Sistemas de Tempo Real:

Abordagens de Escalonamento na Perspectiva da Engenharia

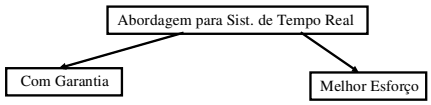
Rômulo Silva de Oliveira
Departamento de Automação e Sistemas – DAS – UFSC
romulo.deoliveira@ufsc.br
http://www.romulosilvadeoliveira.eng.br
Setembro/2015

Necessidade de Diferentes Abordagens

- Mercado para tempo real é amplo
- Sistemas de tempo real variam enormemente
  - Sistema de emergência em usina petroquímica
  - Controle de temperatura do freezer
  - Videogame
- Principais variações:
  - Crítico ou não crítico
  - Carga estática ou dinâmica
  - Importância associada com cumprimento dos deadlines
- **Diferentes abordagens são necessárias**

Abordagens: Perspectiva Teórica

- Existem duas grandes abordagens para a questão de tempo real na perspectiva acadêmica (matemática de escalonamento)
- **Sistemas com garantia**
- **Sistemas com melhor esforço**



Abordagem com Garantia 1/5

- Deadlines são garantidos na construção do software
- Previsibilidade determinista
- Análise feita antes da execução
  - Carga precisa ser limitada e conhecida em projeto (Hipótese de Carga)
  - É Suposto um limite para faltas (Hipótese de Faltas)
- Para dar garantia precisa considerar o pior caso:
  - Do comportamento do software (fluxos de execução)
  - Do comportamento do hardware (tempos das instruções)

Abordagem com Garantia 2/5

- Necessário conhecer o comportamento do programa no pior caso
- Isto significa
  - Pior fluxo de controle para cada tarefa (if, while)
  - Piores dados de entrada
  - Pior cenário de sincronização entre tarefas (exclusão mútua, etc)
  - Pior combinação de eventos externos (interrupções, sensores, etc)
  - Pior tudo

Abordagem com Garantia 3/5

- Necessário conhecer o comportamento do hardware no pior caso
- Isto geralmente significa
  - Pior combinação de eventos externos (interrupções, sensores, etc)
  - Determinar os estados da memória cache
  - Determinar os estados do pipeline
  - Determinar o comportamento dos barramentos
  - Determinar o comportamento temporal seguro do hardware em relação ao pior caminho do software
  - Compor os estados em uma análise de pior caso
  - Sempre de forma segura (pessimista)
- As vezes o pior caso local não leva ao pior caso global

Abordagem com Garantia 4/5

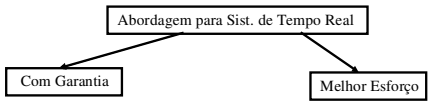
- Análise dividida em duas etapas
- **Tempo de Computação C**
  - Quanto tempo esta tarefa de software levaria para executar se estivesse sozinha no computador (única tarefa, nenhuma interrupção) ?
- Para garantia é necessário o WCET (Worst-Case Execution Time)
- **Tempo de Resposta R**
  - Quanto tempo esta tarefa de software leva para executar, considerando ela própria e todas as demais atividades do sistema ?
- Para garantia é necessário o WCET de todas as tarefas do sistema, de suas taxas de recorrência, e como são suas interações

Abordagem com Garantia 5/5

- **Vantagens**
  - Determina previamente que todos os deadlines serão cumpridos
  - Necessário para aplicações críticas
  - Teoria serve de base para abordagens sem garantia
- **Desvantagens**
  - Necessário conhecer exatamente a carga
  - Necessário reservar recursos para o pior caso
  - Gera enorme sub-utilização do hardware (mais caro)
  - Difícil determinar o pior caso em soluções COTS (commercial off-the-shelf)

Necessidade de Diferentes Abordagens

- Existem duas grandes abordagens para a questão de tempo real na perspectiva acadêmica (matemática de escalonamento)
- **Sistemas com garantia**
- **Sistemas com melhor esforço**



Abordagem com Melhor Esforço 1/2

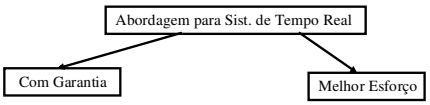
- Não existe garantia de que todos os deadlines serão cumpridos
- O "Melhor Esforço" será feito neste sentido
- Capaz de fornecer um previsão probabilista
  - Simulação, testes, etc
- Existe a possibilidade de Sobrecarga (*overload*)
- Sobrecarga:
  - Não é possível cumprir todos os deadlines
  - Não é uma falha do projeto
  - É uma situação natural uma vez que não existe garantia antecipada

