
Estimação do Tempo de Resposta usando Análise



Fundamentos dos Sistemas de Tempo Real
2ª Edição

Rômulo Silva de Oliveira
Edição do Autor, 2020

www.romulosilvadeoliveira.eng.br/livrotemporeal

Como determinar o tempo de resposta máximo através de análise matemática ?

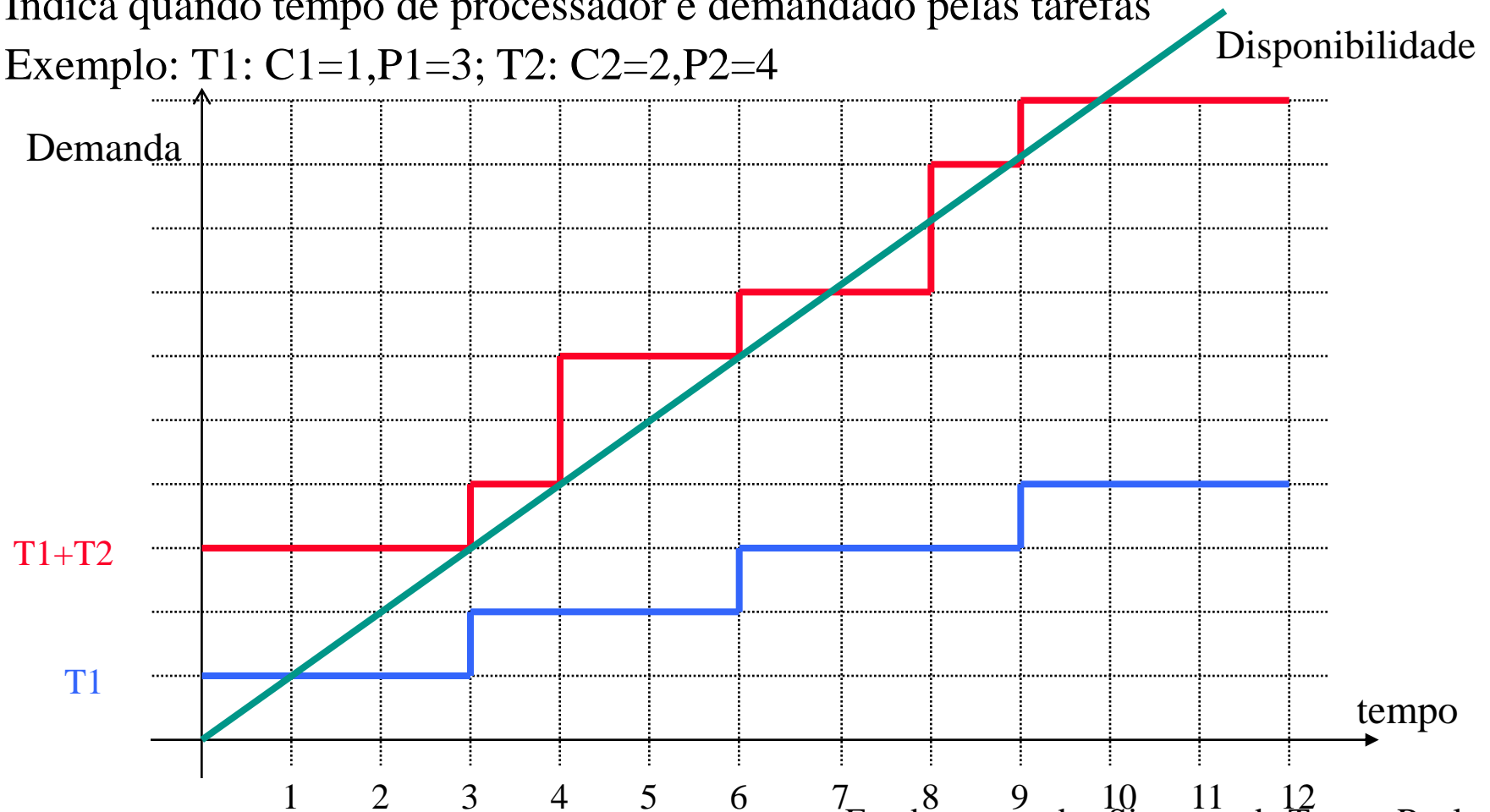
Análise do Tempo de Resposta 1/16

- Limitações da análise baseada em Utilização
 - Não é exata
 - Aplicável apenas a modelos de tarefas muito simples
- Análise baseada em **Tempo de Resposta**
 - Abordagem analítica calcula tempo de resposta no pior caso
 - Tempo de resposta de cada tarefa é comparado com o deadline da tarefa
 - Baseada no conceito de Função Demanda de Tempo

