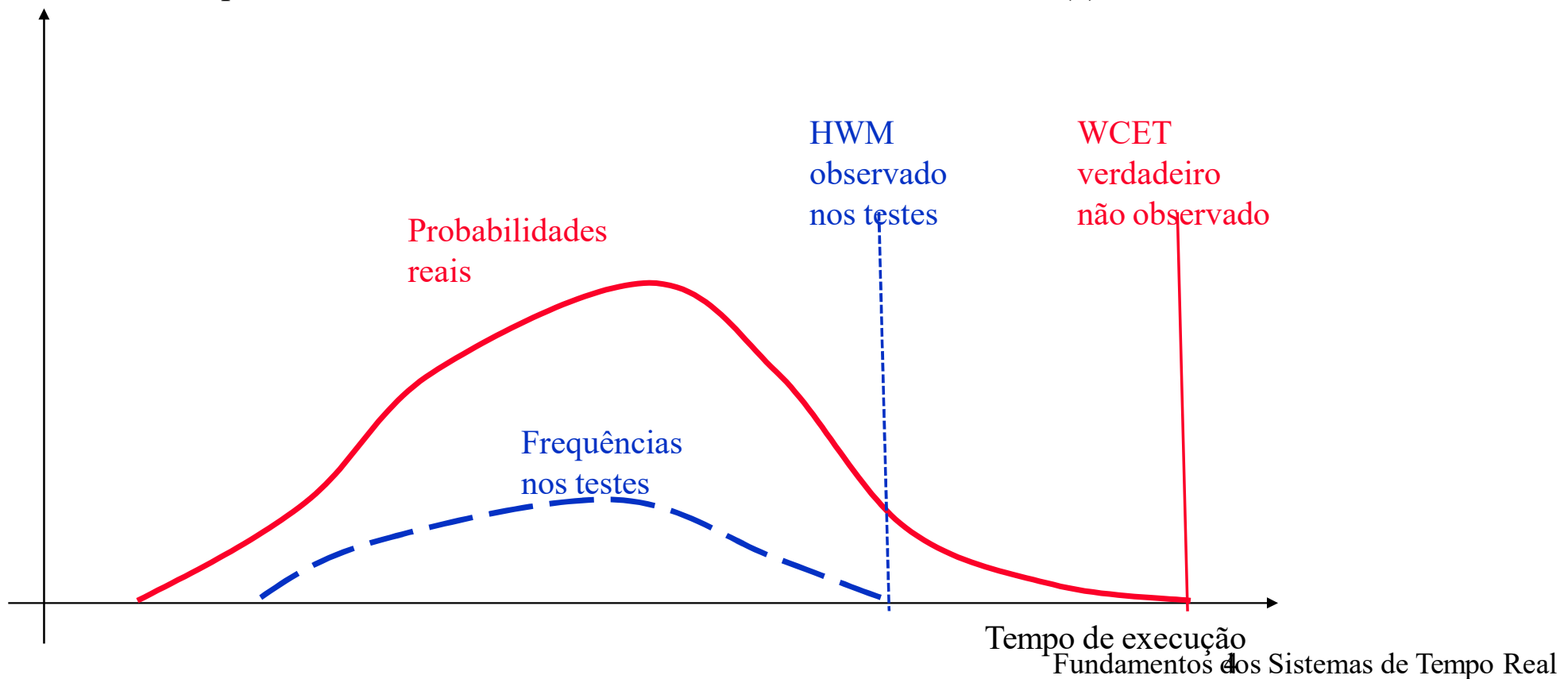
Fundamentos dos Sistemas de Tempo Real

Introdução 1/10

- Sistemas de tempo real são classificados de acordo com a criticalidade dos requisitos temporais
 - Sistemas críticos ou hard real-time
 - Sistemas não críticos ou soft real-time
- Para sistemas críticos é necessário oferecer garantias quanto ao atendimento dos prazos
- É necessário conhecer o tempo de execução no pior caso de cada tarefa (WCET – Worst Case Execution Time)
- Mesmo para sistemas não críticos é uma informação relevante

Introdução 3/10

- Distribuição dos tempos de execução de uma tarefa
 - Probabilidades considerando todos os cenários e entradas possíveis $P(c)$
 - Frequências observadas durante um certo número de testes $F(c)$