Abordagem com Melhor Esforço 2/2

- Questão fundamental: Como tratar a sobrecarga ?
  - Em sobrecarga ATRASA algumas tarefas
  - Em sobrecarga DIMINUI a precisão de algumas tarefas
  - Em sobrecarga NÃO EXECUTA algumas tarefas
  - Em sobrecarga AUMENTA O PERÍODO de algumas tarefas
- Vantagens desta abordagem
  - Não é necessário conhecer o pior caso
  - Sistemas mais baratos, não são projetados para o pior caso
  - Não é necessário conhecer a carga exatamente
- Desvantagens
  - A princípio qualquer deadline poderá ser perdido

Abordagens: Perspectiva da Engenharia 1/3

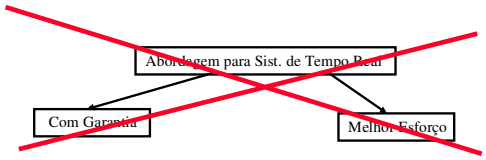
- Existem duas grandes abordagens para a questão de tempo real **EM TEORIA**
- Na prática a coisa é um pouco mais complicada
  - Entram aspectos econômicos
  - Entram aspectos do desenvolvimento como um todo e não só tempo real



Abordagens: Perspectiva da Engenharia 2/3

- Existem duas grandes abordagens para a questão de tempo real
  EM TEORIA

- Na prática a coisa é um pouco mais complicada
  - Entram aspectos econômicos
  - Entram aspectos do desenvolvimento como um todo e não só tempo real



Abordagens: Perspectiva da Engenharia 3/3

- Existem três grandes abordagens para a questão de tempo real
  NA PERSPECTIVA DA ENGENHARIA

- Com garantia provada
  - **Hard real-time systems**
  - Safety-critical systems

- Com garantia testada
  - **Quasi-hard real-time systems**
  - Safety-critical systems, Mission-critical systems

- Melhor esforço: sem garantia mas com boas perspectivas
  - **Soft real-time systems**
  - Porém busca mais que mero desempenho

Sistema de tempo real crítico verificado formalmente 1/4

- Safety-critical applications
- Não tolera nenhuma perda de deadline
- A perda de um deadline representa uma falha do sistema
- Requer algum tratamento de exceção forte
  - Tolerância a faltas via replicação ativa
  - Tolerância a faltas via propriedade construtiva (eletro-mecânica)
  - Reinicia
  - Desliga

- **Necessita verificação formal (que jamais perde um deadline)**
  - Certificação de agência fiscalizadora

Sistema de tempo real crítico verificado formalmente 2/4

- Safety-critical applications
  - Não tolera nenhuma perda de deadline

- Tarefas críticas em satélites
- Tarefas críticas em aviões
- Tarefas críticas em carros

- Sistemas críticos em aviões é o grande motivador da área
- Começa a ser importante para carros

- **Necessita verificação formal (que jamais perde um deadline)**
  - Às vezes certificação

Sistema de tempo real crítico verificado formalmente 3/4

- Análise de escalonabilidade com garantia
- Ferramenta para determinar WCET
- Necessita arquitetura determinista, analisável
- Microcontrolador de pequeno ou médio porte
- Software simples, microkernel ou tudo na aplicação
  - Junta tudo, verifica o conjunto
- Certificação é o maior custo (30x mais caro que software comum)

- Tudo isto:
  - Restringe o espectro de processadores possíveis
  - Desenvolvimento é caro (ferramentas, design, verificação)
  - Justificável apenas para *safety-critical systems* com processo de certificação ou quando uma falha pode quebrar a empresa (freio do carro)

Sistema de tempo real crítico verificado formalmente 4/4

- Muito difícil usar multicore
  - A não ser como um conjunto de monoprocessadores que estão por acaso no mesmo chip
  - Mesmo assim uma cache comum complica a análise

- Muito difícil usar processadores complexos
  - Não consegue analisar

- Novas tecnologias que poderão vir no futuro
  - Análise probabilista da escalonabilidade
  - Processadores projetados especialmente para serem analisados