Análise do Tempo de Resposta 2/16

- Função Demanda de Tempo (Time-Demand Function)

- Base da análise do tempo de resposta
- Indica quando tempo de processador é demandado pelas tarefas
- Exemplo: T1: C1=1,P1=3; T2: C2=2,P2=4



Análise do Tempo de Resposta 3/16

- Como calcular o tempo de resposta de cada tarefa ?
- Para a tarefa mais prioritária temos $R1 = C1$
- Demais tarefas sofrem **Interferência** das tarefas com prioridade maior
- Neste caso, $R_i = C_i + I_i$
- Interferência é máxima a partir do **Instante Crítico**
 - Todas as tarefas são liberadas simultaneamente
 - Suposto instante zero na análise

Análise do Tempo de Resposta 4/16

- Seja T_j uma tarefa com prioridade maior que T_i
- Quantas vezes T_j pode acontecer durante a execução de T_i ?

$$\left[\frac{R_i}{P_j} \right]$$

- Qual a interferência total de T_j sobre T_i ?

$$\left[\frac{R_i}{P_j} \right] \times C_j$$

- Qual a interferência total sobre T_i ?

$$\sum_{j \in \text{hp}(i)} \left[\frac{R_i}{P_j} \right] \times C_j$$

Análise do Tempo de Resposta 5/16

- O tempo máximo de resposta de T_i é $R_i = C_i + I_i$

$$R_i = C_i + \sum_{j \in \text{hp}(i)} \left\lceil \frac{R_i}{P_j} \right\rceil \times C_j$$

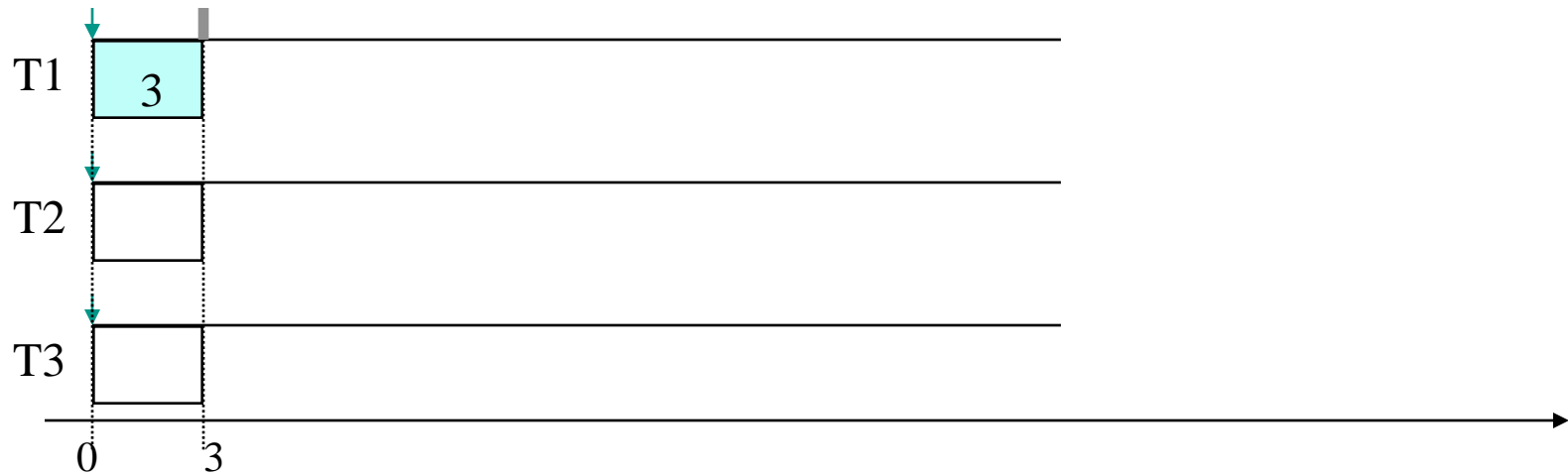
- Equação é recursiva
- Calculada através de iterações sucessivas, até:
 - Tempo de resposta passar do deadline
 - Resultado convergir, iteração $x+1$ igual a iteração x

$$w_i^{x+1} = C_i + \sum_{j \in \text{hp}(i)} \left\lceil \frac{w_i^x}{P_j} \right\rceil \times C_j \quad w_i^0 = C_i$$

