

Sistemas de Tempo Real: Extensões da Análise para Prioridades Fixas

Rômulo Silva de Oliveira
Departamento de Automação e Sistemas - DAS – UFSC

romulo@das.ufsc.br
http://www.das.ufsc.br/~romulo
Maio/2011

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2011

Modelo de Tarefas Estendido

- Release Jitter
- Bloqueio
- Pontos de Preempção
- Tolerância a Faltas
- Chaveamento de Contexto
- Níveis insuficientes de prioridade
- Deadlines arbitrários
- Atribuição Ótima de Prioridades

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2011

Prioridade Fixa – Análise do Tempo de Resposta

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

$$R_i = C_i + \sum_{j \in hp(i)} \frac{R_j}{P_j} \times C_j$$

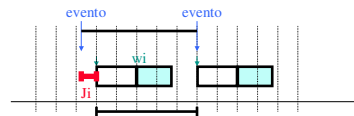
- Equação é recursiva
- Calculada através de iterações sucessivas, até:
 - Tempo de resposta passar do deadline
 - Resultado convergir, iteração $x+1$ igual a iteração x

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

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2011

Release Jitter 1/2

- 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



Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2011

Prioridade Fixa – Análise do Tempo de Resposta

- Equação supõe um conjunto de premissas (modelo de tarefas)
 - Tarefas são periódicas ou esporádicas
 - $D \ll P$
 - 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) ?

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2011

Release Jitter 2/2

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

$$R_i = J_i + w_i$$

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

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2011

Bloqueio 1/2

- 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

$$w_i = C_i + B_i + \sum_{j \in hp(i)} \frac{w_i + J_j}{P_j} \times C_j$$
$$R_i = J_i + w_i$$

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2011

Pontos de Preempção 2/2

- Uma tarefa T_i não sofre interferência durante o seu último segmento de código (duração F_i)
- Mas este último segmento de código precisa ser executado
- Ela sofre bloqueio B_{MAX} devido a segmento não preemptável de tarefa de mais baixa prioridade

$$w_i^{n+1} = B_{MAX} + C_i - F_i + \sum_{j \in hp(i)} \frac{w_i^n}{P_j} \times C_j$$

$$R_i = w_i^n + F_i$$

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2011

Bloqueio 2/2

- 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

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2011

Tolerância a Falhas 1/4

- Quando uma falta é detectada
 - É possível executar um tratador de exceção ou um bloco de recuperação
 - Trazer o sistema para um estado correto, tolerando assim a falta
 - Mas isto significa computações extras
- Em sistemas de tempo real tolerantes a falhas
 - deadlines precisam ser garantidos
 - mesmo na presença de um certo nível de falhas
- O nível de tolerância a falhas é conhecido como “modelo de falhas”
- Seja o tempo de computação extra requerido pelo tratador de exceção de uma falta cometida pela tarefa T_i designado por C_i^f
- Seja $hep(i)$ o conjunto de tratadores de exceção com prioridade igual ou superior à tarefa T_i

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2011

Pontos de Preempção 1/2

- Escalonamento preemptivo exige mecanismos de sincronização
 - Proteção de seções críticas com mutexes, etc
- Possível usar escalonamento não preemptivo, mas
 - Tarefas longas vão atrasar todas as demais
- Solução intermediária: Pontos de Preempção
 - Também chamado de “Preempção Cooperativa” ou “Preempção Postergada”
- Código é em geral não preemptivo
- Programador informa pontos onde é seguro chavear o contexto
- Exclusão Mútua automática entre pontos de preempção
 - Para um único processador
- Preserva cache da tarefa executando, facilita cálculo do WCET

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2011

Tolerância a Falhas 2/4

- Seja o tempo de computação extra requerido pelo tratador de exceção de uma falta cometida pela tarefa T_i designado por C_i^f
- Seja $hep(i)$ o conjunto de tratadores de exceção com prioridade igual ou superior à tarefa T_i
- Tempo de resposta caso apenas uma falta seja tolerada

$$R_i = C_i + B_i + \sum_{j \in hp(i)} \frac{R_j}{P_j} \times C_j + \max_{k \in hep(i)} C_k^f$$

