
Seções Críticas em Sistemas de Tempo Real



Fundamentos dos Sistemas de Tempo Real
2ª Edição

Rômulo Silva de Oliveira
Edição do Autor, 2020

www.romulosilvadeoliveira.eng.br/livrotemporeal

É possível melhorar o mutex para uso em sistemas de tempo real ?

Seções Críticas em Sistemas de Tempo Real

Parte I: Descrição do Problema



- Processador é o recurso mais importante
 - Mais essencial
- Outros recursos também são usados
 - Canais de comunicação
 - Estruturas de dados
 - Arquivos
- Necessidade de alocar e liberar tais recursos
 - Exigem exclusão mútua no acesso

- Existem várias questões a serem tratadas:
- Quando e sob quais condições os pedidos de recursos são atendidos ?
- Como são escalonados os jobs que estão esperando por um dado recurso ?
- Quanto tempo uma dada tarefa precisa esperar até conseguir acessar um dado recurso ?
- Como a existência de recursos outros além do processador afeta a escalonabilidade do sistema ?

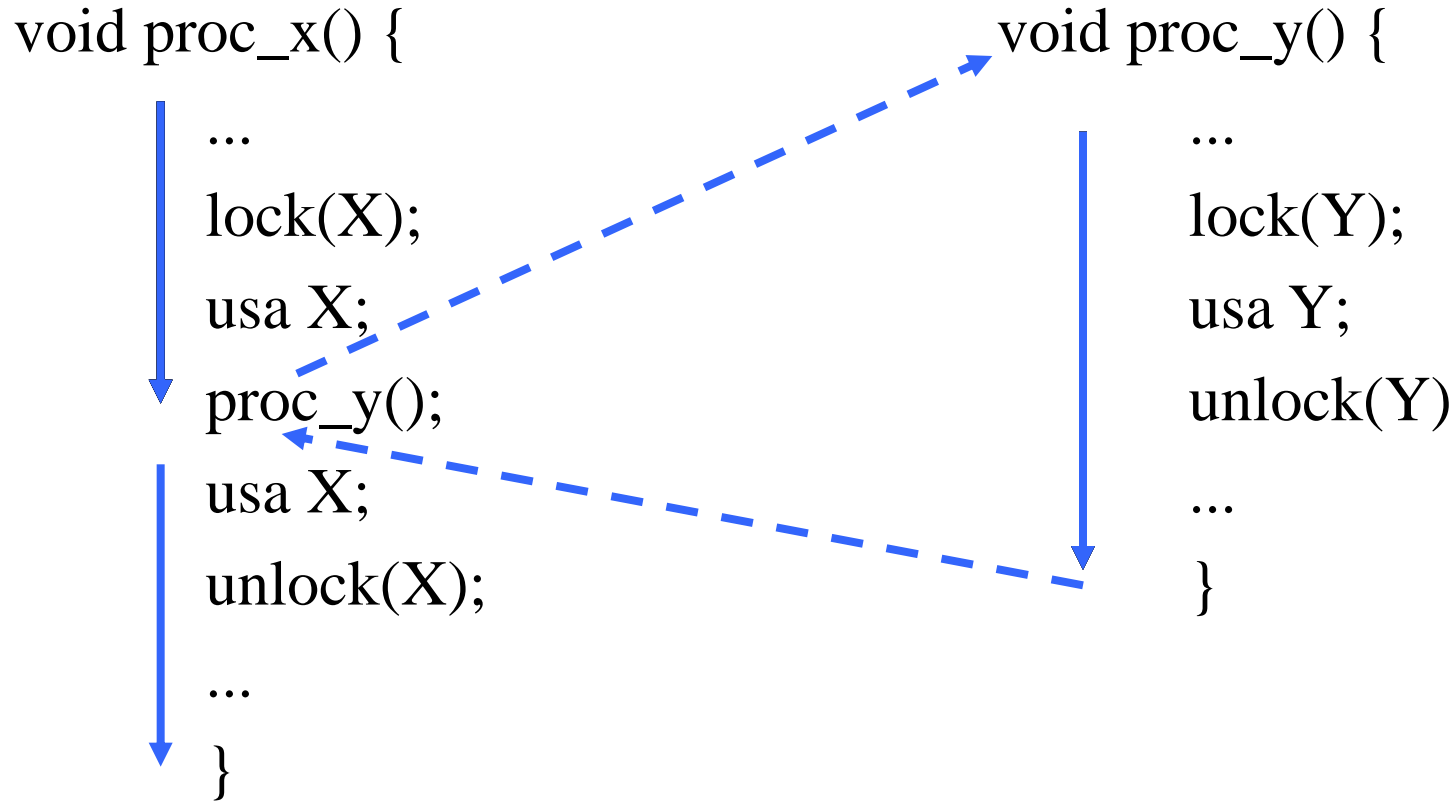
- Sistema monoprocessador
- Podem existir diferentes recursos compartilhados
 - Estruturas de dados independentes
 - Periféricos
 - Etc
- Recursos não podem ser preemptados e requerem exclusão mútua
- Existe apenas uma unidade de cada recurso
- Não estamos preocupados com recursos que
 - Podem ser acessados simultaneamente (exemplo: tabela read-only)
 - Existe grande número de unidades (exemplo: bytes na memória)

Modelo de Recursos

- Mecanismo de sincronização é usado pelas tarefas para controlar o acesso aos recursos compartilhados
- Um simples MUTEX será usado para controlar o acesso
- LOCK(X) é usado pela tarefa para indicar que ela requer o uso do recurso X
 - Tarefa fica bloqueada até o acesso ao recurso ser autorizado
 - Enquanto bloqueada, ela sai da fila de aptos e não disputa o processador
- UNLOCK(X) é usado pela tarefa para indicar que ela não mais requer acesso ao recurso X
 - Retorno imediato
 - Poderá liberar outra tarefa que estava esperando para usar o recurso X

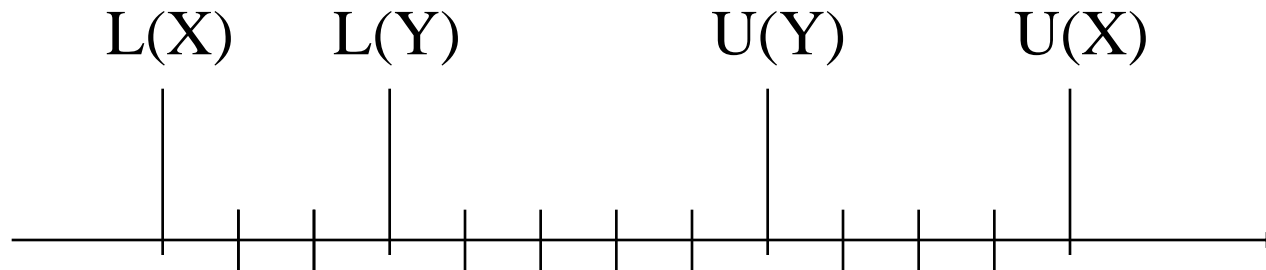
- Seção Crítica
 - Trecho de código onde a tarefa acessa algum recurso compartilhado X
 - Limitado pelas operações LOCK(X) e UNLOCK(X)
- Seções críticas podem ser aninhadas
- É suposto que apenas aninhamentos perfeitos são usados
- Situação mais comum:
 - Chama rotina proc_x que tem LOCK(X) no início e UNLOCK(X) no fim
 - Enquanto da rotina proc_x tem uma chamada para rotina proc_y
 - Rotina proc_y tem LOCK(Y) no início e UNLOCK(Y) no fim

Modelo de Recursos



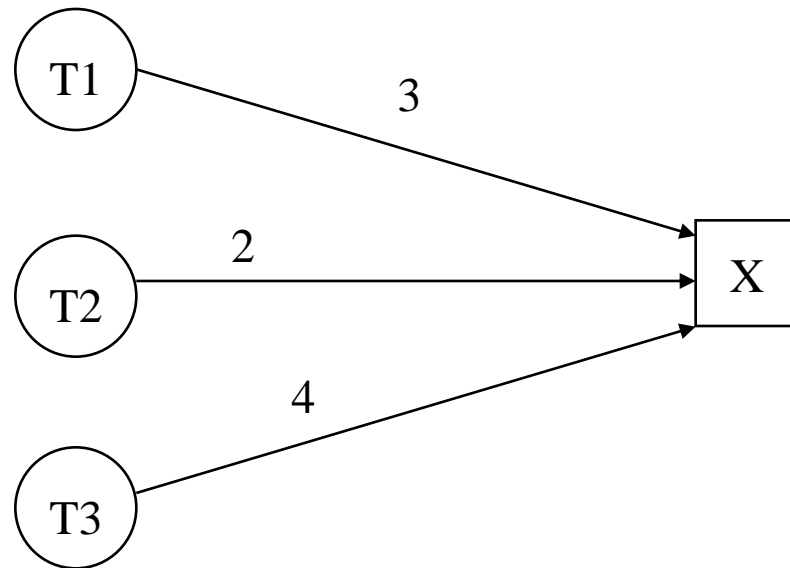
Modelo de Recursos

- Será usada uma notação baseada no livro da Jane Liu (não igual)
- $[X,3]$
 - Tarefa precisa do recurso X por 3 unidades de tempo
- Recursos aninhados são representados por colchetes aninhados
- $[X,3[Y,5]4]$
 - Aloca X , usa por 3 unidades de tempo, aloca Y , usa ambos por 5 unidades de tempo, libera Y , usa X por mais 4 unidades de tempo, libera X