Análise do Tempo de Resposta 6/16

- Exemplo:

	T1	T2	T3
– Períodos	$P1=7$	$P2=12$	$P3=20$
– Computação	$C1=3$	$C2=3$	$C3=5$
– Prioridades		$p1=1$	$p2=2$ $p3=3$
- $R1 = C1 = 3$



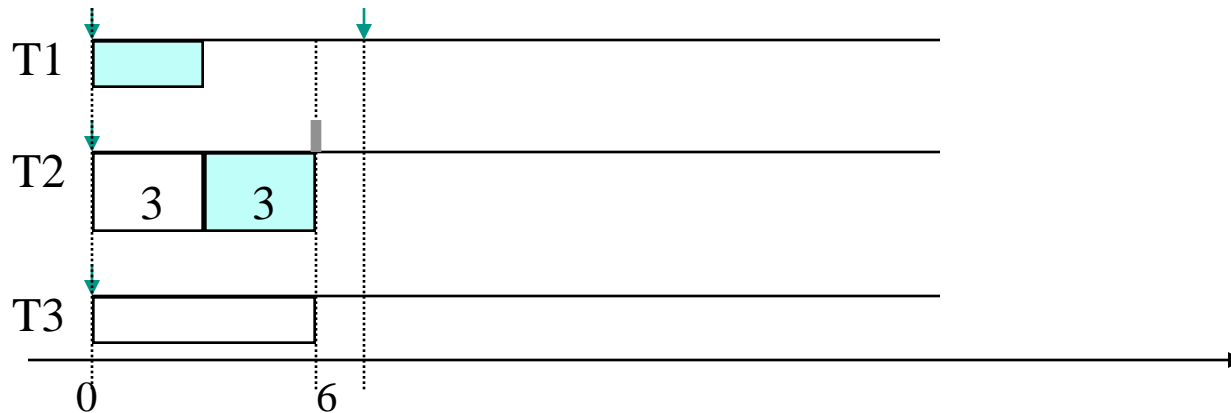
Análise do Tempo de Resposta 7/16

- Análise da tarefa T2:

$$w_2^0 = C_2 = 3$$

$$w_2^1 = C_2 + \left\lceil \frac{w_2^0}{P_1} \right\rceil \times C_1 = 3 + \left\lceil \frac{3}{7} \right\rceil \times 3 = 6$$

$$w_2^2 = C_2 + \left\lceil \frac{w_2^1}{P_1} \right\rceil \times C_1 = 3 + \left\lceil \frac{6}{7} \right\rceil \times 3 = 6$$



Análise do Tempo de Resposta 8/16

- Análise da Tarefa T3:

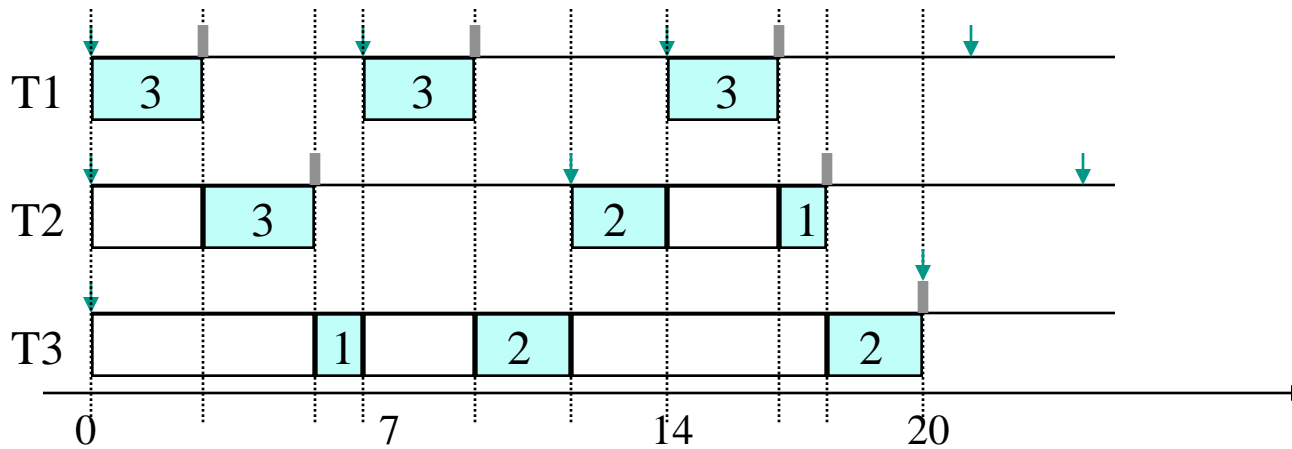
$$w_3^0 = C_3 = 5$$

$$w_3^1 = C_3 + \sum_{j \in \text{hp}(3)} \left\lceil \frac{w_3^0}{P_j} \right\rceil \times C_j = 5 + \left\lceil \frac{5}{7} \right\rceil \times 3 + \left\lceil \frac{5}{12} \right\rceil \times 3 = 11$$

$$w_3^2 = 5 + \left\lceil \frac{11}{7} \right\rceil \times 3 + \left\lceil \frac{11}{12} \right\rceil \times 3 = 14 \quad w_3^3 = 5 + \left\lceil \frac{14}{7} \right\rceil \times 3 + \left\lceil \frac{14}{12} \right\rceil \times 3 = 17$$

$$w_3^4 = 5 + \left\lceil \frac{17}{7} \right\rceil \times 3 + \left\lceil \frac{17}{12} \right\rceil \times 3 = 20 \quad w_3^5 = 5 + \left\lceil \frac{20}{7} \right\rceil \times 3 + \left\lceil \frac{20}{12} \right\rceil \times 3 = 20$$

Análise do Tempo de Resposta 9/16



- Exemplo:

	T1	T2	T3
– Períodos	P1=7	P2=12	P3=20
– Computação	C1=3	C2=3	C3=5
– Prioridades	p1=1	p2=2	p3=3
– Tempo Máximo de Resposta	R1=3	R2=6	R3=20

- Análise do Tempo de Resposta
- Análise do Tempo de Resposta – Modelo Estendido
- Release Jitter
- Bloqueio
- Chaveamento de Contexto
- Níveis Insuficientes de Prioridade
- Atribuição Ótima de Prioridades
- Considerações sobre Análise do Tempo de Resposta



Estimação do Tempo de Resposta usando Análise



Fundamentos dos Sistemas de Tempo Real
2ª Edição

Rômulo Silva de Oliveira
Edição do Autor, 2020

www.romulosilvadeoliveira.eng.br/livrotemporeal

Escalonamento em Sistema de Tempo Real

Parte II: Política de Atribuição de Prioridades

Fundamentos
dos Sistemas
de
Tempo Real

RÔMULO SILVA DE OLIVEIRA



Análise do Tempo de Resposta 10/16

● Exemplo:	T1	T2	T3
– Períodos	P1=2	P2=4	P3=8
– Computação	C1=1	C2=1	C3=2
– Utilização	U1=0.500	U2=0.250	U3=0.250
– Prioridades	p1=1	p2=2	p3=3

- Utilização total é 1, acima do limiar 0.780
mas conjunto é escalonável
- Aplicando o cálculo do tempo de resposta temos
- Análise da tarefa T1:

$$R1 = C1 = 1$$

Análise do Tempo de Resposta 11/16

● Exemplo:	T1	T2	T3
– Períodos	P1=2	P2=4	P3=8
– Computação	C1=1	C2=1	C3=2
– Utilização	U1=0.500	U2=0.250	U3=0.250
– Prioridades	p1=1	p2=2	p3=3

● Análise da tarefa T2:

$$w_2^0 = C_2 = 1$$

$$w_2^1 = C_2 + \left[\frac{w_2^0}{P_1} \right] \times C_1 = 1 + \left[\frac{1}{7} \right] \times 1 = 2$$

$$w_2^2 = C_2 + \left[\frac{w_2^1}{P_1} \right] \times C_1 = 1 + \left[\frac{2}{7} \right] \times 1 = 2$$

Análise do Tempo de Resposta 12/16

● Exemplo:	T1	T2	T3
– Períodos	P1=2	P2=4	P3=8
– Computação	C1=1	C2=1	C3=2
– Utilização	U1=0.500	U2=0.250	U3=0.250
– Prioridades	p1=1	p2=2	p3=3