Sistema de tempo real crítico verificado por teste 1/4

- Não tolera nenhuma perda de deadline
- A perda de um deadline representa uma falha do sistema
- Requer algum tratamento de exceção forte
  - Desliga
  - Reinicia
  - Alguma tolerância a faltas passiva na construção do sistema
- **Verificação por teste (que jamais perde um deadline)**

Sistema de tempo real crítico verificado por teste 2/4

- Não tolera nenhuma perda de deadline
  - A perda de um deadline representa uma falha do sistema
- Mas não é geralmente *safety-critical* as vezes até é !!!
- Sistemas de geração/transmissão de energia elétrica
  - Relés de proteção, reguladores de tensão e frequência, etc.
- Inversores elétricos
- Muitas tarefas automotivas
- Equipamentos médicos
  - Safety-critical systems, mas são lentos, é fácil cumprir deadlines
- **Verificação por teste (que jamais perde um deadline)**

Sistema de tempo real crítico verificado por teste 3/4

- Necessita arquitetura quase determinista
- Código simples, quase determinista
  - Não utiliza algoritmos recursivos, por exemplo
- WCET obtido através de medições
- Não tem certificação
- Ênfase em testes de stress
  - Busca as condições nas quais deadlines poderiam ser perdidos
- Microkernel determinista ou tudo na aplicação
- Folgas grandes para as tarefas críticas
- Teoria de escalonamento hard real-time pode ser usada com valores aproximados como ferramenta auxiliar do desenvolvedor

Sistema de tempo real crítico verificado por teste 4/4

- Existe um trade-off no projeto
- Quanto mais safety-critical for a tarefa:
  - Mais determinista é o código
  - Mais simples é o processador (pode ter mais de um)
  - Maiores são as folgas
  - Mais rigorosos são os testes
- Prioridade por importância e não por período, deadline, etc:
  - Tarefas críticas recebem prioridade fixa mais alta
  - O tempo que sobra é para as demais tarefas
  - Folga delas corresponde a todo o resto do tempo do processador que elas próprias não usam
  - Melhor a tela travar um pouco do que o motor explodir

Sistema de tempo real quase garantido 1/3

- O que é um sistema de tempo real quase garantido (soft) ?
- Tolera a perda de deadlines se estas forem suficientemente raras
- O que é raro ?
- Depende da especificação do sistema:
  - Tarefa não pode perder x deadlines seguidos
  - Tarefa não pode perder mais que x deadlines em y ativações
  - Tarefa não pode perder mais que x deadlines em y segundos
  - Etc, a lista é grande

Sistema de tempo real quase garantido 2/3

- A perda de um deadline não representa a falha do sistema
- A perda de um deadline isolado não requer tratamento de exceção
  - Não gera a falha do sistema
- Controle realimentado em aplicações industriais não críticas
  - A inércia da planta mascara a perda de um deadline (existem limites)
- Muitos exemplos no mundo industrial e doméstico
  - Controle de um forno industrial
  - Liga/desliga de chaves em fábrica (manufatura)
  - Linha branca
  - Controlador semafórico
  - Centrais telefônicas
- **Verificação por teste (frequência de perda de deadlines)**

Sistema de tempo real quase garantido 3/3

- Arquitetura qualquer, depende dos requisitos da aplicação
  - Desde de pequeno microcontrolador até PC multicore
- Testes principalmente em condições normais
- Em geral usa microkernel, mas pode ser usado desde nada até Linux, de tempo real ou não
  - Depende das funcionalidades da aplicação
- Design e testes dependem de quanto deadline pode perder sem isto ser percebido como uma falha

Teoria de Escalonamento Tempo Real 1/4

- Existe uma vasta teoria de escalonamento **tempo real hard**
  - Milhares de artigos
- Quase toda a teoria (matemática) de escalonamento tempo real visa sistemas de tempo real hard
  - Garantia para os deadlines provada formalmente
- A demanda de prova formal limita o espaço de projeto do software
  - Apenas técnicas com pior caso razoável
    - Não pode usar tabela hash
- A demanda de prova formal limita o espaço de projeto do hardware
  - Tools para análise de wcet suportam poucos processadores
  - Caches, barramentos são problemas
- A demanda de prova formal aumenta custos de desenvolvimento
  - Subutilização do hardware, ferramentas mais caras, mais atividades