Introdução 4/10

- O tempo de execução no pior caso supõe os piores comportamentos para o software e para o hardware
- O pior fluxo de controle para cada tarefa
 - Os piores dados de entrada
 - Os piores valores para variáveis globais
- O pior comportamento das caches
- O pior comportamento do pipeline
- O pior comportamento do branch predictor
- Etc
- O pior comportamento de tudo

Introdução 5/10

- O WCET é determinado por múltiplos fatores cuja análise criteriosa é fundamental para a determinação de seu valor
 - Ou uma estimativa que represente um limite superior seguro (*upper-bound*)
- A precisão da estimativa do WCET vai depender das técnicas de análise utilizadas
- Análise estática
 - Analisa o código sem executá-lo
- Medições
- Métodos híbridos misturando os dois anteriores

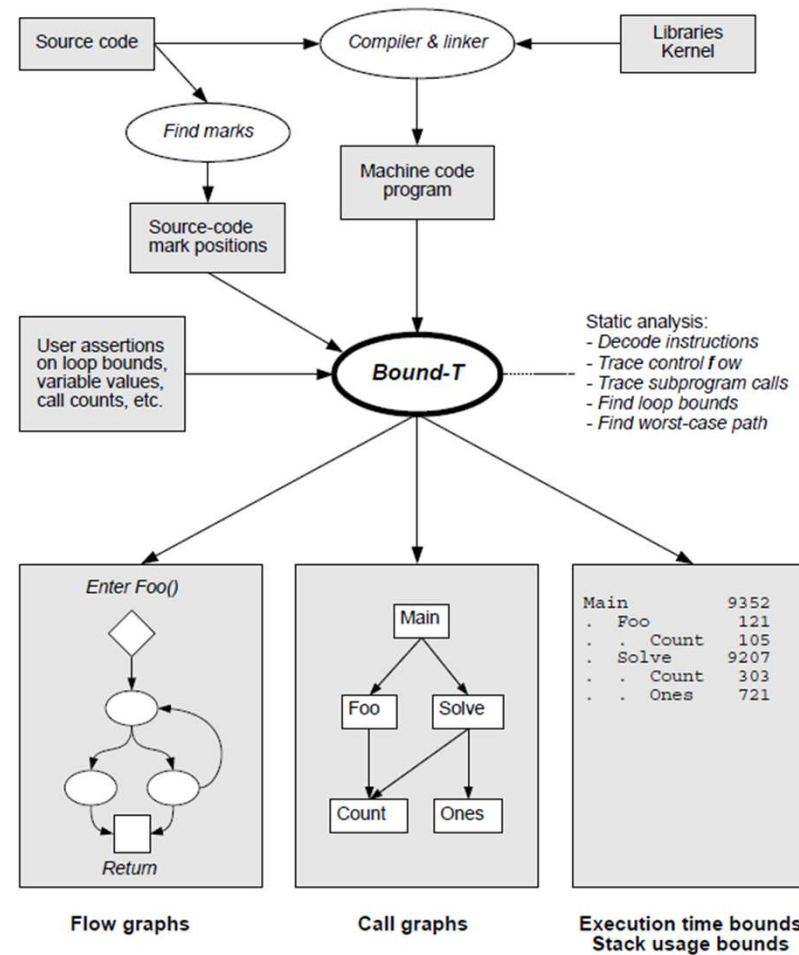
A Ferramenta aiT 1/8

- Desenvolvido pela empresa AbsInt, aiT é o analisador estático de WCET comercial mais usado pela indústria
 - www.absint.com/ait
- O aiT analisa diretamente código de máquina e considera o comportamento de elementos tais como cache e pipeline
- Um conjunto de ferramentas é fornecido, inclusive com interface gráfica de usuário para diversos aspectos

Ferramenta Bound-T

- Uma ferramenta de software que usa a análise estática do código de máquina para calcular os limites superiores do tempo de execução (WCET)
 - <http://www.bound-t.com/>
- Processadores Alvo
 - AVR
 - ARM
 - 8051
 - Entre outros
- Não suporta processadores complexos

