

## Sistemas de Tempo Real: Prioridades com Teste de Escalonabilidade

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

romulo@das.ufsc.br  
<http://www.das.ufsc.br/~romulo>  
Junho/2010

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, junho/2010 1

## Prioridades + Teste de Escalonabilidade

- Cada tarefa recebe uma prioridade
- Escalonamento em geral é preemptivo
- Teste realizado antes da execução determina escalonabilidade
  - Teste considera como são as tarefas (modelo de tarefas)
    - Periódica, esporádica,  $D \leq P$ , bloqueios, etc
  - Teste considera forma como prioridades são atribuídas
  - Validade do teste é demonstrada como teorema
  - Complexidade do teste depende do modelo de tarefas
- Na execução:
  - Escalonador dispara as tarefas conforme as prioridades

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, junho/2010 2

## Prioridade com Teste de Escalonabilidade

- Teste baseado em Utilização

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, junho/2010 3

## Teste baseado na Utilização

- Utilização de uma tarefa:
  - Tempo máximo de computação dividido pelo período
  - Exemplo: T1 tem  $C1=12$  e  $P1=50$ , então  $U1 = 12 / 50 = 0.24$
- Utilização do sistema
  - Somatório da utilização de todas as tarefas
- Dado
  - Um modelo de tarefas
  - Uma política de atribuição de prioridades
- Existe um limiar de utilização para o processador, de tal sorte que:
  - Se a utilização do processador for menor que o limiar
  - Então jamais um deadline será perdido
- Limiar demonstrado como teorema

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, junho/2010 4

## Prioridade com Teste de Escalonabilidade

- Teste baseado em Utilização
  - Prioridades variáveis

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, junho/2010 5

## Prioridades Variáveis – Introdução

- Cada tarefa recebe uma prioridade que varia ao longo do tempo
- Prioridade leva em conta informações relativas à execução
- Diferentes jobs da mesma tarefa podem receber prioridades diferentes
- Cada Job em particular pode receber prioridade fixa ou variável
  
- A escala de execução só é conhecida durante a execução
  
- Necessário Teste de Escalonabilidade
  - Para saber antes se todos os deadlines estão garantidos ou não

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, junho/2010 6

### Prioridades Variáveis - Introdução

- **EDF – Earliest Deadline First**
  - Inversamente proporcional ao deadline absoluto
  - Ótimo em relação aos critérios de prioridades variáveis
- **LSF (LST ou LLF) – Least Slack First**
  - Inversamente proporcional ao tempo livre (*laxity* ou *slack*)
  - Ótimo em relação aos critérios de prioridades variáveis
  - Overhead maior que EDF
- **FCFS – First Come First Served**
  - Inversamente proporcional ao tempo de espera por serviço
  - Não é ótimo com respeito ao cumprimento de deadlines
- **EDF é o mais usado**

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, junho/2010 7

### Prioridades Variáveis – Teste para EDF

- Supondo um conjunto de  $n$  tarefas
  - independentes e periódicas
- EDF como política de atribuição de prioridades
- Se  $D=P$ , sistema é escalonável quando:
  - Permite usar 100% do processador mantendo os deadlines
  - Teste exato
$$\sum_{i=1}^N \left( \frac{C_i}{P_i} \right) \leq 1$$
- Se  $D < P$ , sistema é escalonável quando:
  - Teste suficiente
$$\sum_{i=1}^N \left( \frac{C_i}{D_i} \right) \leq 1$$
- Para  $D$  arbitrário, sistema é escalonável quando:
  - Teste suficiente
$$\sum_{i=1}^N \left( \frac{C_i}{\min(D_i, P_i)} \right) \leq 1$$

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, junho/2010 8

### Prioridades Variáveis – Teste para EDF

- Existe grande variedade de testes de escalonabilidade para EDF
- Testes mais complexos
  - São menos pessimistas
  - Porém requerem esforço computacional maior
- EDF
  - As prioridades de todas as tarefas aptas e em execução aumentam
  - de igual modo com o passar do tempo
- Tarefa possui prioridade variável
- Mas um job em particular possui prioridade fixa