- Análise da Tarefa T3:

$$w_3^0 = C_3 = 2$$

$$w_3^1 = C_3 + \sum_{j \in hp(3)} \left\lceil \frac{w_3^0}{P_j} \right\rceil \times C_j = 2 + \left\lceil \frac{2}{2} \right\rceil \times 1 + \left\lceil \frac{2}{4} \right\rceil \times 1 = 4$$

$$w_3^2 = 2 + \left\lceil \frac{4}{2} \right\rceil \times 1 + \left\lceil \frac{4}{4} \right\rceil \times 1 = 5$$

$$w_3^3 = 2 + \left\lceil \frac{5}{2} \right\rceil \times 1 + \left\lceil \frac{5}{4} \right\rceil \times 1 = 7$$

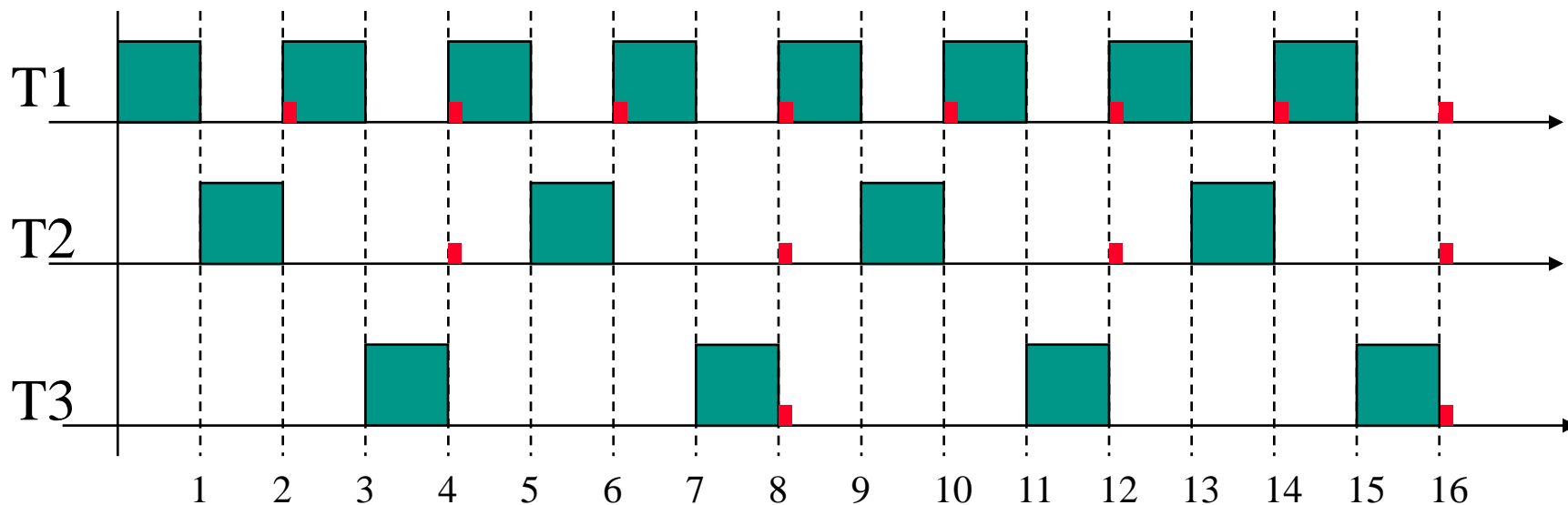
$$w_3^4 = 2 + \left\lceil \frac{7}{2} \right\rceil \times 1 + \left\lceil \frac{7}{4} \right\rceil \times 1 = 8$$

$$w_3^5 = 2 + \left\lceil \frac{8}{2} \right\rceil \times 1 + \left\lceil \frac{8}{4} \right\rceil \times 1 = 8$$

Análise do Tempo de Resposta 13/16

- Exemplo:

	T1	T2	T3
– Períodos	$P1=2$	$P2=4$	$P3=8$
– Computação	$C1=1$	$C2=1$	$C3=2$
– Utilização	$U1=0.500$	$U2=0.250$	$U3=0.250$
– Prioridades	$p1=1$	$p2=2$	$p3=3$
– Resposta	$R1=1$	$R2=2$	$R3=8$
- Utilização total é 1, acima do limiar 0.780, mas conjunto é escalonável