Ferramenta Bound-T



Estimação do WCET usando Medições



Fundamentos dos Sistemas de Tempo Real
Rômulo Silva de Oliveira
eBook Kindle, 2018

www.romulosilvadeoliveira.eng.br/livrotemporeal

Outubro/2018

Fundamentos dos Sistemas de Tempo Real

Introdução 1/9

- Para sistemas críticos é necessário conhecer o tempo de execução no pior caso de cada tarefa (WCET – Worst Case Execution Time)
 - Mesmo para sistemas não críticos é uma informação relevante
- O tempo de execução no pior caso supõe os piores comportamentos para o software e para o hardware
- Existe uma demanda crescente por capacidade de processamento
 - Também nos sistemas de tempo real
- Maior capacidade de processamento requer o uso de arquiteturas de computador modernas e complexas

Introdução 2/9

- Arquiteturas de computador simples: tempo de execução de uma instrução depende apenas do tipo de instrução e operandos
 - Não existe pipeline, memória cache, etc
- Arquiteturas de computador complexas: apresentam efeitos temporais locais e efeitos temporais globais
- Elementos complexos de hardware melhoram o tempo médio de execução (Average-Case Execution Time – ACET) mas tornam a análise do WCET difícil
- Arquiteturas modernas:
 - Geram tempos de computação variáveis
 - Podem apresentar um comportamento patológico no pior caso
 - Pior caso tem probabilidade muito pequena, porém maior que zero

Medição do Tempo de Execução 1/12

- Medições de tempo de execução
 - Execução de uma tarefa, ou partes dela, para um conjunto de entradas, em um hardware específico ou em um simulador
- Os tempos de operação dos diferentes componentes e procedimentos definidos em cada tarefa são avaliados
 - Só é possível medir uma rota de execução por vez
 - Cabe ao projetista encontrar as entradas com alta probabilidade de situações com o pior tempo de execução
- Apesar de sua utilização na indústria ser frequente
 - Perde em exaustividade
 - O maior tempo medido pode não ser o pior tempo de execução
- Podem gerar limites otimistas para o pior tempo de execução
- É possível ser aplicado a qualquer arquitetura de processador

Métodos Estatísticos – Teoria dos Valores Extremos 1/15

- **Teoria de Valores Extremos – TVE**
- TVE é uma estrutura de inferência estatística com o objetivo de descrever comportamento extremo raro
- Sua aplicação varia de hidrologia, financiamento, gestão de risco, telecomunicações e, recentemente, para derivar limites pWCET
- Uma estimativa do pior caso de uma tarefa pode ser obtida a um determinado nível de precisão estatística por meio do uso de
 - Medição para recolher dados
 - TVE para generalizar os processos que produzem estas medições
- Pode oferecer uma abordagem alternativa para testes convencionais, bem como para análise estática do tempo de execução

Métodos Estatísticos – Teoria dos Valores Extremos 2/15

- **Premissas básicas para a aplicabilidade da TVE**
- Os tempos de execução observados devem poder ser descritos como variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas (i.i.d.)
- Os tempos de execução devem ser produzidos por um processo aleatório e estacionário (a distribuição dos valores medidos não muda com o passar do tempo)
- É necessário que a distribuição dos tempos de execução possa ser ajustada a uma distribuição assintótica de valores extremos

Métodos Estatísticos – Teoria dos Valores Extremos 4/15

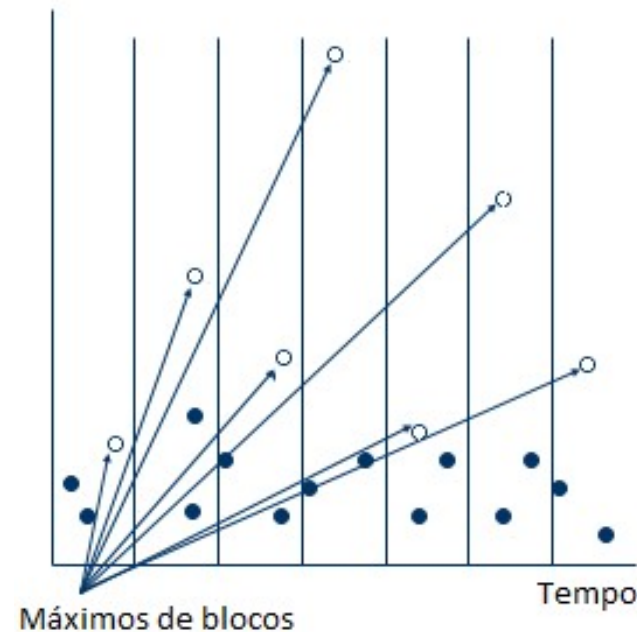
- TVE é normalmente referida como uma técnica baseada na medição e consiste de 5 etapas
 1. Medir quanto tempo uma tarefa leva para executar um conjunto representativo de seus possíveis dados de entrada
 2. Selecionar uma amostra de máximos a partir dessas medições
 3. – Apenas um subconjunto das medições é usado nos cálculos
 4. Selecionar um modelo de valor extremo que melhor se ajuste aos valores máximos amostrados
 5. Verificar se o modelo obtido é consistente com as medições realizadas
 6. Uma vez que o modelo derivado é validado, obtenção da estimativa de pior caso pWCET para uma dada probabilidade de excedência