Especificação das Demandas de Recursos

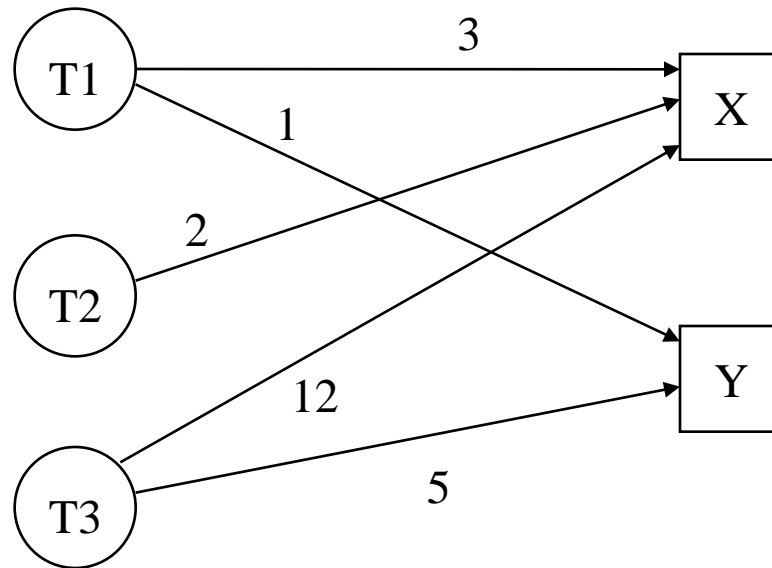
- Grafo dirigido acíclico
- Arco da tarefa para o recurso indica que a tarefa requer o recurso
- Anotação no arco indica a duração da seção crítica
- Exemplo
 - T1:[X,3]
 - T2:[X,2]
 - T3:[X,4]



Especificação das Demandas de Recursos

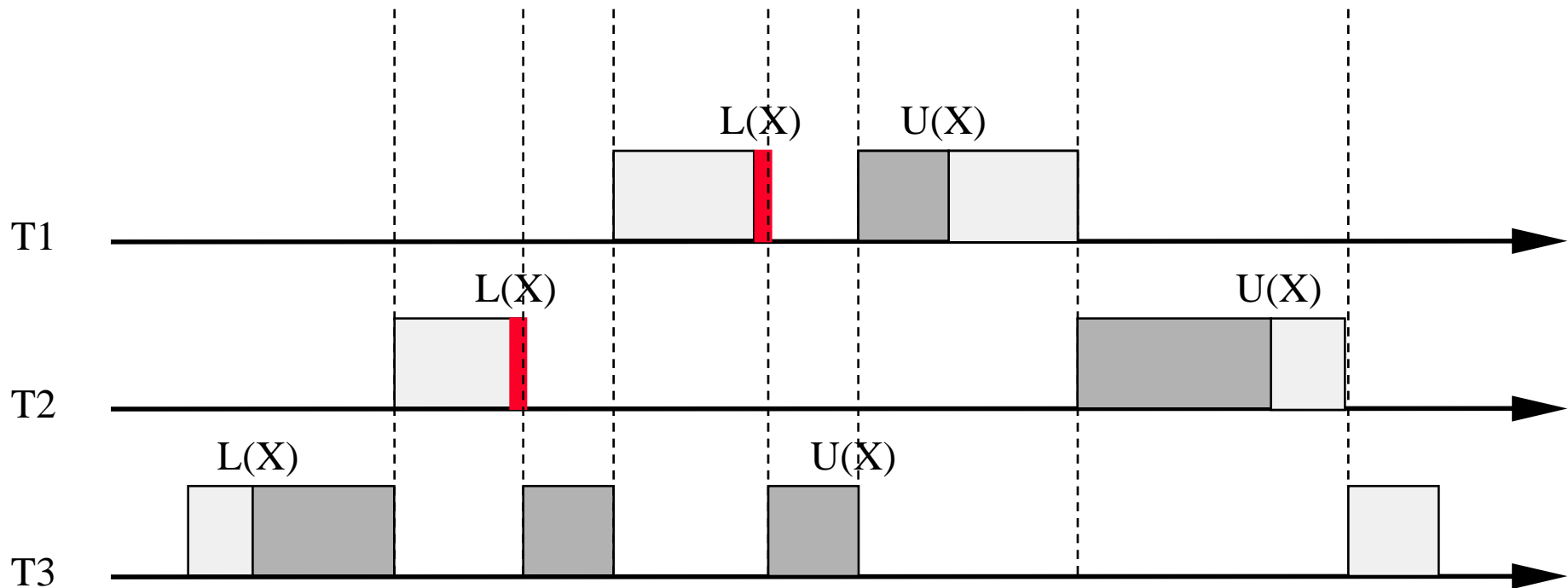
- Exemplo

- T1:[X,3][Y,1]
- T2:[X,2]
- T3:[X,3][Y,5]



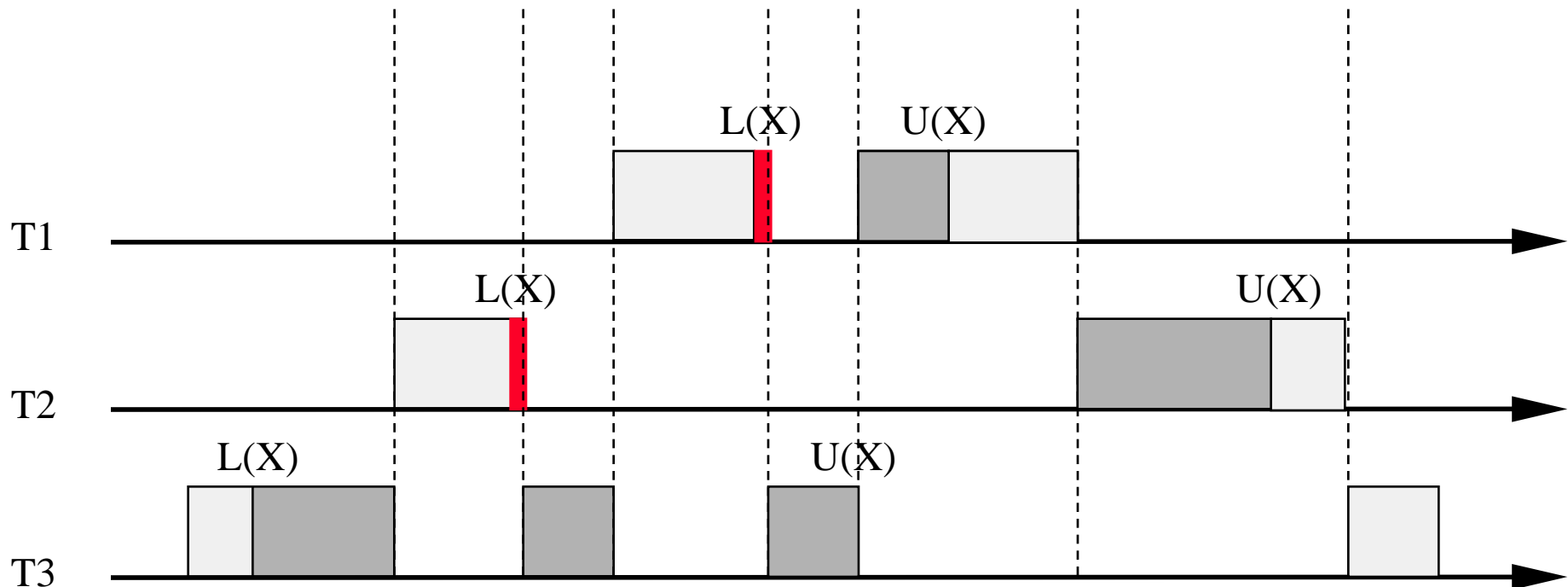
Modelo de Recursos

- Duas tarefas entram em conflito quando precisam usar o mesmo recurso ao mesmo tempo
- LOCK pode fazer a tarefa ficar bloqueada por algum tempo



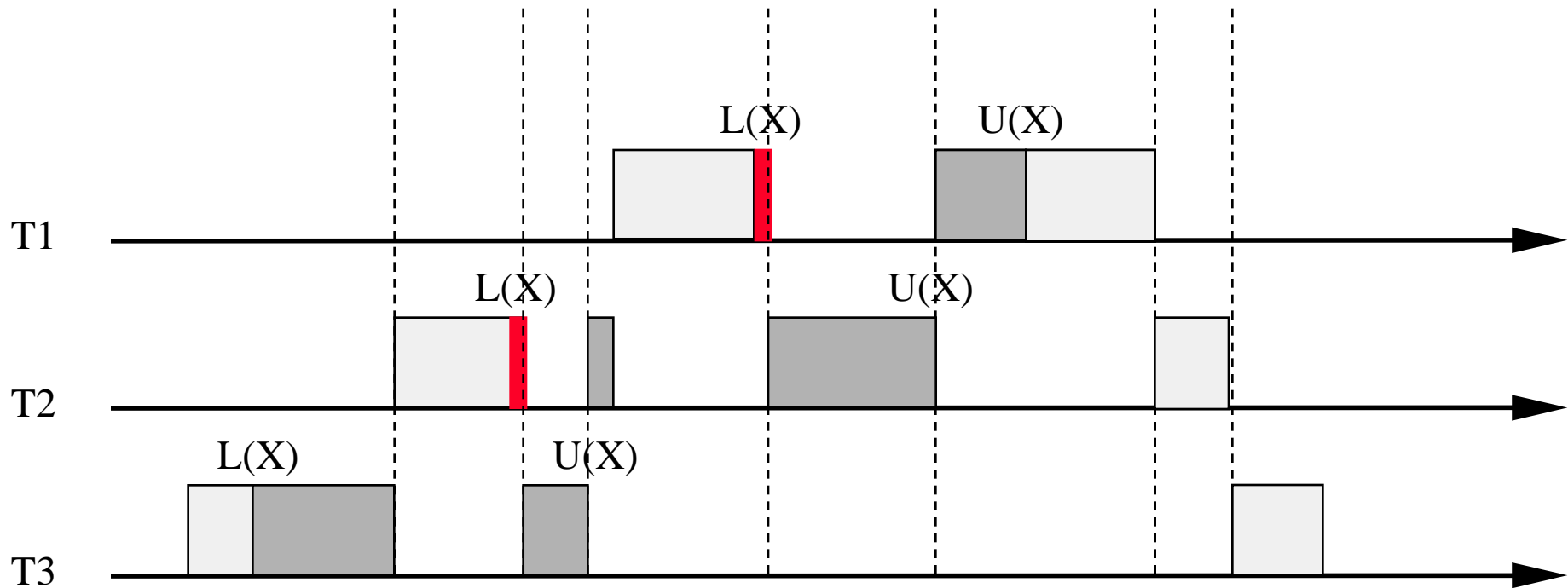
Inversão de Prioridade

- Temos em um dado momento a tarefa T1 esperando pela Tarefa T3
- As prioridades estão invertidas
- O tempo de resposta da tarefa T1 será afetado