Análise do Tempo de Resposta 14/16

- Teste de escalonabilidade **exato** (suficiente e necessário)
- Deadline pode ser menor que o período
 - Basta comparar o tempo de resposta com o deadline
- Deadline maior que o período exige análise mais complexa
 - Tarefa pode interferir com ela mesma
- Tarefas esporádicas podem ser tratadas como periódicas
 - Intervalo mínimo entre ativações é usado como período
- A forma como prioridades são atribuídas **NÃO** é importante
 - Funciona pois “ $hp(i)$ ” sempre indica as tarefas mais prioritárias do que a tarefa “ i ”

Análise do Tempo de Resposta 15/16

- Quanto menor o deadline, maior a prioridade
- Ótimo quando deadline é menor ou igual ao período
- Exemplo:

– Tarefas	T1	T2	T3	T4
– Períodos	P1=20	P2=15	P3=10	P4=20
– WCET	C1=3	C2=3	C3=4	C4=3
– Deadline	D1=5	D2=7	D3=10	D4=20
– Prioridades	p1=1	p2=2	p3=3	p4=4
– Tempo máximo de resposta	R1=3	R2=6	R3=10	R4=20
– Caso fosse RM	R1=10	R2=7	R3=4	R4=20

Análise do Tempo de Resposta 16/16

- Deadline monotonic (DM) será ótimo se qualquer conjunto de tarefas Q , o qual é escalonável por uma política de atribuição de prioridades W , também for escalonável por DM
- Pode-se provar a optimalidade de DM através da transformação das prioridades de Q (atribuídas por W) até que a ordenação seja aquela do DM
 - Desde que cada passo da transformação preserve a escalonabilidade
- Leung & Whitehead, 1982

- Análise do Tempo de Resposta
- Análise do Tempo de Resposta – Modelo Estendido
- Release Jitter
- Bloqueio
- Chaveamento de Contexto
- Níveis Insuficientes de Prioridade
- Atribuição Ótima de Prioridades
- Considerações sobre Análise do Tempo de Resposta



Estimação do Tempo de Resposta usando Análise



Fundamentos dos Sistemas de Tempo Real
2ª Edição

Rômulo Silva de Oliveira
Edição do Autor, 2020

www.romulosilvadeoliveira.eng.br/livrotemporeal

Escalonamento em Sistema de Tempo Real

Parte III: Estendendo o Modelo

Fundamentos
dos Sistemas
de
Tempo Real

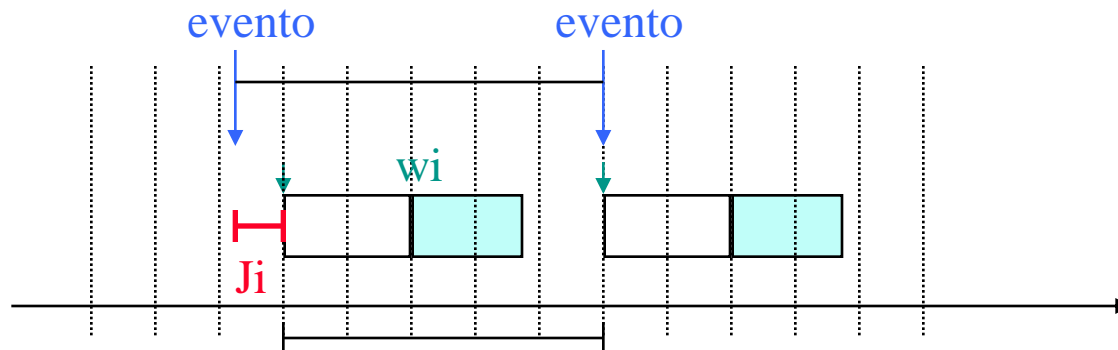
RÔMULO SILVA DE OLIVEIRA



Análise do Tempo de Resposta – Modelo Estendido 1/1

- Equação supõe um conjunto de premissas (modelo de tarefas)
 - Tarefas são periódicas ou esporádicas
 - $D \leq P$
 - Tarefas são independentes
 - Não existe qualquer tipo de overhead do sistema
 - Qualquer atribuição de prioridade fixa pode ser usada
 - A tarefa está apta no momento que chega (início do período)
 - Não existem recursos compartilhados
 - Tarefas podem ser preemptadas a qualquer momento
- Este modelo de tarefas é simples
- Não corresponde à realidade da maioria dos sistemas
- Como estender a análise do tempo de resposta para lidar com modelos de tarefas mais realistas (mais complexos) ?