Métodos Estatísticos – Teoria dos Valores Extremos 5/15

- **Amostragem de máximos**
- Em uma amostra qualquer só existe um máximo e um mínimo
- É necessário uma seleção de máximos da amostra para a análise
 - Achar uma curva que mostre a probabilidade de valores extremos serem observados
- Há duas abordagens principais para isto:
 - Máximos de Blocos
 - Picos Acima do Limiar

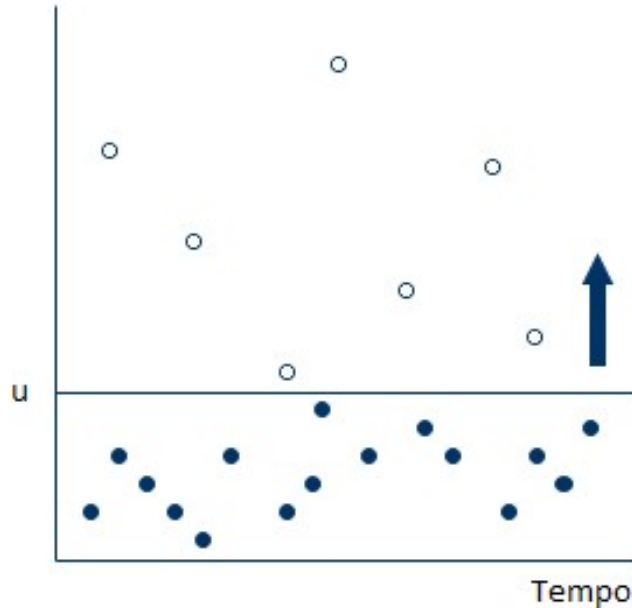
Métodos Estatísticos – Teoria dos Valores Extremos 6/15

- **Máximos de Blocos (Block Maxima – BM)**
- O conjunto de dados amostrados (medições do tempo de execução realizadas) é particionado em blocos do mesmo tamanho
 - Por exemplo: 500.000 medições particionadas em 1000 blocos de 500 medições
- Seleciona-se apenas o valor máximo de cada bloco



Métodos Estatísticos – Teoria dos Valores Extremos 7/15

- **Picos Acima do Limiar (Peaks Over Threshold – POT)**
- É escolhido um limiar (threshold) para definir a partir de qual valor serão consideradas as medições (valores da cauda)
- Apenas as medições acima deste limiar (u) são consideradas
- O método ajusta uma distribuição de probabilidade para os valores acima deste limiar