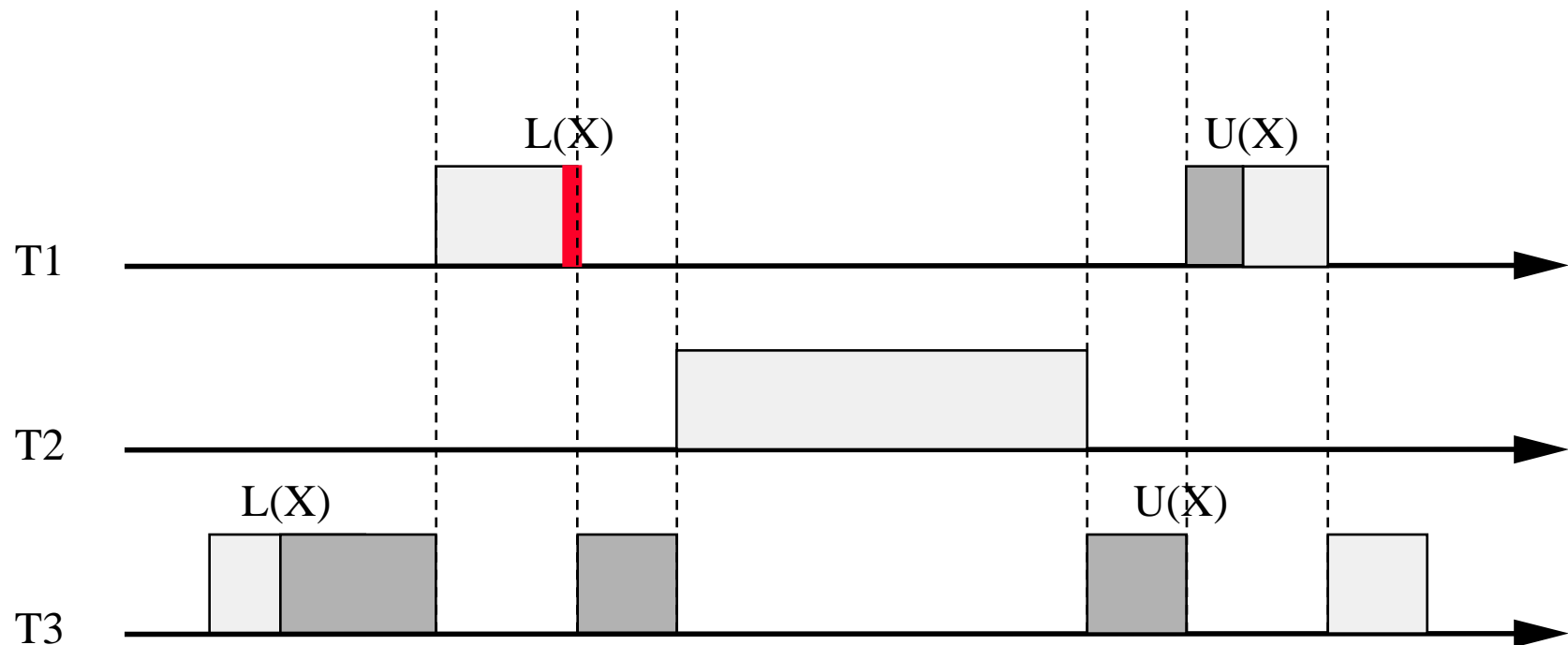
Anomalia da Inversão de Prioridades

- Se T3 reduzir o tamanho da sua seção crítica
 - O tempo de resposta da tarefa T1 AUMENTA



Inversão de Prioridade Descontrolada

- Pode ser ainda pior
- Agora Tarefa T1 espera por T3 e também por T2
- Tarefa T1 nem sequer compartilha qualquer recurso com T2



Possibilidade de Deadlock

- Deadlock:
 - Um conjunto de tarefas estão bloqueadas a espera de evento que somente pode ser causado por tarefas deste conjunto

- Exemplo:

T1

Lock(X)

Lock(Y)

...

Unlock(Y)

Unlock(X)

...

T2

Lock(Y)

Lock(X)

...

Unlock(X)

Unlock(Y)

...

- Se deadlock é possível, o tempo de resposta no pior caso é infinito

- Acesso a recursos compartilhados
 - Gera bloqueio (inversão de prioridades)
 - Pode gerar deadlock
- Mutex simples é ineficaz
- Necessário usar protocolos específicos

- Desliga Preempção
- Herança de Prioridade
- Priority Ceiling
- Immediate Priority Ceiling
- Outros protocolos



Seções Críticas em Sistemas de Tempo Real



Fundamentos dos Sistemas de Tempo Real
2ª Edição

Rômulo Silva de Oliveira

Edição do Autor, 2020

www.romulosilvadeoliveira.eng.br/livrotemporeal

Seções Críticas em Sistemas de Tempo Real

Parte II: Desliga Preempção e Herança de Prioridade



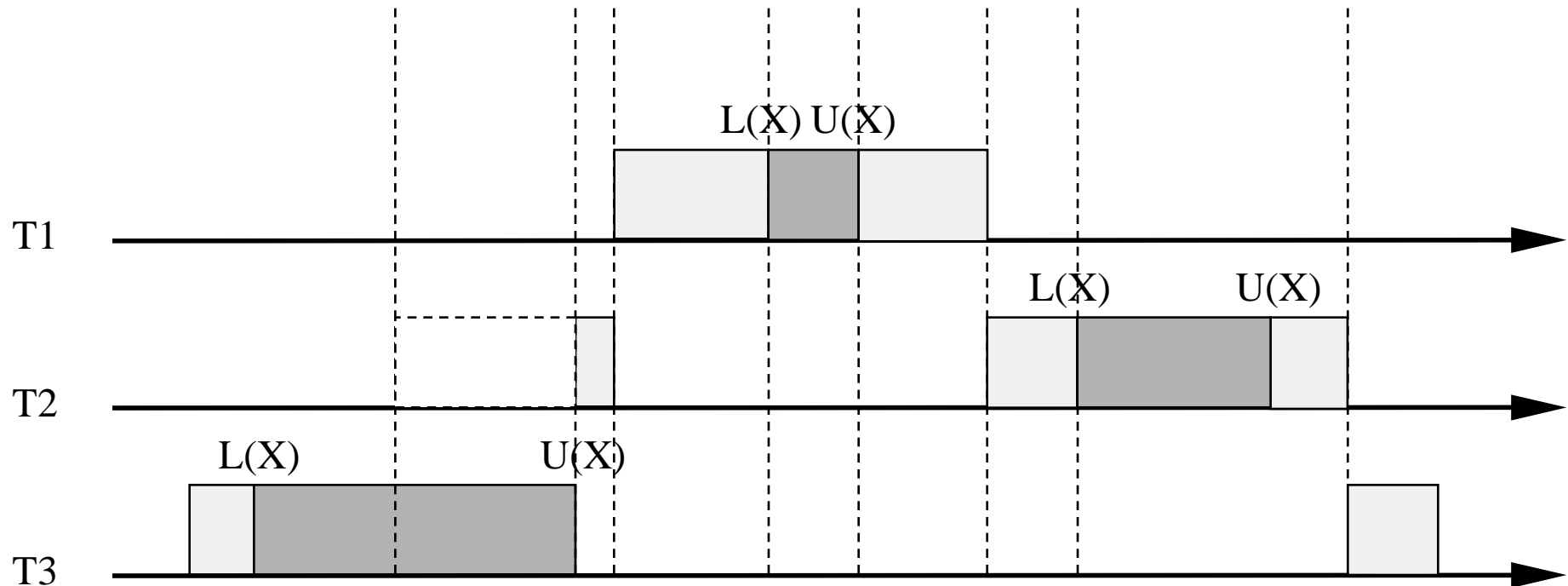
Protocolos de Acesso a Recursos

- Usar protocolos de acesso a recursos específicos
- Podem minimizar a inversão de prioridade
- Podem impedir deadlocks

- Exemplo clássico para impedir deadlocks:
 - Todos os recursos compartilhados são numerados
 - Recursos precisam ser alocados em ordem crescente
 - Tanto T1 como T2
 - Aloca X antes de Y
 - Ou aloca Y antes de X
 - Seja como for, agora é impossível ocorrer um deadlock

(1) Desliga Preempção

- Desliga a preempção antes de acessar qualquer recurso
- Todas as seções críticas executam de forma não preemptiva
- Tempo máximo de bloqueio B_i da tarefa T_i
 - Dado pela duração da maior seção crítica de qualquer tarefa com prioridade mais baixa do que T_i



(1) Desliga Preempção

- Forma mais simples de resolver o problema
- Inversão de prioridade descontrolada não acontece
- Deadlock não acontece
- Qualquer tarefa pode ser bloqueada no máximo uma vez

- Obviamente só funciona em monoprocessador
- Qualquer tarefa pode ser bloqueada por qualquer tarefa de prioridade mais baixa
 - Mesmo que elas não compartilhem recursos entre si

- Solução razoável quando todas as seções críticas forem pequenas
- Corresponde ao “Desabilita Interrupções” de sistemas pequenos