Teoria de Escalonamento Tempo Real 2/4

- Os custos e as limitações da prova formal a tornam aceitável somente em sistemas safety-critical
  - Principalmente se houver certificação
- Mercado restrito:
  - Aviões
  - Satélites
  - Carros de luxo, futuristas (tende a crescer)
- Aplicação da teoria depende da evolução dos processadores
  - Processadores com tempo de execução determinista
    - Comercialmente improvável
  - Processadores com tempo de execução aleatório
    - Comercialmente improvável

Teoria de Escalonamento Tempo Real 3/4

- No outro extremo ...
- Métodos tradicionais de engenharia de software conseguem lidar com **sistemas de tempo real soft**, desde que:
- Acompanhados com testes de stress
- Projetados levando em consideração os aspectos temporais
  - Impedimentos ao atendimento dos deadlines devem ser removidos do projeto
  - Por exemplo, grandes contenções causadas por mecanimos de sincronização
  - Algoritmos de escalonamento não apropriados

Teoria de Escalonamento Tempo Real 4/4

- Sistemas de tempo real com garantia testada demandam cuidados especiais
- Design do software e do hardware precisa levar em consideração a necessidade de determinismo
- Testes de stress são absolutamente necessários para a confiabilidade do produto
- Resultados teóricos válidos para sistemas críticos podem ser usados como heurísticas no projeto de sistemas firmes
- Não existe garantia formal para os deadlines
- Mecanismos para o tratamento de exceções temporais devem ser embutidos na aplicação
  - Tais como reiniciar ou levar para um estado seguro

Principais Desafios 1/5

- Quais são os principais desafios da pesquisa considerando cada uma das 3 abordagens ?
- Hard Real-Time Systems (garantido por prova)
- Quasi-Hard Real-Time Systems (garantido por teste)
- Soft Real-Time Systems (não garantido, mas bem testado)

Principais Desafios do Hard Real-Time 2/5

- Estender as ferramentas de wcet para arquiteturas mais sofisticadas do que as suportadas atualmente
- Flexibilizar os modelos de tarefas usados em análises de escalonabilidade para permitir a modelagem de sistemas reais
  - Overheads, tarefas auxiliares, interações inesperadas
- Avançar a teoria no contexto de multiprocessadores
  - Considerando todas as suas peculiaridades

Principais Desafios do Quasi-Hard Real-Time 3/5

- Estabelecer metodologias de teste de stress para aplicações de tempo real onde
  - Não existe garantia formal de que nenhum deadline será perdido
  - Existe a necessidade da crença de que nenhum deadline será perdido
- Combinar medições de partes do código com análise de escalonabilidade
  - Para que o desenvolvedor possa identificar situações raras, não observadas facilmente em testes, mas que levarão a perda de um deadline
- Criar ferramentas que permitam ao desenvolvedor da aplicação identificar as fontes de atraso no sistema (aplicação e kernel)
- Melhorar SOs para que os mesmos possam ser usados neste tipo de aplicação
  - Até mesmo Linux preempt-rt com deadlines fáceis

Principais Desafios do Soft Real-Time 4/5

- Determinar formas para especificar requisitos temporais que impõem limites às perdas de deadlines
  - De acordo com a semântica da aplicação
- Criar métodos para desenvolver os respectivos casos de teste a serem usadas na verificação da implementação
- Criar ferramentas que permitam ao desenvolvedor da aplicação identificar as fontes de atraso no sistema
  - Tais fontes podem estar na aplicação e/ou no kernel
- Melhorar os kernels de SO para que os mesmos não comprometam o comportamento temporal da aplicação
  - Linux preempt-rt com deadlines não tão fáceis

Resumo

- Existe a necessidade de **diferentes abordagens** para o escalonamento tempo real
- Principal classificação é com respeito a **garantia dos deadlines**
- Hard Real-Time Systems
  - Verificação formal de que todos os deadlines são cumpridos
  - Mais caro, impõe severas restrições ao hardware/software
- Quasi-Hard Real-Time Systems
  - Verificação por teste de que todos os deadlines são cumpridos
  - Design cuidadoso, impõe restrições ao SO
- Soft Real-Time Systems
  - Verificação por teste de que poucos deadlines são perdidos
  - Desenvolvimento quase convencional, alguns cuidados a mais