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2011

Tolerância a Falhas 3/4

- Se F é o número de falhas toleradas

$$R_i = C_i + B_i + \sum_{j \in hp(i)} \frac{R_j}{P_j} C_j + F \times \max_{k \in hp(i)} C_k^f$$

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

Tolerância a Falhas 4/4

- Se existe um intervalo mínimo F entre a ocorrência de falhas

$$R_i = C_i + B_i + \sum_{j \in hp(i)} \frac{R_j}{P_j} C_j + \max_{k \in hp(i)} \frac{R_k}{F} C_k^f$$

- Se existe um intervalo mínimo I_i entre a ocorrência de falhas da tarefa T_i

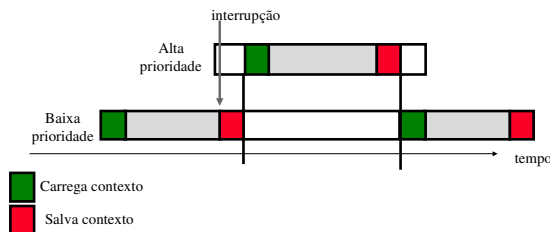
$$R_i = C_i + B_i + \sum_{j \in hp(i)} \frac{R_j}{P_j} C_j + \max_{k \in hp(i)} \frac{R_k}{I_k} C_k^f$$

Deadlines Arbitrários 1/17

- Lidam com situações onde D (e possivelmente R) > P
- Ativação [q] de T_i pode ser atrapalhada (sofrer interferência) da ativação [q-1]
 - A qual ainda não terminou quando a ativação [q] é liberada
- Job é usado como sinônimo de ativação
- Não é possível saber a princípio se o pior caso da tarefa vai ocorrer no job 0, no job 1, no job 2, etc
- Por exemplo, se C_i > P_i, os tempos de resposta crescem para sempre
- Mas se R_i < P_i, o pior caso acontece no job 0

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



Deadlines Arbitrários 2/17

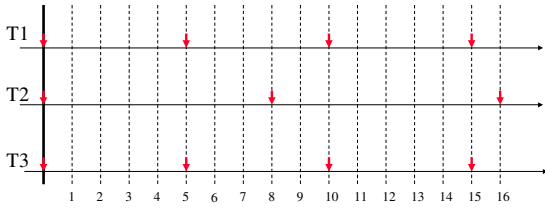
- Exemplo:

- T1:	P1=5	C1=1	D1=5	R1 = ?
- T2:	P2=8	C2=3	D2=8	R2 = ?
- T3:	P3=5	C3=2	D3=20	R3 = ?
- Para R1 e R2 trata-se de um sistema usual
- R1 = 1
- R2 = 3 + 1 = 4
- R3 = ?

Deadlines Arbitrários 3/17

• Exemplo:

- T1: P1=5 C1=1 D1=5
- T2: P2=8 C2=3 D2=8
- T3: P3=5 C3=1 D3=20

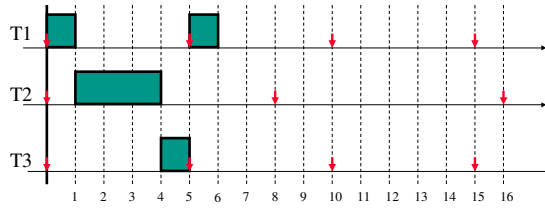


Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2019

Deadlines Arbitrários 6/17

• Exemplo:

- T1: P1=5 C1=1 D1=5
- T2: P2=8 C2=3 D2=8
- T3: P3=5 C3=1 D3=20

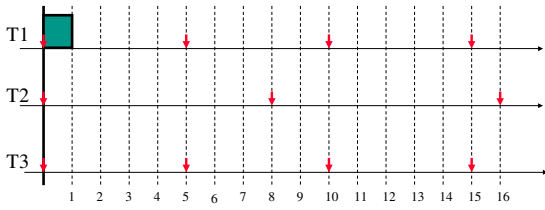


Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2022

Deadlines Arbitrários 4/17

• Exemplo:

- T1: P1=5 C1=1 D1=5
- T2: P2=8 C2=3 D2=8
- T3: P3=5 C3=1 D3=20

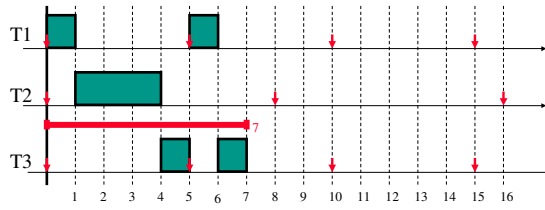


Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2020

Deadlines Arbitrários 7/17

• Exemplo:

- T1: P1=5 C1=1 D1=5
- T2: P2=8 C2=3 D2=8
- T3: P3=5 C3=1 D3=20

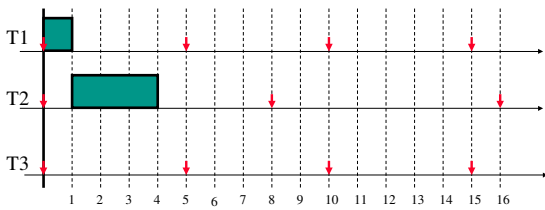


Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2023

Deadlines Arbitrários 5/17

• Exemplo:

- T1: P1=5 C1=1 D1=5
- T2: P2=8 C2=3 D2=8
- T3: P3=5 C3=1 D3=20

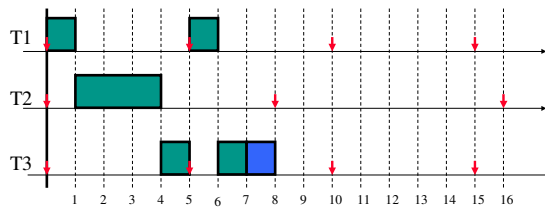


Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2021

Deadlines Arbitrários 8/17

• Exemplo:

- T1: P1=5 C1=1 D1=5
- T2: P2=8 C2=3 D2=8
- T3: P3=5 C3=1 D3=20

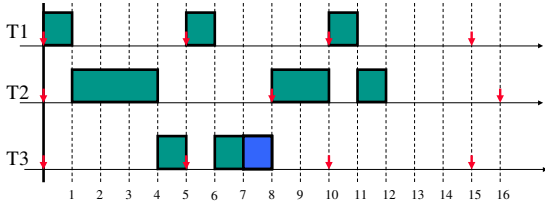


Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2024

Deadlines Arbitrários 9/17

• Exemplo:

- T1: P1=5 C1=1 D1=5
- T2: P2=8 C2=3 D2=8
- T3: P3=5 C3=1 D3=20

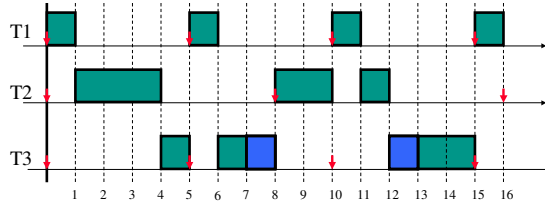


Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2025

Deadlines Arbitrários 12/17

• Exemplo:

- T1: P1=5 C1=1 D1=5
- T2: P2=8 C2=3 D2=8
- T3: P3=5 C3=1 D3=20

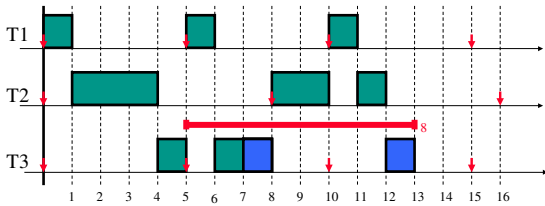


Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2028

Deadlines Arbitrários 10/17

• Exemplo:

- T1: P1=5 C1=1 D1=5
- T2: P2=8 C2=3 D2=8
- T3: P3=5 C3=1 D3=20

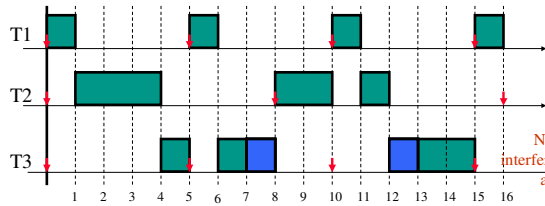


Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2026

Deadlines Arbitrários 13/17

• Exemplo:

- T1: P1=5 C1=1 D1=5
- T2: P2=8 C2=3 D2=8
- T3: P3=5 C3=1 D3=20

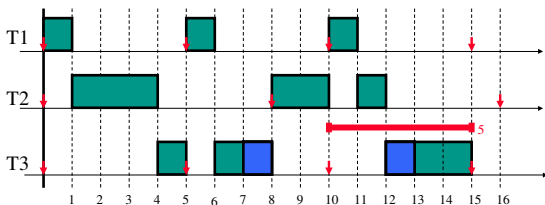


Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2029

Deadlines Arbitrários 11/17

• Exemplo:

- T1: P1=5 C1=1 D1=5
- T2: P2=8 C2=3 D2=8
- T3: P3=5 C3=1 D3=20



Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2027

Deadlines Arbitrários 14/17

• Exemplo:

- T1: P1=5 C1=1 D1=5 R1 = ?
- T2: P2=8 C2=3 D2=8 R2 = ?
- T3: P3=5 C3=2 D3=20 R3 = ?

• Para R3, a partir do instante crítico, temos 3 situações

- $W3(0) = 7$ $R3(0) = W3(0) = 7$
 - A partir do instante crítico atende uma demanda de $(0 + 1) \times C3$
- $W3(1) = 13$ $R3(1) = W3(1) - P3 = 13 - 5 = 8$
 - A partir do instante crítico atende uma demanda de $(1 + 1) \times C3$
- $W3(2) = 15$ $R3(2) = W3(2) - 2 \times P3 = 15 - 10 = 5$
 - A partir do instante crítico atende uma demanda de $(2 + 1) \times C3$

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2030

Deadlines Arbitrários 15/17

• Exemplo:

- T1: P1=5 C1=1 D1=5 R1 = ?
- T2: P2=8 C2=3 D2=8 R2 = ?
- T3: P3=5 C3=2 D3=20 R3 = ?

• Para R3, a partir do instante crítico, temos 3 situações

- W3(0) = 7 R3(0) = W3(0) = 7
 - A partir do instante crítico atende uma demanda de (0 + 1) × C3
- W3(1) = 13 R3(1) = W3(1) - P3 = 13 - 5 = 8 **máximo!**
 - A partir do instante crítico atende uma demanda de (1 + 1) × C3
- W3(2) = 15 R3(2) = W3(2) - 2×P3 = 15 - 10 = 5
 - A partir do instante crítico atende uma demanda de (2 + 1) × C3

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

```

for k in 1..N {
  for x in k..N {
    Swap(Set, k, x);
    Process_Test(Set, k, ok);
    if(ok) break;
  }
  if(!ok) return -1; //não encontrou solução
}
    
```

Deadlines Arbitrários 16/17

$$w_i^{n+1}(q) = B_i + (q + 1)C_i + \sum_{j \in hp(i)} \frac{w_j^n(q)}{P_j} C_j$$

$$R_i(q) = w_i^n(q) - qP_i$$

- O número de liberações é limitado pelo menor valor de q para o qual a seguinte relação é verdadeira $R_i(q) \leq P_i$
 - A ativação q+1 não sofrerá interferência da ativação q pois esta acabou antes de Pi
- O tempo de resposta no pior caso é então o máximo valor encontrado para cada q

$$R_i = \max_{q=0,1,2,\dots} R_i(q)$$

Resumo

- Análise do tempo de resposta para prioridades fixas pode ser estendida
- Objetivo é analisar modelos de tarefas mais realistas
 - Mais complexos
- Foram citadas extensões para lidar com
 - Release jitter
 - Bloqueio
 - Pontos de Preempção
 - Tolerância a Falhas
 - Chaveamento de Contexto
 - Níveis insuficientes de prioridades
 - Deadlines arbitrários
 - Atribuição Ótima de Prioridades

Deadlines Arbitrários 17/17

- A inclusão de release jitter é similar ao caso D <= P

$$w_i^{n+1}(q) = B_i + (q + 1)C_i + \sum_{j \in hp(i)} \frac{w_j^n(q) + J_j}{P_j} C_j$$

$$R_i(q) = w_i^n(q) - qP_i + J_i$$