(2) Herança de Prioridade

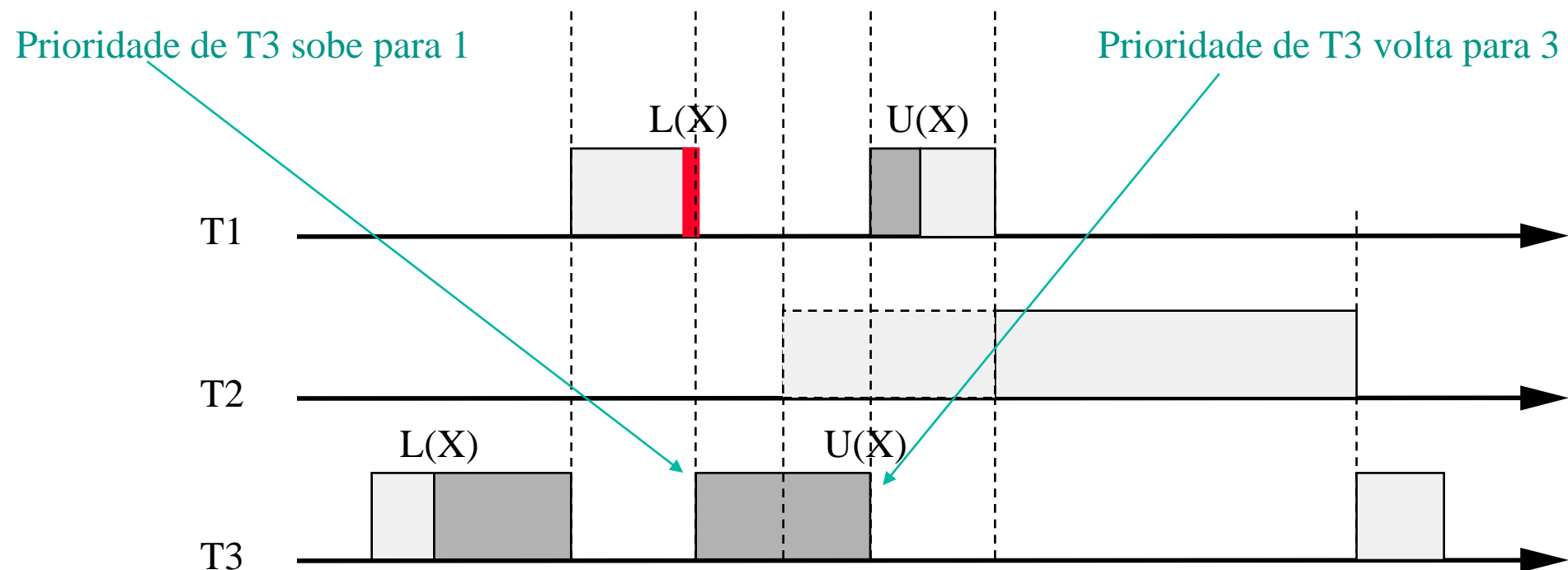
- Cada tarefa possui uma prioridade nominal fixa
 - Dada por RM, DM, etc
- Cada job possui uma prioridade efetiva
 - A prioridade efetiva varia ao longo do tempo
 - A prioridade efetiva é usada para decidir quem executa a seguir
- Inicialmente,
a prioridade efetiva do job é igual à prioridade nominal da sua tarefa
- A prioridade efetiva pode mudar em decorrência da alocação de recursos pelo job em questão

(2) Herança de Prioridade: Regras

- Regra de alocação: Quando um Job J requer (LOCK) um recurso R no instante t:
 - Se R está livre, R é alocado para J até que J libere o recurso (UNLOCK)
 - Se R está ocupado, J bloqueia
- Regra da Herança de Prioridade:
 - Seja Jx o job que detém o recurso R solicitado por J
 - Job Jx herda a prioridade efetiva de J
 - Job Jx executa com a prioridade efetiva de J até liberar R
 - Quando liberar R, Jx retorna para a prioridade efetiva que tinha em t
 - Herança de prioridade é transitiva

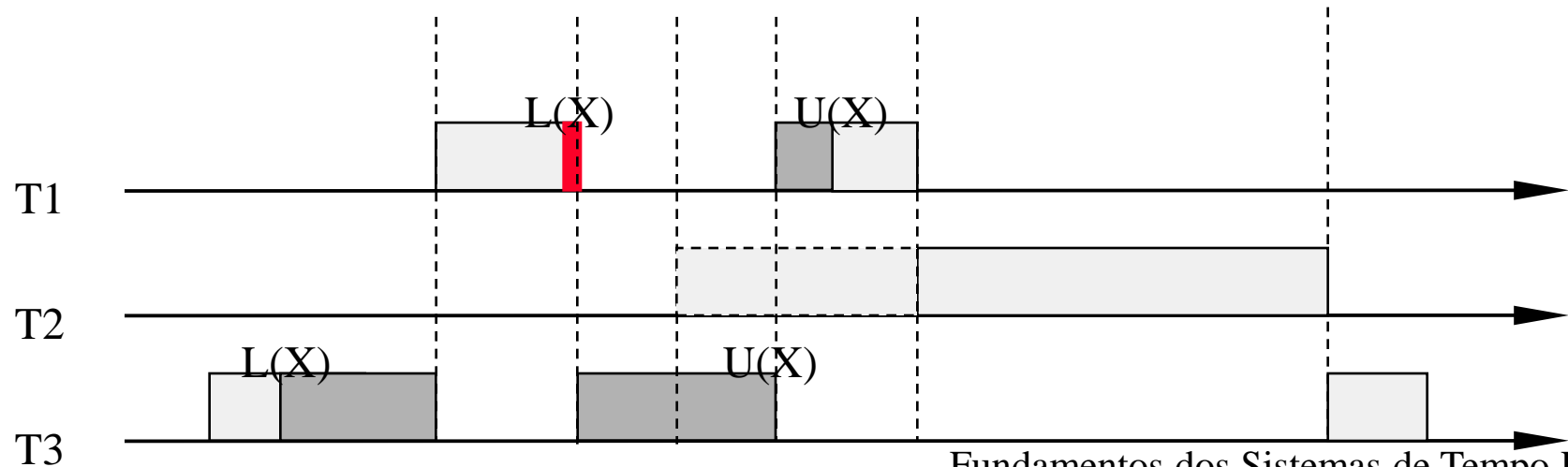
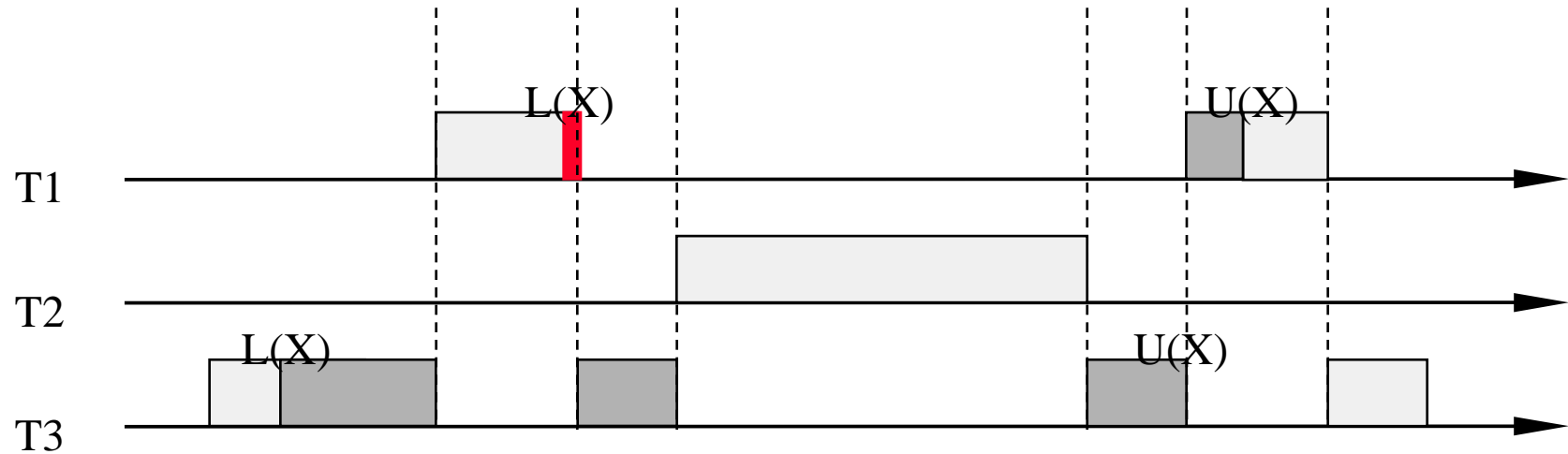
(2) Herança de Prioridade: Exemplo

- Inversão de prioridades descontrolada é evitada
- T3 termina a seção crítica mais cedo
- T1 sofre bloqueio direto de T3
- T2 sofre bloqueio por herança de T3



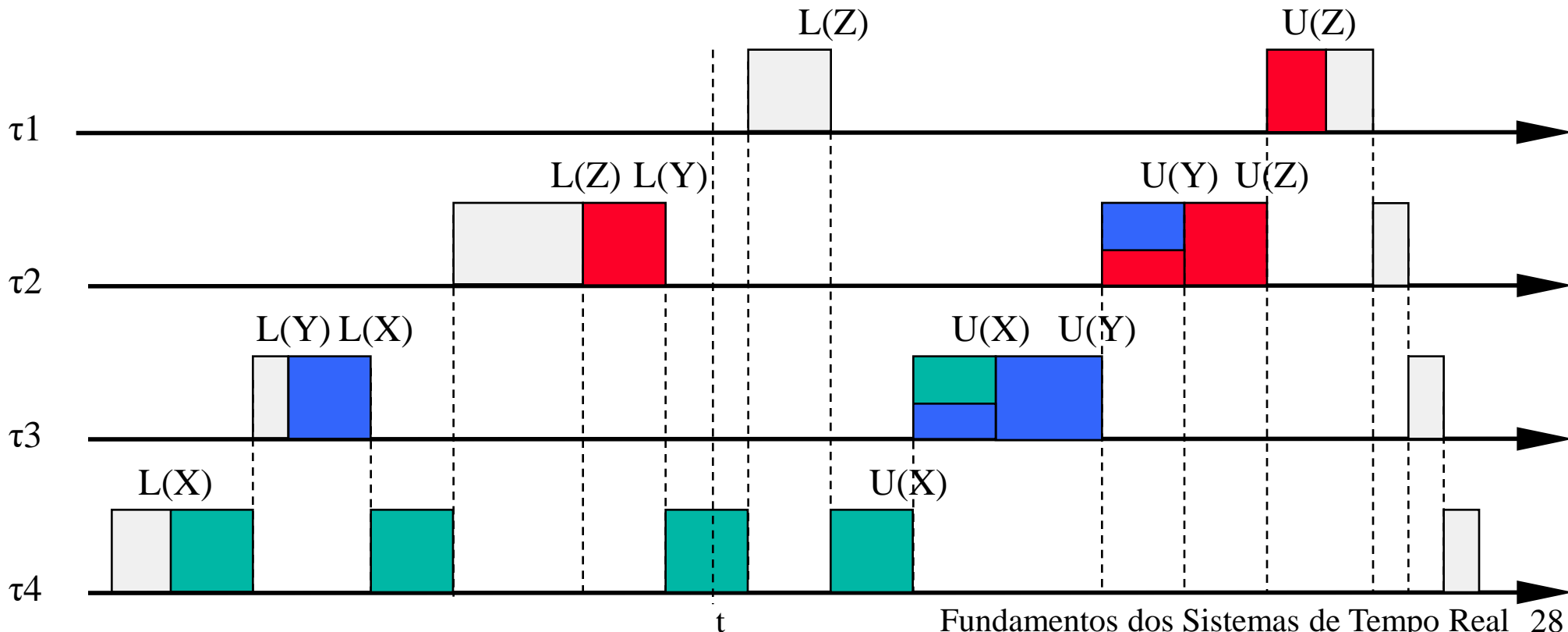
(2) Herança de Prioridade: Exemplo

- Sem herança e com herança de prioridades



(2) Herança de Prioridade: Exemplo

- Bloqueio direto de τ_2 sobre τ_1 por Z
- Bloqueio transitivo de τ_3 sobre τ_1 via $\tau_2(Y)$
- Bloqueio transitivo de τ_4 sobre τ_1 via $\tau_3(X)$ e $\tau_2(Y)$
- Suponha τ_4 executa $\text{Lock}(Z)$ em t