Métodos Estatísticos – Teoria dos Valores Extremos 8/15

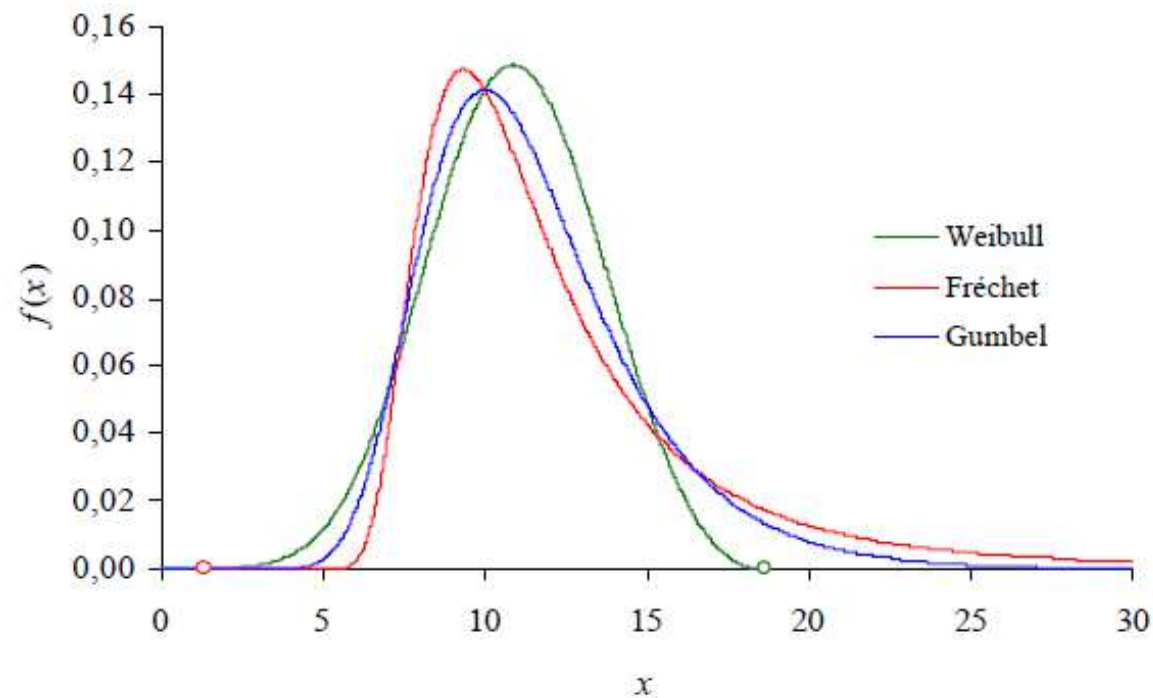
- **Modelo de Valor Extremo usando Máximos de Blocos (BM)**
- Uma amostra de máximos, selecionada via BM, deve ser ajustada para a distribuição Generalizada de Valores Extremos (GVE)
- GVE unifica as três distribuições Weibull, Gumbel e Fréchet, e tem função de distribuição acumulada de probabilidade dada por

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right) \right]^{\frac{1}{\xi}} \right\}$$

- Parâmetros: μ localização, σ escala, e ξ forma
 - *Weibull*: $\xi < 0$, cauda curta delimitada
 - *Gumbel*: $\xi = 0$, cauda ilimitada ($\xi \rightarrow 0$)
 - *Fréchet*: $\xi > 0$, cauda pesada ilimitada

Métodos Estatísticos – Teoria dos Valores Extremos 9/15

- Função densidade de probabilidade da distribuição GVE
 - Weibull $\xi=-0,3$ Gumbel $\xi>0$ e Fréchet $\xi = 0,3$
 - com $\mu=10$ e $\sigma=2,6$



Métodos Estatísticos – Teoria dos Valores Extremos 10/15

- **Modelo de Valor Extremo usando Picos Acima do Limiar (POT)**
- Uma amostra de máximos, selecionada via POT, deve ser ajustada para a distribuição Generalizada de Pareto (GP)
- A GP é uma aproximação para a distribuição dos excessos acima de um threshold elevado u . A função de distribuição GP é dada por

$$H_Y(x|u, \sigma_u) := \begin{cases} 1 - (1 + \xi \frac{x-u}{\sigma_u})^{-\frac{1}{\xi}}, & x \geq u & \text{se } \xi > 0 \\ 1 - \exp(-\frac{x-u}{\sigma_u}), & x \geq u & \text{se } \xi = 0 \\ 1 - (1 + \xi \frac{x-u}{\sigma_u})^{-\frac{1}{\xi}}, & u \leq x \leq u - \frac{\sigma_u}{\xi} & \text{se } \xi < 0 \end{cases}$$

- Parâmetros: *threshold* u localização, σ escala, e ξ forma
 - *Beta*: $\xi < 0$
 - *Exponencial*: $\xi = 0$
 - *Pareto*: $\xi > 0$

Métodos Estatísticos – Teoria dos Valores Extremos 11/15

- **Estimação dos Parâmetros**
- A partir dos valores selecionados via BM (ou POT), são estimados os parâmetros que definem a curva GEV (ou GP) que mais se ajusta aos valores observados nas medições
 - No caso GEV (ou GP) representa a distribuição de valores extremos que foi ajustada aos dados obtidos, as medições dos tempos de execução
 - A curva obtida de certa forma explica o comportamento destas medições, em termos probabilistas
- Existem diferentes métodos para estimar os parâmetros da distribuição de valores extremos. Os métodos mais usuais são
 - Maximum-likelihood estimation (MLE)
 - Generalized maximum-likelihood estimation (GMLE)
 - L-moments
 - Bayesian