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, junho/2010 9

### Prioridades Variáveis – LSF

- **Least Slack First - LSF**
- Quanto menos tempo livre (*slack*), maior a prioridade
- LSF é ótimo quando EDF for ótimo
- Prioridade das tarefas na fila de aptos aumenta com passar do tempo
- Prioridade da tarefa em execução mantém-se constante
  - Gera número maior de chaveamento de contextos que EDF
  - Maior overhead
- **Não apresenta vantagens face a EDF**

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, junho/2010 10

### Prioridades Variáveis – Comentários

- Implementação é mais complexa do que com prioridade fixa
  - Requer um kernel que aceite prioridades variáveis
  - Precisa recalculer o deadline absoluto para cada job
- **Overhead** de execução pode ser elevado caso seja necessária reordenação dinâmica da fila de aptos (depende do algoritmo)
- Instabilidade face a sobrecargas
  - Não é possível saber antecipadamente quais tarefas vão perder deadline
- Escalonabilidade é superior em EDF do que em prioridade fixa
  - Qualquer sistema escalonável com prioridade fixa também será escalonável com EDF
  - O contrário não é verdadeiro
- Entretanto, prioridade fixa é mais usado na prática

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, junho/2010 11

### Prioridade com Teste de Escalonabilidade

- Teste baseado em Utilização
  - Prioridades variáveis
  - **Prioridades fixas**

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, junho/2010 12

### Prioridades Fixas – Introdução

- Aplicação composta por tarefas (processos)
- Estados de uma tarefa:
  - Liberada (pronta para executar, apta, ready)
  - Executando (running)
  - Suspensa esperando pela próxima ativação
  - Outros estados serão acrescentados mais adiante
- Em geral escalonamento é preemptivo
- Tarefas possuem **prioridade fixa** definida em projeto
- Garantia exige
  - Tarefas periódicas ou esporádicas
  - Tempo máximo de computação conhecido
  - Teste de escalonabilidade apropriado

### Prioridades Fixas – Introdução

- Rate Monotonic – RM (Taxa Monotônica)
  - Prioridade mais alta para a tarefa com período menor
  - Prioridade fixa
- Deadline Monotonic – DM (Deadline Monotônico)
  - Prioridade mais alta para a tarefa com deadline relativo menor
  - Prioridade fixa
  - Igual ao RM quando  $D = P$
- Importância
  - Prioridade mais alta para a tarefa mais importante da aplicação
  - Prioridade fixa
- Outras

### Prioridade Fixa – Teste para RM

- RM – Rate Monotonic (Taxa Monotônica)
- Quanto menor o período, mais alta a prioridade
- Ótimo quando
  - Tarefas são periódicas
  - Deadline é sempre igual ao período
- Exemplo:
 

	T1	T2	T3
– Tarefas			
– Períodos	P1=30	P2=40	P3=50
– Prioridades	p1=1	p2=2	p3=3
- Cuidado!
  - Número menor indica prioridade maior
  - Muitas vezes é o contrário

### Prioridade Fixa – Teste para RM

- Utilização de uma tarefa:
  - Tempo máximo de computação dividido pelo período  $U_i = C_i / P_i$
  - T1 tem  $C_1=12$  e  $P_1=50$ , então  $U_1 = C_1 / P_1 = 12 / 50 = 0.24$
- Teste para Rate Monotonic, sistema é escalonável se:

$$\sum_{i=1}^N \left( \frac{C_i}{P_i} \right) \leq N (2^{1/N} - 1)$$

- Para  $N=1$  utilização máxima é 100%
- Para  $N$  grandes utilização máxima tende para 69.3%
- Baseado no conceito de Instante Crítico
- Teste é suficiente mas não necessário

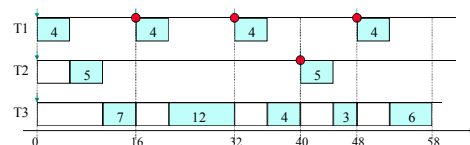
### Prioridade Fixa – Teste para RM

N	Limiar de Utilização
1	100.0%
2	82.8%
3	78.0%
4	75.7%
5	74.3%
10	71.8%
infinito	69.3%