(2) Herança de Prioridade

- Impede a inversão de prioridade descontrolada
- Uma tarefa pode ser bloqueada diretamente por outra tarefa de mais baixa prioridade somente uma vez
 - Isto pode acontecer para cada seção crítica usada
- Cada uma das tarefas de mais baixa prioridade é capaz de bloquear a tarefa de mais alta prioridade
 - Por no máximo uma vez
- Tipos de bloqueio
 - Direto (τ_2 bloqueia τ_1)
 - Transitivo (τ_3 bloqueia τ_2 que por sua vez está bloqueando τ_1)
 - Por herança de prioridade

(2) Herança de Prioridade

- Não impede o deadlock por si só
 - Mecanismo adicional é necessário
- Não minimiza tempo de bloqueio no pior caso
- Determinação do B para o pior caso pode ficar complexo
 - se os padrões de uso dos recursos forem complexos

- Acesso a recursos compartilhados
 - Gera bloqueio (inversão de prioridades)
 - Pode gerar deadlock
- Mutex simples é ineficaz
- Necessário usar protocolos específicos

- Desliga Preempção
- Herança de Prioridade
- Priority Ceiling
- Immediate Priority Ceiling
- Outros protocolos



Seções Críticas em Sistemas de Tempo Real

Fundamentos dos Sistemas de Tempo Real
2ª Edição

Rômulo Silva de Oliveira

Edição do Autor, 2020

www.romulosilvadeoliveira.eng.br/livrotemporeal



Seções Críticas em Sistemas de Tempo Real

Parte III: Priority Ceiling (Prioridade Teto)



(3) Priority Ceiling

- Estende a herança de prioridade para
 - Eliminar a possibilidade de deadlock
 - Reduzir o tempo de bloqueio no pior caso
- Assume que é sabido antes da execução quais recursos cada tarefa usa
- Priority Ceiling = Teto de prioridade
- O teto de prioridade de um recurso R_i corresponde a mais alta prioridade entre todas as tarefas que usam R_i
 - Denotado por Π_i
- Uma prioridade imaginária mais baixa que todas as prioridades do sistema será denotada por Ω
- O teto de prioridade do sistema $\Pi_j(t)$ corresponde ao maior teto de prioridade entre todos os recursos que se encontram alocados no instante t , desconsiderando-se aqueles alocados por τ_j

(3) Priority Ceiling

- Cada tarefa possui uma prioridade nominal fixa
 - Dada por RM, DM, etc
- Cada job possui uma prioridade efetiva
 - A prioridade efetiva varia ao longo do tempo
 - A prioridade efetiva é usada para decidir quem executa a seguir
- Inicialmente,
a prioridade efetiva do job é igual à prioridade nominal da sua tarefa
- A prioridade efetiva pode mudar em decorrência da alocação de recursos pelo job em questão
- As prioridades efetivas dos jobs são usadas para fins de escalonamento
 - Executa o job não bloqueado com a prioridade efetiva mais alta

(3) Priority Ceiling: Regra de Alocação

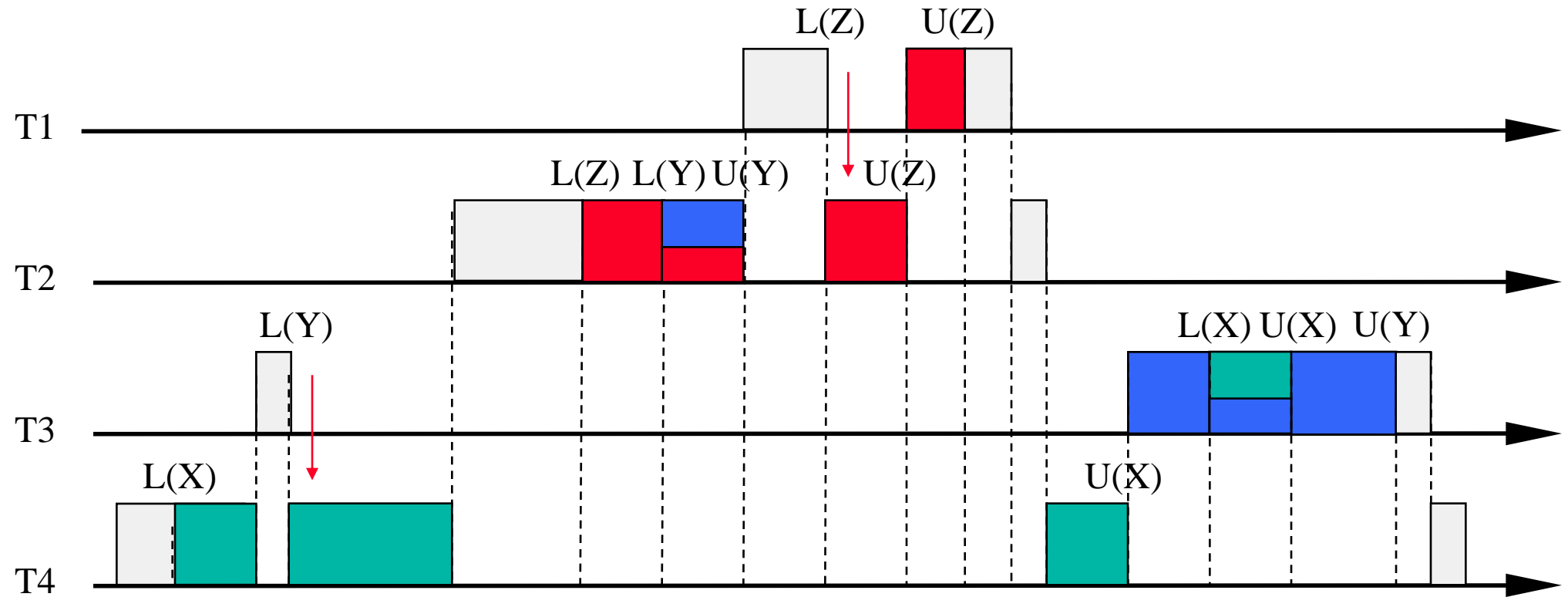
- Regra de Alocação
- Um job J requer um recurso R no instante t
- Se R está alocado para outro job
 - O pedido é negado e J fica bloqueado
- Se R está livre
 - O pedido será aceito se a prioridade efetiva de J for maior que o teto de prioridade do sistema Π_j , o qual desconsidera os recursos que J alocou
 - Caso contrário, o pedido é negado e J fica bloqueado

(3) Priority Ceiling: Regra de Herança

- Regra de herança de prioridade
- Quando o job J tenta alocar o recurso R e fica bloqueado
 - o job Jx que detém o recurso R herda a prioridade efetiva de J
- Jx mantém esta prioridade até o momento que libera o recurso R
 - Neste instante ele retorna para sua prioridade efetiva anterior
- A herança de prioridade é transitiva