Métodos Estatísticos – Teoria dos Valores Extremos 12/15

- **Verificação do Modelo Obtido**
- Uma vez que os parâmetros do modelo são estimados, os testes de qualidade de ajuste (goodness-of-fitness) são usados para verificar a adequação (aderência) do modelo obtido com relação aos dados
 - O quão bem a curva GEV (ou GP) obtida se ajusta às medições realizadas
- Estão disponíveis testes estatísticos para avaliar a qualidade de ajuste dos modelos estimados
- A verificação pode ser:
- Visual (gráficos Quantile-Quantile)
- Técnicas matemáticas (avaliação numérica para a precisão)

Métodos Estatísticos – Teoria dos Valores Extremos 13/15

- **Obtenção do pWCET para uma dada probabilidade de excedência**
- A obtenção da estimativa de pior caso pWCET para uma dada probabilidade de excedência é feita a partir da simples leitura da curva (modelo) obtido
- Para cada valor pWCET do eixo-X da curva GEV (ou GP), o eixo-Y fornece a respectiva probabilidade de excedência
- Pode-se escolher uma probabilidade de excedência, por exemplo de 10^{-9} (eixo-Y) e localizar o valor pWCET correspondente (eixo-X)
- Pode-se escolher um valor para o pWCET (eixo-X) e obter a probabilidade de excedência (eixo-Y), ou seja, a probabilidade de ser observado um tempo de execução superior ao valor pWCET

Métodos Estatísticos – Teoria dos Valores Extremos 14/15

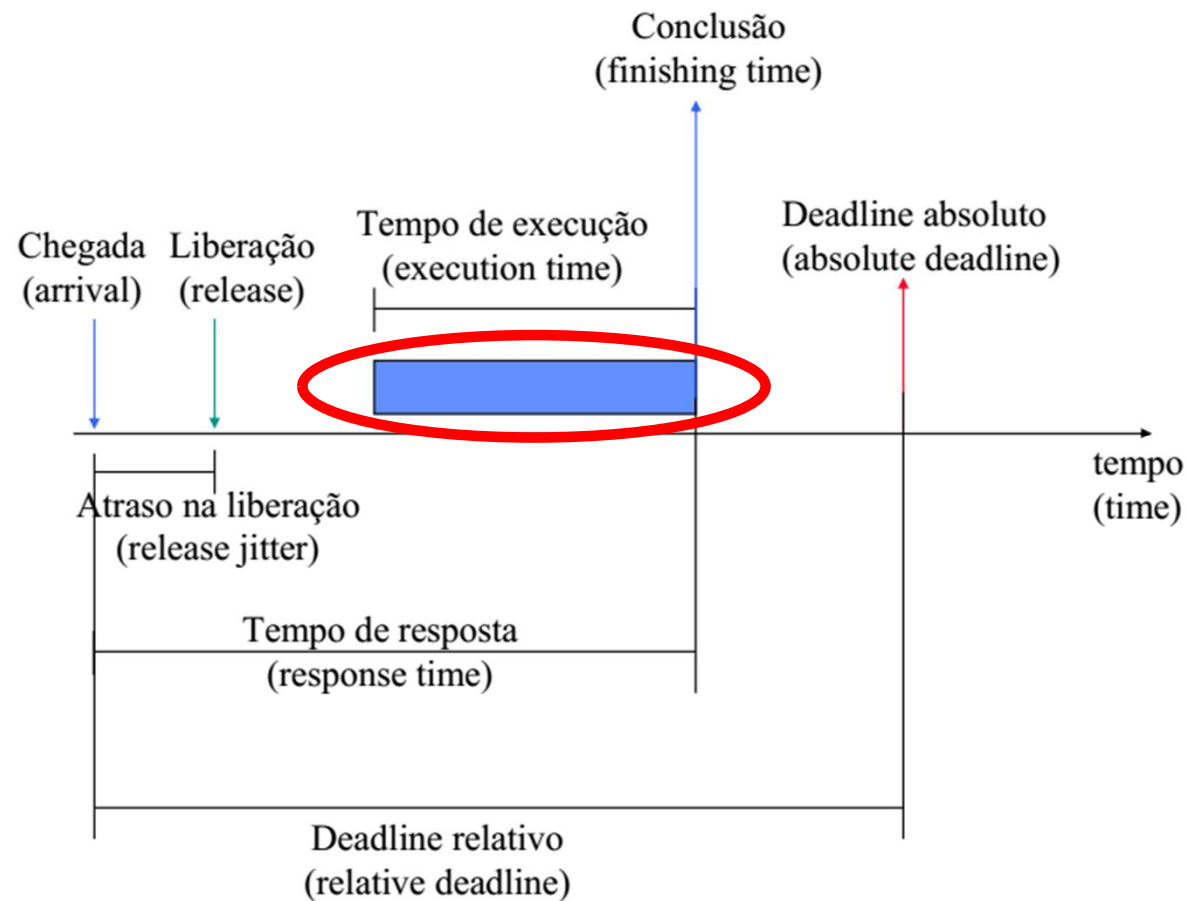
- **Em resumo**
- Mede-se tempos de execução da tarefa-alvo na plataforma-alvo
- As condições de medição devem se igualar ou ser pessimistas em relação ao pior caso esperado no ambiente de operação
- Amostras devem ser representativas com relação às situações extremas esperadas no ambiente em que o sistema irá operar
- Os tempos medidos são sujeitos aos requisitos da TVE, como i.i.d. e aderência dos máximos a modelos de valores extremos
- Mesmo que todos os requisitos da TVE sejam satisfeitos, os resultados produzidos podem provar-se não confiáveis.
- Condições de medição e características construtivas do sistema analisado impactam diretamente na confiabilidade dos resultados