### Prioridade Fixa – Teste para RM

- Exemplo:
 

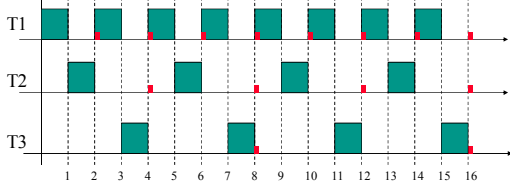
	T1	T2	T3
– Períodos	P1=16	P2=40	P3=80
– Computação	C1=4	C2=5	C3=32
– Utilização	U1=0.250	U2=0.125	U3=0.400
– Prioridades	p1=1	p2=2	p3=3
- Utilização total é 0.775, abaixo do limite 0.780



### Prioridade Fixa – Teste para RM

- 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



### Prioridade com Teste de Escalonabilidade

- Teste baseado em Utilização
  - Prioridades variáveis
  - Prioridades fixas
- EDF versus Prioridade Fixa

### Exemplo escalonabilidade: EDF versus RM

tarefas periódicas	$C_i$	$P_i$	$D_i$
tarifa A	10	20	20
tarifa B	25	50	50

tarifa A:   
 tarifa B:

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{P_i} \leq 1. \quad [3]$$

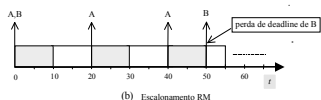
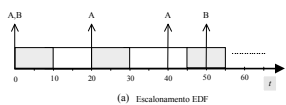
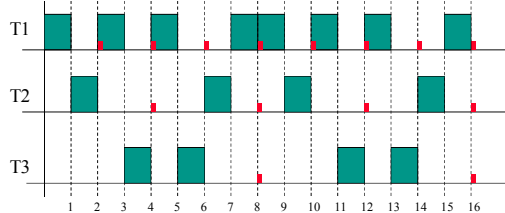


Figura 2.6: Escalas produzidas pelo (a) EDF e (b) RM

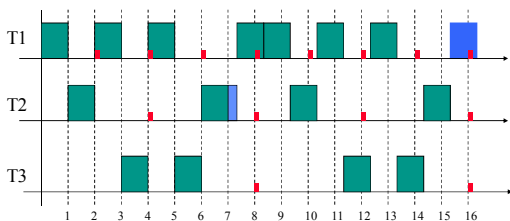
### Exemplo sobrecarga: EDF versus RM

- T1: C1=1 P1=D1=2
- T2: C2=1 P2=D2=4
- T3: C3=2 P3=D3=8
- Execução normal com EDF



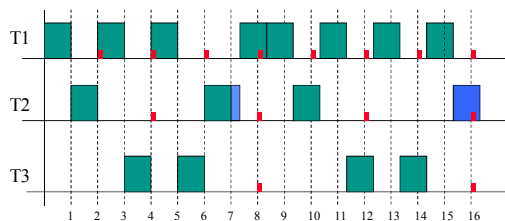
### Exemplo sobrecarga: EDF versus RM

- T1: C1=1 P1=D1=2
- T2: C2=1 P2=D2=4
- T3: C3=2 P3=D3=8
- Sobrecarga devido a falha do projeto com EDF



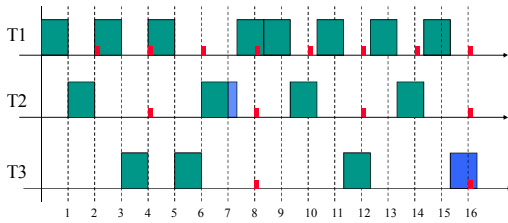
### Exemplo sobrecarga: EDF versus RM

- T1: C1=1 P1=D1=2
- T2: C2=1 P2=D2=4
- T3: C3=2 P3=D3=8
- Sobrecarga devido a falha do projeto com EDF