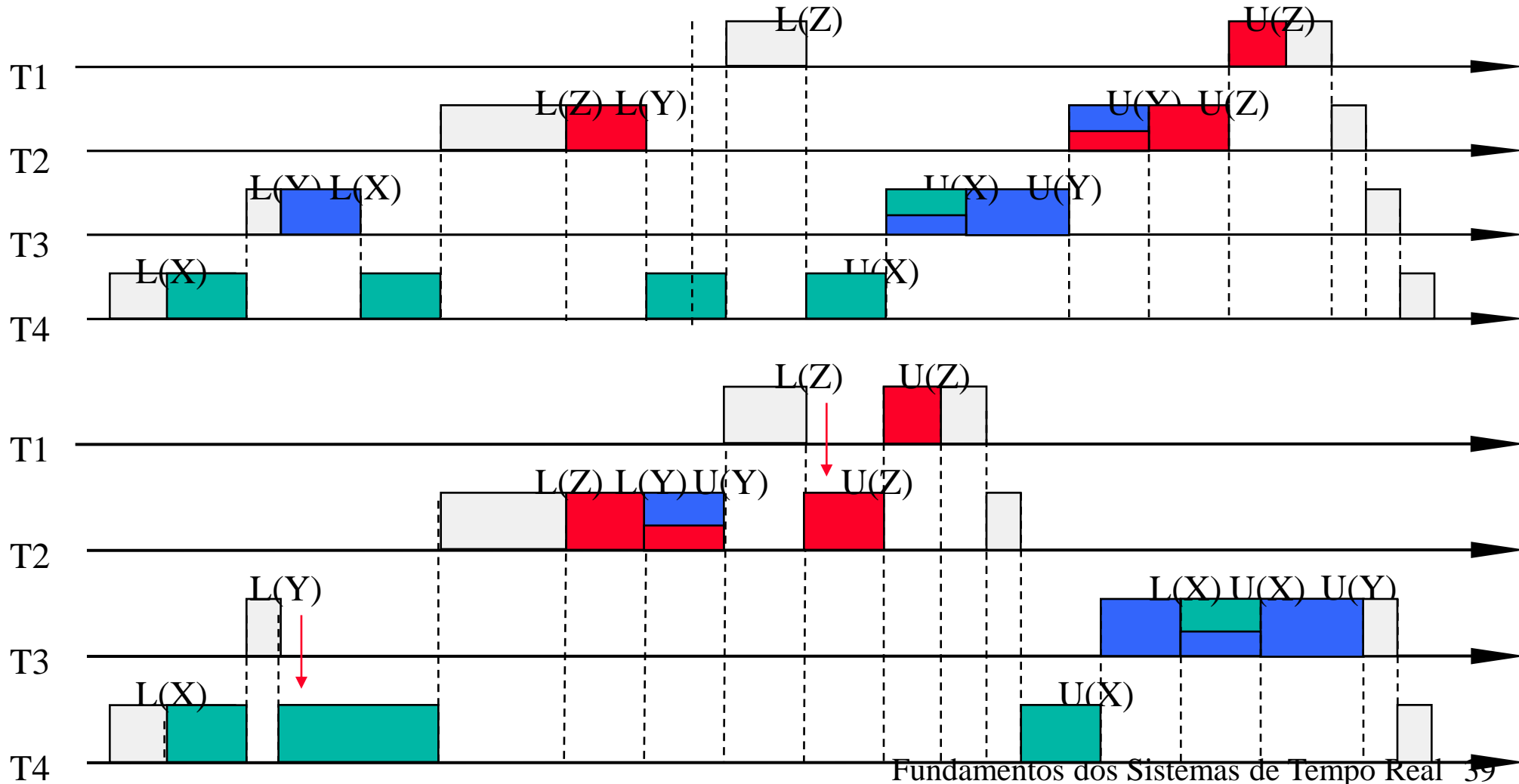
(3) Priority Ceiling: Exemplo

- Tetos de prioridade:
 - $\Pi(X)=3, \Pi(Y)=2, \Pi(Z)=1$



(3) Priority Ceiling: Exemplo

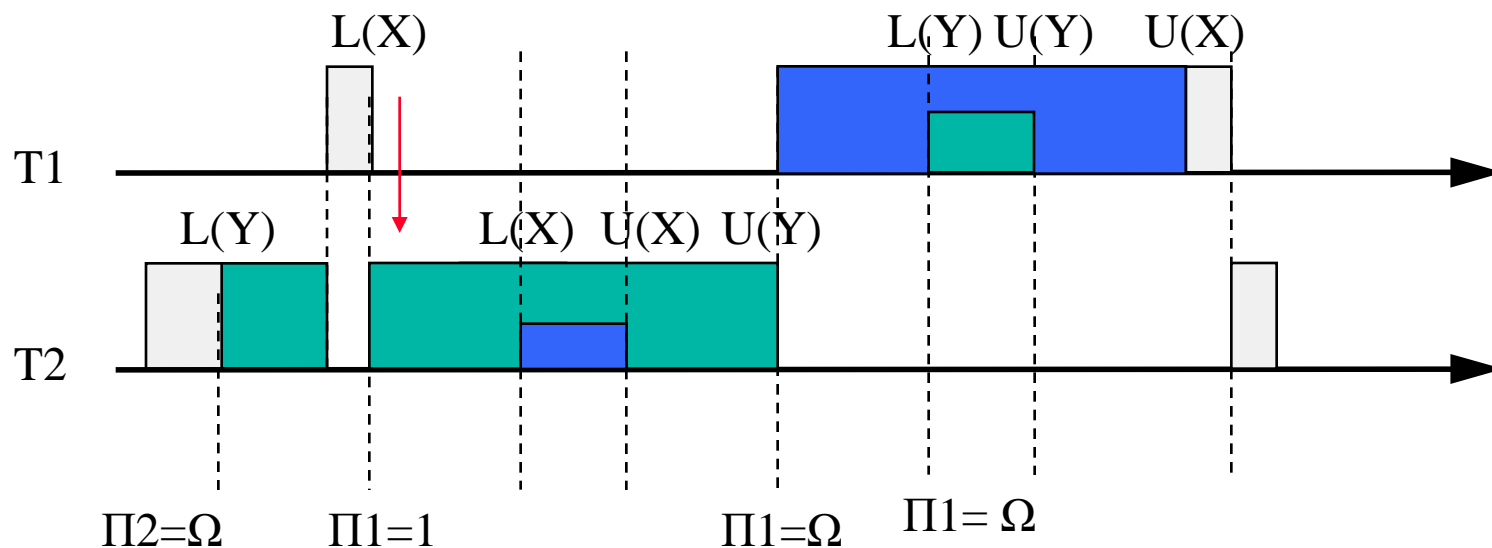
- Herança de prioridade versus Teto de prioridade



(3) Priority Ceiling

- Impossível ocorrer deadlock

- T1:[X,1[Y,1]]
- T2:[Y,1[X,1]]
- $\Pi(X)=1, \Pi(Y)=1$



(3) Priority Ceiling

- Herança de Prioridade
 - Guloso
 - Se recurso estiver livre, o mesmo é alocado
- Teto de Prioridade
 - Conservador
 - Mesmo um recurso livre pode não ser alocado
 - Isto é feito para prevenir um comportamento pior mais adiante
- Semelhante aos protocolos para evitar deadlock
 - Algoritmo do banqueiro

(3) Priority Ceiling: Tipos de Bloqueios

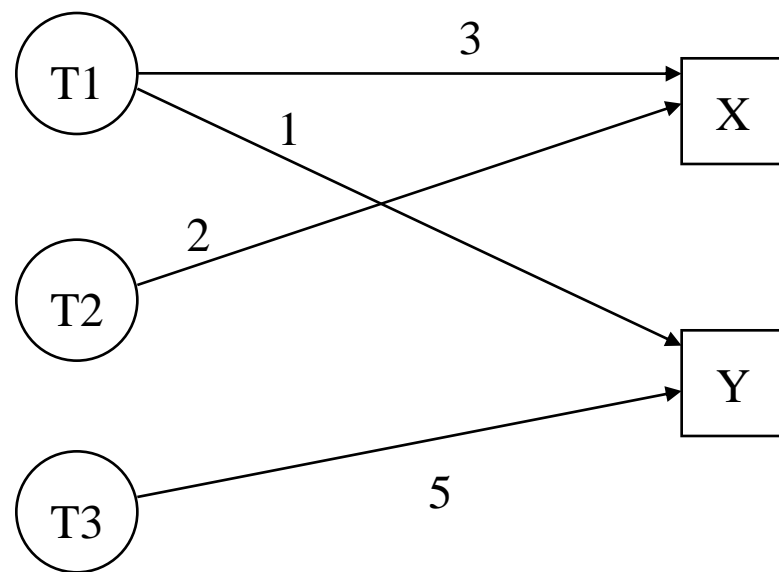
- Bloqueio pode ocorrer de três formas
- Bloqueio direto
 - Recurso está ocupado
- Bloqueio por herança de prioridade
 - Bloqueado por tarefa que herdou prioridade mais alta de outra tarefa
- Bloqueio por teto
 - Recurso está livre, mas teto do sistema é mais alto, alocação é negada
- Determinação do B é simplificada pois:
 - Um job pode ser bloqueado por no máximo a duração de uma seção crítica

(3) Priority Ceiling

- Uma tarefa T_i pode ser bloqueada apenas uma vez por uma mesma tarefa de prioridade mais baixa T_x
 - Ao liberar o recurso a primeira vez, T_x não executa mais e não aloca novamente até o final de T_i
- Não é possível uma tarefa T_i ser bloqueada por T_x e T_y , se T_x e T_y tiverem prioridade mais baixa do que T_i
 - Após o primeiro bloqueio, a regra do teto impede um segundo bloqueio
- Uma tarefa T_i pode ser bloqueada no máximo pela duração de uma única seção crítica
 - Não importa quantas tarefas compartilham recursos com a tarefa T_i
 - Vale a seção crítica mais externa, quando aninhadas

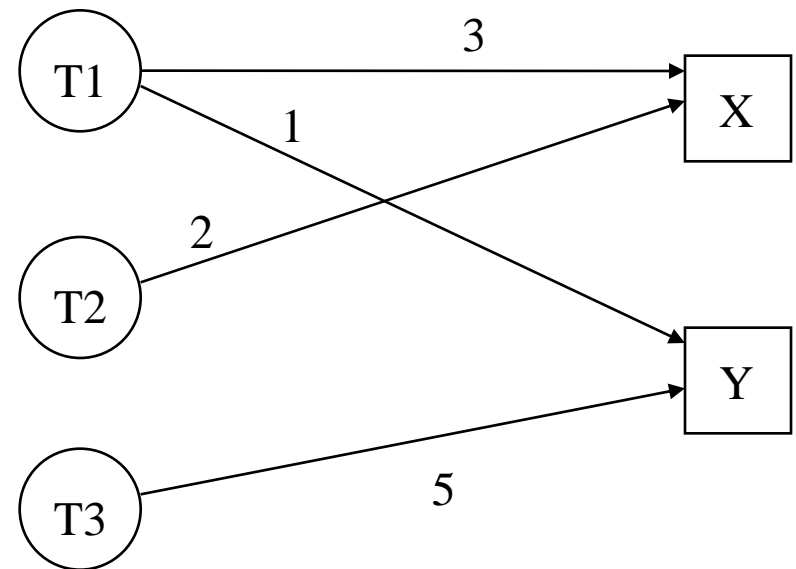
(3) Priority Ceiling

- τ_1
 - Bloqueio direto de τ_2 por 2 ut
 - Bloqueio direto de τ_3 por 5 ut
 - Bloqueio por teto de τ_3 por 5 ut
 - Somente um dos dois é possível
- τ_2
 - Bloqueio por teto de τ_3 por 5 ut
 - Bloqueio por herança de τ_3 por 5 ut
 - Somente um dos dois é possível
- τ_3
 - Não sofre bloqueio por definição