Métodos Estatísticos – Teoria dos Valores Extremos 15/15

- **Em resumo**
- Tempos de execução diferem fenomenologicamente daqueles para os quais a TVE foi inicialmente criada (e.g. nível do mar)
- Variabilidade temporal é induzida por fatores controláveis e/ou especulativos, e pode portanto não ter comportamento aleatório
- As principais fontes de variabilidade temporal são:
 - O hardware do processador utilizado
 - Os caminhos de execução que são efetivamente medidos
- Tanto os efeitos do hardware quanto dos caminhos de execução dependem direta ou indiretamente dos dados de entrada usados

Estimação de tempo de execução

O que é o tempo de execução de uma tarefa?

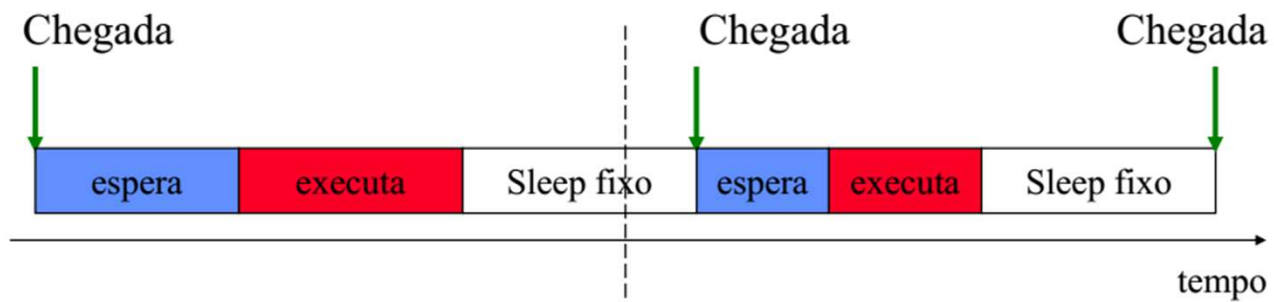


Implementação de tarefa periódica com alta precisão

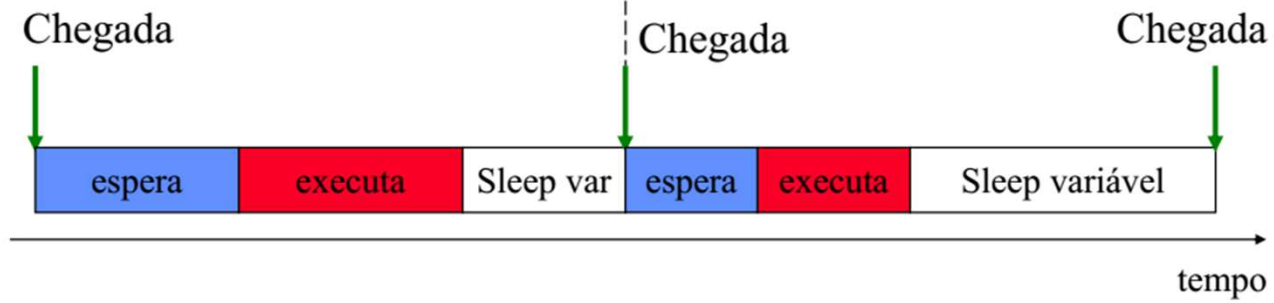
Vamos usar uma chamada de sistema do tipo “sleep()” onde o parâmetro não é o tempo fixo de espera mas sim o instante absoluto no futuro quando a tarefa será liberada

Para isso usa-se a função `clock_nanosleep` com a opção `TIMER_ABSTIME` no Linux.

Sleep com tempo de espera fixo



Sleep com tempo de espera até próximo período



Biblioteca em C

```
#include <time.h>
```

```
int clock_nanosleep(clockid_t clockid, int flags,  
                    const struct timespec *request,  
                    struct timespec *remain);
```

O argumento *clockid* especifica o relógio pelo qual o tempo de espera deve ser medido. Os mais usados são:

CLOCK_REALTIME

Um relógio em tempo real em todo o sistema configurável.

CLOCK_MONOTONIC

Um relógio indefinível e monotonicamente crescente que mede tempo desde algum ponto não especificado no passado que não mudar após a inicialização do sistema.

Biblioteca em C

```
#include <time.h>
```

```
int clock_nanosleep(clockid_t clockid, int flags,  
                    const struct timespec *request,  