- Suponha uma tarefa periódica
 - Início do período é indicado por interrupção do timer em hardware
 - Mas interrupções ficam desabilitadas por um tempo x
 - Haverá um atraso de x entre chegada e liberação da tarefa
- Suponha uma tarefa esporádica liberada por evento externo
 - Eventos podem ser amostrados periodicamente
 - Liberação da tarefa será atrasada em relação à ocorrência do evento
- **Release Jitter:** Atraso entre a chegada da tarefa e a sua liberação
 - Liberação significa inclusão na fila de aptos, passa a disputar processador



- Seja J_i o release jitter máximo que a tarefa T_i pode experimentar
- Como incluir este termo nas equações do tempo de resposta ?

$$R_i = J_i + w_i$$

$$w_i = C_i + \sum_{j \in hp(i)} \left\lceil \frac{w_i + J_j}{P_j} \right\rceil \times C_j$$

- Podem ocorrer bloqueios devido a relações de exclusão mútua
 - Estruturas de dados compartilhadas
 - Dispositivos compartilhados
- Suponha T1 e T2, T1 com maior prioridade
- Se T2 fica esperando por T1
 - Ok, T1 tem mesmo prioridade superior, é interferência normal
- Se T1 fica esperando por T2, é dito que T1 foi **bloqueada** por T2
- Cálculo do tempo de resposta deve incluir o tempo total de bloqueio máximo B_i

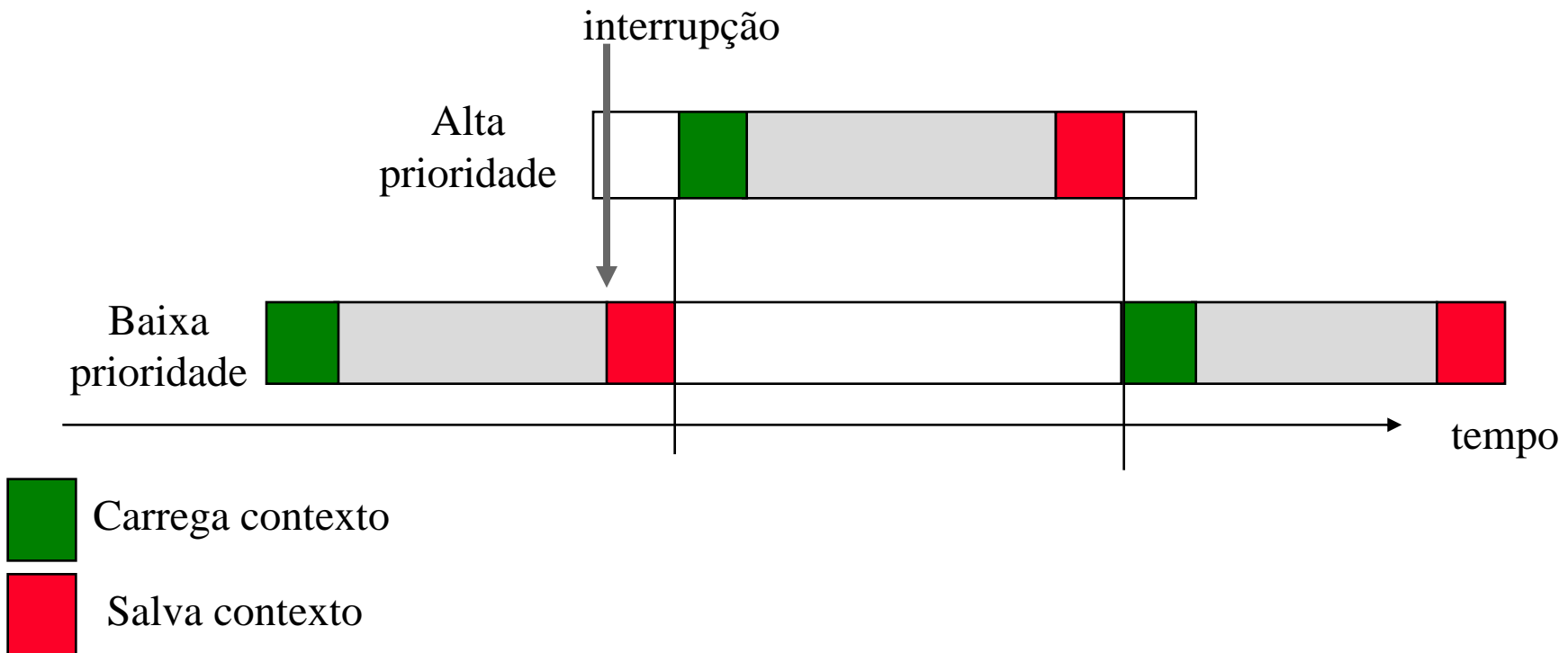
$$w_i = C_i + B_i + \sum_{j \in \text{hp}(i)} \left\lceil \frac{w_i + J_j}{P_j} \right\rceil \times C_j$$