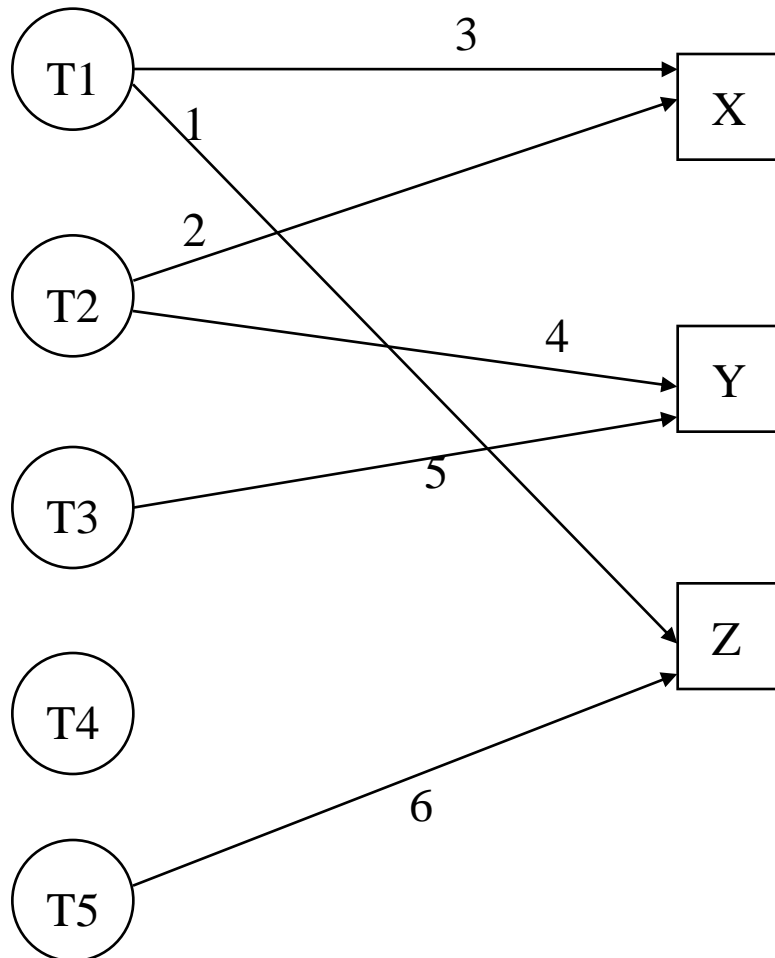
(3) Priority Ceiling

- A determinação de B3, B2 e B1 pode ser resumida desta forma:
 - Busque tarefas menos prioritárias que usam mutex com teto igual ou mais alto
- τ_3 : nenhuma tarefa com prioridade mais baixa
 - B3 = 0
- τ_2 :
 - τ_3 usa [Y,5] $\Pi_y=1$ ok 5
 - B2 = 5
- τ_1 :
 - τ_3 usa [Y,5] $\Pi_y=1$ ok 5
 - τ_2 usa [X,2] $\Pi_x=1$ ok 2
 - B1 = 5



(3) Priority Ceiling

- Exemplo mais complexo



(3) Priority Ceiling

- τ_5 : nenhuma tarefa com prioridade mais baixa

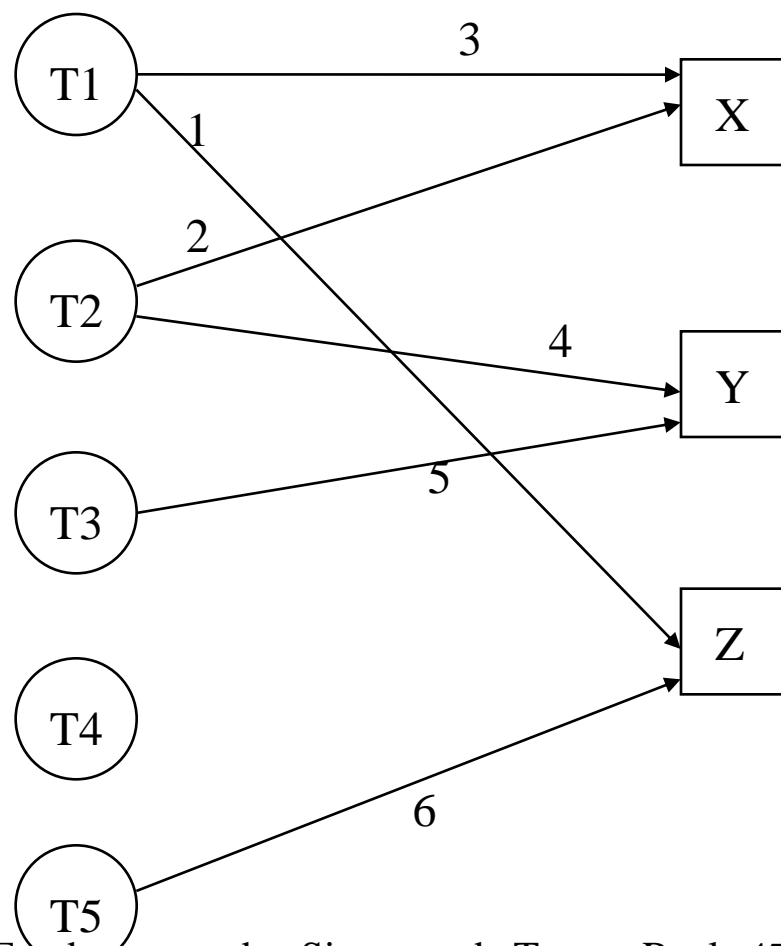
- $B_5 = 0$

- τ_4 : τ_5 usa $[Z,6]$ $\Pi_Z=1$ ok 6

- $B_4 = 6$

- τ_3 : τ_5 usa $[Z,6]$ $\Pi_Z=1$ ok 6

- $B_3 = 6$



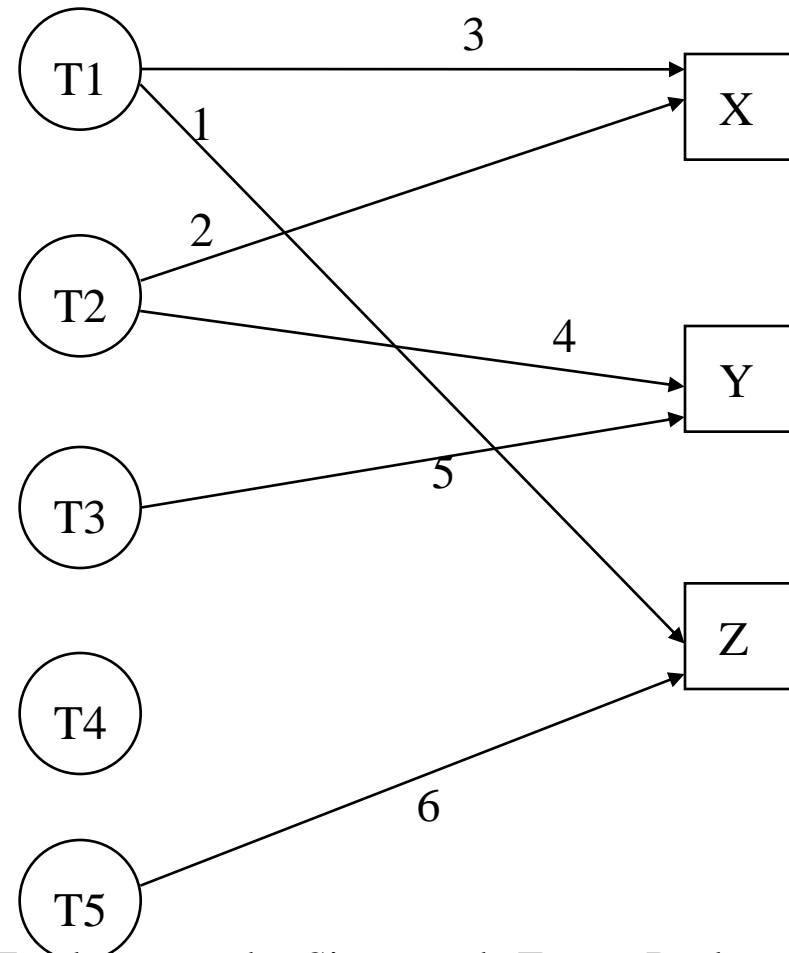
(3) Priority Ceiling

- τ_2 :

- τ_5 usa [Z,6] $\Pi_z=1$ ok 6
- τ_3 usa [Y,5] $\Pi_y=2$ ok 5
- $B_2 = 6$

- τ_1 :

- τ_5 usa [Z,6] $\Pi_z=1$ ok 6
- τ_3 usa [Y,5] $\Pi_y=2$ não
- τ_2 usa [X,2] $\Pi_x=1$ ok 2
- τ_2 usa [Y,4] $\Pi_y=2$ não
- $B_1 = 6$



(3) Priority Ceiling

- No pior caso,
 - Priority Ceiling não bloqueia mais do que Herança de Prioridade
- Bloqueio gera mais chaveamento de contexto
 - Precisa incluir no tempo de execução das tarefas
 - Tarefa que não usa recurso acrescenta 2 chaveamentos de contexto
 - Quando inicia e quando termina
 - Tarefa que usa recurso acrescenta 4 chaveamentos de contexto
 - Quando inicia, quando fica bloqueada, quando é liberada, quando termina
 - Cada tarefa tem o seu WCET acrescido de seus chaveamentos de contexto
- Regras são complexas
- É necessário saber quem bloqueia quem, de forma transitiva

- Acesso a recursos compartilhados
 - Gera bloqueio (inversão de prioridades)
 - Pode gerar deadlock
- Mutex simples é ineficaz
- Necessário usar protocolos específicos

- Desliga Preempção
- Herança de Prioridade
- Priority Ceiling
- Immediate Priority Ceiling
- Outros protocolos



Seções Críticas em Sistemas de Tempo Real



Fundamentos dos Sistemas de Tempo Real
2ª Edição

Rômulo Silva de Oliveira
Edição do Autor, 2020

www.romulosilvadeoliveira.eng.br/livrotemporeal

Seções Críticas em Sistemas de Tempo Real

Parte IV:

Immediate Priority Ceiling e Stack-Based Protocol (EDF)



(4) Immediate Priority Ceiling

- Cada tarefa possui uma prioridade nominal
 - Atribuída por RM, DM, etc
- Cada recurso tem uma prioridade teto
 - Prioridade mais alta entre as tarefas que usam o recurso
- Cada tarefa tem uma prioridade efetiva
 - Mais alta entre
 - sua própria prioridade nominal
 - e as prioridades teto de quaisquer recursos que a tarefa tenha alocado
- Executa a tarefa apta com a mais alta prioridade efetiva
 - Para a mesma prioridade é usado FIFO