                    struct timespec *remain);
```

Se *flags* for `TIMER_ABSTIME`, a estrutura de tempo *request* é interpretada como um valor absoluto de tempo medido pelo relógio *clockid*.

Se a chamada for interrompida por um manipulador de sinal, *clock_nanosleep()* falha com o erro `EINTR`. Além disso, se *remain* não for `NULL` e os *flags* não for `TIMER_ABSTIME`, ele retornará o tempo restante não adormecido em *remain*.

```
struct timespec {  
    time_t tv_sec; / * segundos * /  
    long tv_nsec; / * nanossegundos [0 .. 999999999] * /  
};
```


Implementação em C de uma tarefa periódica com alta precisão

```
while(1) {  
    // Espera ateh inicio do proximo periodo  
    clock_nanosleep(CLOCK_MONOTONIC, TIMER_ABSTIME, &t, NULL);  
  
    // Realiza seu trabalho  
    printf("Passou um periodo !\n");  
  
    // Calcula inicio do proximo periodo  
    t.tv_nsec += periodo;  
    while (t.tv_nsec >= NSEC_PER_SEC) {  
        t.tv_nsec -= NSEC_PER_SEC;  
        t.tv_sec++;  
    }  
}
```

Como calcular o tempo de execução em C?

```
while(amostra < N_AMOSTRAS) {  
    // Espera ateh inicio do proximo periodo  
    clock_nanosleep(CLOCK_MONOTONIC, TIMER_ABSTIME, &t, NULL);  
  
    // Le a hora atual, coloca em t_inicio  
    clock_gettime(CLOCK_MONOTONIC, &t_inicio);  
  
    //Faz tarefa que deseja medir tempo de exeução  
  
    // Le a hora atual, coloca em t_fim  
    clock_gettime(CLOCK_MONOTONIC, &t_fim);  
  
    // Calcula o tempo de execuãõ observado em microsegundos  
    temp_exec[amostra++] = 1000000*(t_fim.tv_sec - t_inicio.tv_sec)  
    + (t_fim.tv_nsec - t_inicio.tv_nsec)/1000;  
  
    // Calcula inicio do proximo periodo  
    t.tv_nsec += periodo;  
    while (t.tv_nsec >= NSEC_PER_SEC) {  
        t.tv_nsec -= NSEC_PER_SEC;  
        t.tv_sec++;  
    }  
}
```



TEMPO DE EXECUÇÃO DE UMA TAREFA