### Exemplo sobrecarga: EDF versus RM

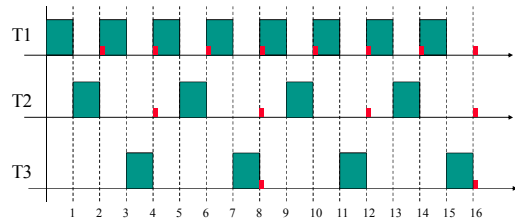
- T1: C1=1 P1=D1=2
- T2: C2=1 P2=D2=4
- T3: C3=2 P3=D3=8
- Sobrecarga devido a falha do projeto com EDF



Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, junho/2010 25

### Exemplo sobrecarga: EDF versus RM

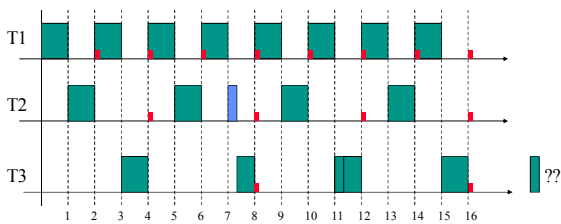
- T1: C1=1 P1=D1=2
- T2: C2=1 P2=D2=4
- T3: C3=2 P3=D3=8
- Execução normal com RM



Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, junho/2010 26

### Exemplo sobrecarga: EDF versus RM

- T1: C1=1 P1=D1=2
- T2: C2=1 P2=D2=4
- T3: C3=2 P3=D3=8
- Sobrecarga devido a falha do projeto com RM



Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, junho/2010 27

### Teste baseado na Utilização – Resumo

- Testes baseados em utilização
  - Não são gerais
  - Não são exatos
  - Mas são rápidos, O(N)
- Exemplo de teste necessário mas não suficiente para este modelo de tarefas

$$\sum_{i=1}^N \left( \frac{C_i}{P_i} \right) \leq 1$$

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, junho/2010 28

### Prioridade com Teste de Escalonabilidade

- Teste baseado em Utilização
  - Prioridades variáveis
  - Prioridades fixas
- EDF versus Prioridade Fixa
- Teste baseado na Análise do Tempo de Resposta

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, junho/2010 29

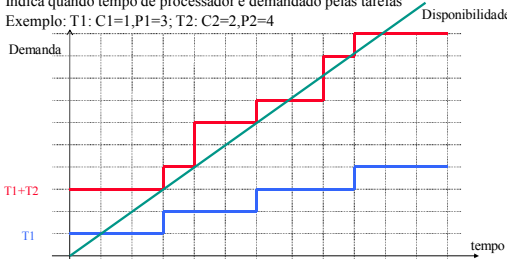
### Teste baseado na Análise do Tempo de Resposta

- 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

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, junho/2010 30

### Teste baseado na Análise do Tempo de Resposta

- 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



### Prioridade Fixa – Análise do Tempo de Resposta

- Como calcular o tempo de resposta de cada tarefa ?
- Para a tarefa mais prioritária temos  $R_i = C_i$
- 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

### Prioridade Fixa – Análise do Tempo de Resposta

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

- Qual a interferência total de  $T_j$  sobre  $T_i$  ?
 
$$\left\lceil \frac{R_i}{P_j} \right\rceil$$
- Qual a interferência total sobre  $T_i$  ?
 
$$\sum_{j \in hp(i)} \left\lceil \frac{R_i}{P_j} \right\rceil \times C_j$$

### Prioridade Fixa – Análise do Tempo de Resposta

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

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

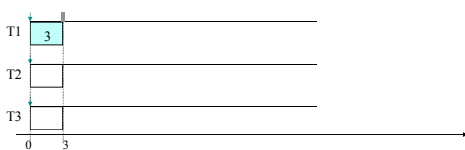
- Equação é recursiva
- Calculada através de iterações sucessivas, até:
  - Tempo de resposta passar do deadline
  - Resultado convergir, iteração  $x+1$  igual a iteração  $x$