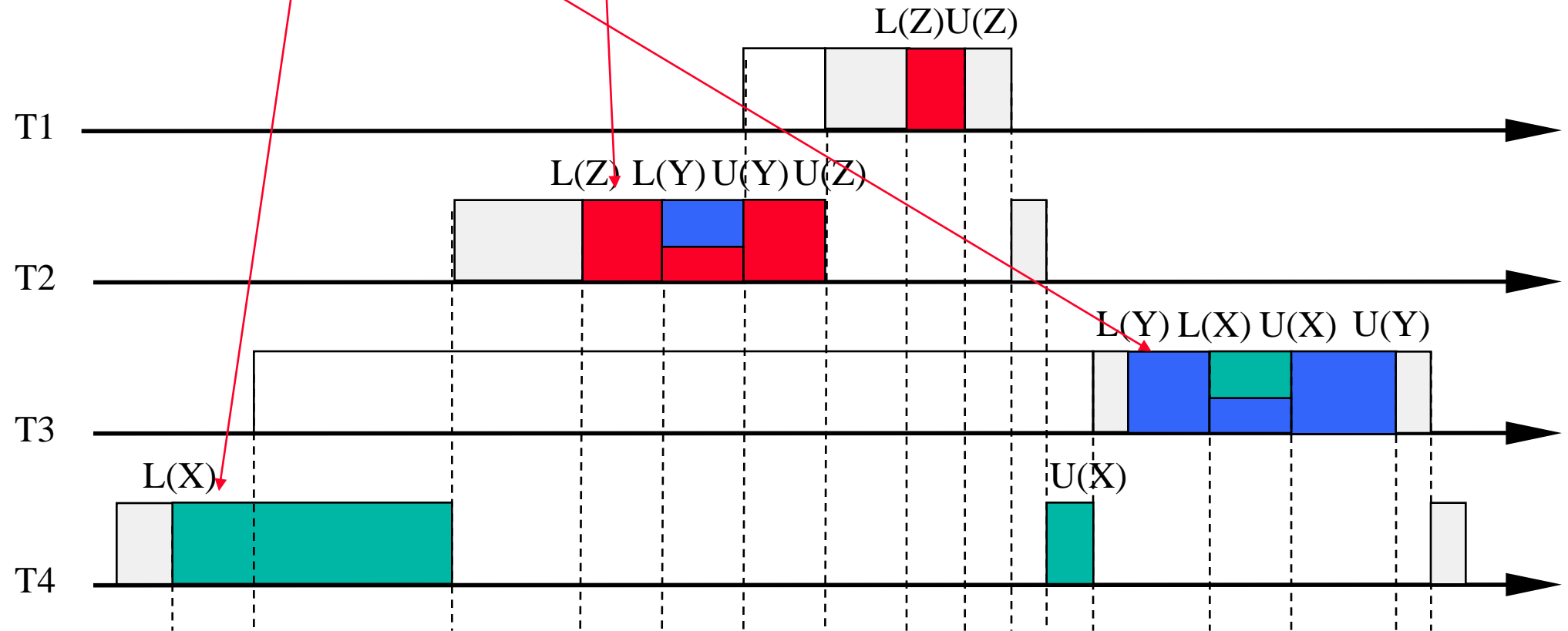
(4) Immediate Priority Ceiling

- Ao alocar um recurso,
 - Tarefa recebe a prioridade teto daquele recurso
 - Se for mais alta do que sua prioridade efetiva corrente
- Como consequência, uma tarefa irá sofrer apenas um bloqueio
 - No início de sua execução
- Uma vez que a tarefa realmente inicia sua execução
 - todos os recursos que ela necessita estarão livres
- Se eles não estivessem,
 - então alguma outra tarefa teria uma prioridade igual ou mais alta
 - e a execução da tarefa em questão seria postergada
- O bloqueio máximo sofrido por qualquer job é o mesmo de quando Priority Ceiling é usado

(4) Immediate Priority Ceiling: Exemplo

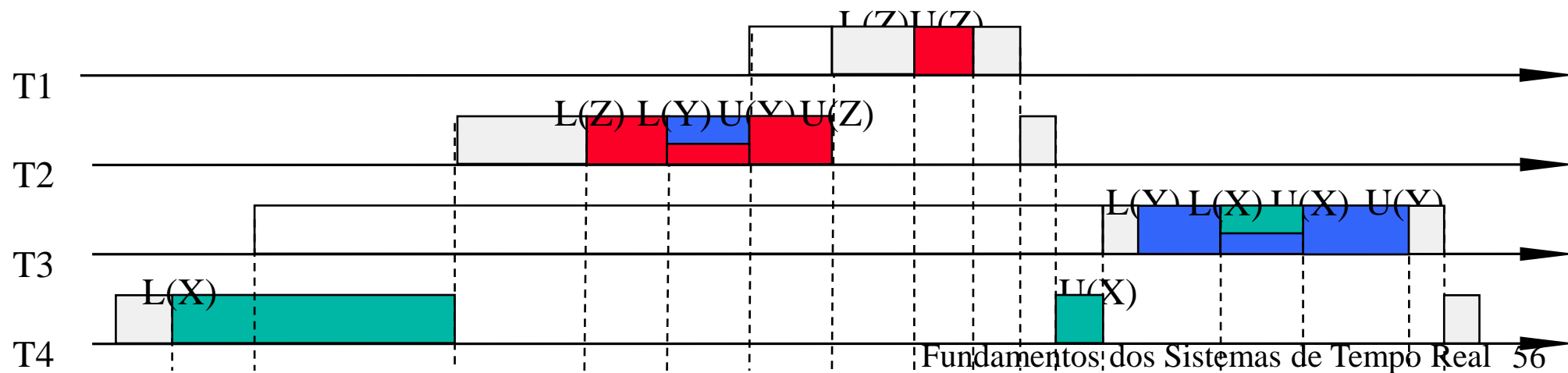
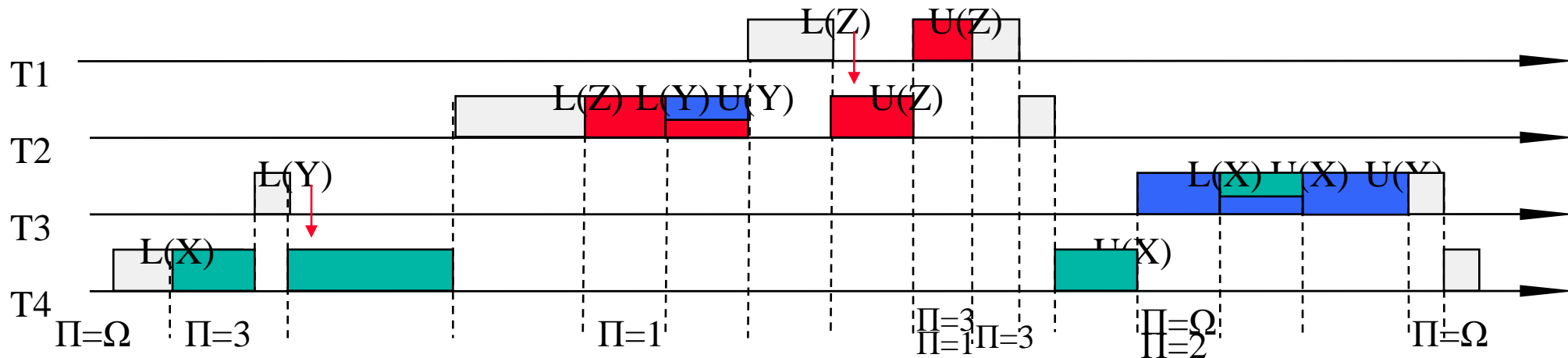
- Tetos de prioridade:

- $\Pi(X)=3, \Pi(Y)=2, \Pi(Z)=1$



(4) Immediate Priority Ceiling: Exemplo

- Teto de Prioridade versos Teto de Prioridade Imediado



(4) Immediate Priority Ceiling

- Comportamento de pior caso é o mesmo
 - Priority Ceiling
 - Immediate Priority Ceiling
- Immediate Priority Ceiling
 - É mais fácil de implementar
 - Quem bloqueia quem não precisa ser monitorado
 - Gera menos chaveamentos de contexto pois não ocorre bloqueio após o início da execução
 - Requer mais movimentos de prioridade pois isto acontece a cada uso de recurso
 - Caso médio é pior, pois são feitos bloqueios “preventivos”
- Immediate Priority Ceiling é chamado de
 - Priority Protect Protocol em POSIX
 - Priority Ceiling Emulation em Real-Time Java
 - Highest Locker Priority

Recursos em Sistemas com Prioridade Dinâmica

- Em sistemas com prioridades dinâmicas:
 - As prioridades das tarefas mudam ao longo do tempo
- Os tetos de prioridade (ceilings) dos recursos também mudam ao longo do tempo
- Protocolo Priority-Ceiling pode ser usado em sistemas com prioridade fixa por job (Ex: EDF)

desde que as prioridades teto dos recursos sejam continuamente atualizadas

- Protocolo é muito mais ineficiente (maior overhead) dado que os tetos de prioridade precisam ser frequentemente ajustados

(5) Stack-Based Protocol

- Cada recurso tem uma prioridade teto
 - Maior prioridade entre as tarefas que usam aquele recurso
 - Muda na ativação/terminação dos jobs
- Teto do sistema: Maior teto entre os recursos alocados
 - Muda quando um recurso é alocado ou liberado
- Processo somente pode executar quando sua prioridade for maior que o teto de todos os recursos alocados por outros processos
- Entre os processos liberados, executa conforme as prioridades

(5) Stack-Based Protocol

- Propriedades (as mesmas do immediate priority ceiling):
- Quando um job inicia sua execução todos os recursos que ele precisa estão livres
- Maior tempo de bloqueio corresponde a uma seção crítica
- Impossível ocorrer deadlock
 - Não retém recurso enquanto espera por outro
- Menos chaveamentos de contexto do que immediate priority ceiling
- Mesma pilha é usada por todos os jobs
 - Não pode existir auto-suspensão
- Espaço de pilha do job executando está no topo da pilha
 - Pode ocorrer preempção

- Acesso a recursos compartilhados
 - Gera bloqueio (inversão de prioridades)
 - Pode gerar deadlock
- Mutex simples é ineficaz
- Necessário usar protocolos específicos

- Desliga Preempção
- Herança de Prioridade
- Priority Ceiling
- Immediate Priority Ceiling
- Outros protocolos