$$R_i = J_i + w_i$$

- Interferência:
 - Tarefa de alta prioridade atrapalha a tarefa de baixa prioridade
- Bloqueio
 - Tarefa de baixa prioridade atrapalha a tarefa de alta prioridade
- Como calcular B_i ?
 - Complexo
 - Depende de como os recursos são gerenciados
 - Existem protocolos específicos para sistemas de tempo real
 - Aula específica sobre isto

Chaveamento de Contexto 1/1

- Toda tarefa precisa incluir no seu C a carga do contexto
- Se a tarefa T_i é preemptada por outra
 - Interferência sofrida por T_i inclui o tempo de chaveamento de contexto
 - Na verdade dois chaveamentos de contexto



Níveis insuficientes de prioridades 1/1

- Caso existam mais tarefas do que níveis de prioridade
 - Desempate é arbitrário, frequentemente FIFO na fila de aptos
- Exemplo:
 - Tarefas T1, T2 e T3
- Com **3 níveis de prioridade** (T1 / T2 / T3)
 - Tarefa T1 interfere com T2 e T3
 - Tarefa T2 interfere com T3
- Com **2 níveis de prioridade** (T1 / T2&T3)
 - Tarefa T1 interfere com T2 e T3
 - Tarefa T2 interfere com T3
 - Tarefa T3 interfere com T2
- Escalonabilidade do sistema foi reduzida
- Na análise de T2, considerar T3 como geradora de interferência

Atribuição Ótima de Prioridades 1/1

- Com as extensões do modelo, DM não é mais ótimo
- É possível provar que:
 - Se uma tarefa T recebe a menor prioridade e é escalonável então,
 - Se uma ordenação escalonável de prioridades existe para todo o conjunto de tarefas
 - Uma ordenação existe com a tarefa T recebendo a prioridade mais baixa
 - Melhora para todas as outras, só piora para T, e mesmo assim T é escalonável

Para cada nível de prioridade k , de baixo para cima {

Para cada task τ sem prioridade ainda {

Se τ for escalonável no nível k {

Tarefa τ recebe a prioridade k

Continua laço externo

}

Retorna não escalonável

}

Retorna escalonável

}

Considerações sobre Análise do Tempo de Resposta 1/2

- Mesmo em sistemas onde a análise do tempo de resposta não pode ser aplicada de forma garantida ela ainda é útil
- Aproximação quando o valor do WCET é aproximado
- Aproximação quando o modelo de tarefas não cobre todos os aspectos do hardware e software reais
- Ri obtido deve ser considerado apenas como um valor aproximado e otimista
- Aspecto mais importante:

Fornecer uma infraestrutura conceitual para que o desenvolvedor possa refletir sobre o comportamento temporal do seu sistema
- Tempo de resposta é composto por vários componentes bem distintos
 - Desenvolvedor pode melhor identificar as origens dos atrasos

Considerações sobre Análise do Tempo de Resposta 2/2

- É importante destacar que os valores de WCRT calculados são tempos de resposta no pior caso
- Ou seja, é necessário que tudo ocorra da pior maneira possível
 - e ao mesmo tempo
 - para que este valor seja observado
- A probabilidade disto tudo ser observado simultaneamente na prática é em geral baixíssima.
- Mesmo que sejam feitas medições extensivas dos tempos de resposta
 - Provavelmente o maior valor medido será bem menor que o WCRT calculado

- Análise do Tempo de Resposta
- Análise do Tempo de Resposta – Modelo Estendido
- Release Jitter
- Bloqueio
- Chaveamento de Contexto
- Níveis Insuficientes de Prioridade
- Atribuição Ótima de Prioridades
- Considerações sobre Análise do Tempo de Resposta