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

### Prioridade Fixa – Análise do Tempo de Resposta

- 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
- $R1 = C1 = 3$



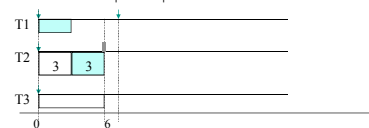
### Prioridade Fixa – Análise do Tempo de Resposta

- Análise da tarefa T2:

$$w_2^0 = C_2 = 3$$

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

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



### Prioridade Fixa – Análise do Tempo de Resposta

- Análise da Tarefa T3:

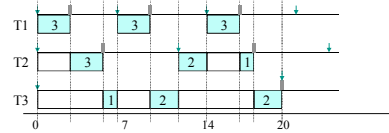
$$w_3^0 = C_3 = 5$$

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

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

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

### Prioridade Fixa – Análise do Tempo de Resposta



- 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

### Prioridade Fixa – Análise do Tempo de Resposta

- 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

### Prioridade Fixa – Análise do Tempo de Resposta

- 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:

$$w_2^0 = C_2 = 1$$

$$w_2^1 = C_2 + \left\lceil \frac{w_2^0}{P_1} \right\rceil \times C_1 = 1 + \left\lceil \frac{1}{2} \right\rceil \times 1 = 2$$

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

### Prioridade Fixa – Análise do Tempo de Resposta

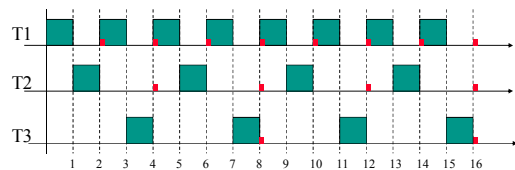
- Exemplo:
 

	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:
  - $w_3^0 = C_3 = 2$
  - $w_3^1 = C_3 + \sum_{j \in hp(3)} \left\lceil \frac{w_3^0}{P_j} \right\rceil \times C_j = 2 + \left\lceil \frac{2}{2} \right\rceil \times 1 + \left\lceil \frac{2}{4} \right\rceil \times 1 = 4$
  - $w_3^2 = 2 + \left\lceil \frac{4}{2} \right\rceil \times 1 + \left\lceil \frac{4}{4} \right\rceil \times 1 = 5$
  - $w_3^3 = 2 + \left\lceil \frac{5}{2} \right\rceil \times 1 + \left\lceil \frac{5}{4} \right\rceil \times 1 = 7$
  - $w_3^4 = 2 + \left\lceil \frac{7}{2} \right\rceil \times 1 + \left\lceil \frac{7}{4} \right\rceil \times 1 = 8$
  - $w_3^5 = 2 + \left\lceil \frac{8}{2} \right\rceil \times 1 + \left\lceil \frac{8}{4} \right\rceil \times 1 = 8$

### Prioridade Fixa – Análise do Tempo de Resposta

- 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



### Prioridade Fixa – Análise do Tempo de Resposta

- Teste de escalabilidade **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”

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, junho/2010 43

### Prioridade Fixa – Deadline Monotonic

- 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

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, junho/2010 44

### Escalonamento com Teste – Resumo

- Cada tarefa recebe uma prioridade fixa
- Teste é desenvolvido para examinar a escalabilidade
- Dois tipos de análise
- **Análise da Utilização**
  - Utiliza o valor C/P
- **Análise do Tempo de Resposta**
  - Tenta calcular o tempo de resposta no pior caso

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, junho/2010 45

### Escalonamento com Teste – Resumo

- Prioridades + Teste de Escalonabilidade
  - Prioridades Variáveis com Teste de Escalonabilidade
  - Prioridades Fixas com Teste de Escalonabilidade
- Todos são capazes de garantir deadlines
  - Executivo cíclico é menos flexível porém oferece determinismo de escala
  - EDF oferece escalabilidade superior em relação à prioridade fixa, porém é caótico em sobrecarga e análise é mais complexa
  - Prioridade fixa permite estender mais facilmente a análise de escalabilidade

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, junho/2010 46