

Sistemas de Tempo Real: O Tempo Real

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

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

Maio/2010

1

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2010

Relógio Físico - Mecânico

- Primeiros relógios mecânicos na Europa no século XIII
 - Marcavam apenas as horas
- Marcação de minutos a partir do século XVII
- Marcação de segundos no século XVIII
 - Relógios de pêndulos
 - Observatórios astronômicos e cronômetros marítimos
- Observatório de Paris em 1676
 - Resolução de alguns segundos
 - Erro de 1-2 minutos em vários meses

2

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2010

Relógio Físico - Astronômico

- Medição do tempo baseada na **rotação da terra**
 - Referência em um livro de 1685
- Sol no ponto aparente mais alto: Trânsito Solar
- Intervalo entre dois trânsitos solares: Dia Solar
- $1/(24*3600)$ do Dia Solar: Segundo Solar
- O dia solar não é constante, varia ao longo do ano
 - Inclinação do eixo da Terra
 - Forma elíptica da órbita
 - Pode-se usar o segundo solar médio do ano
- Maior diferença com o aparente antes do médio
 - 16,5 minutos em novembro
- Maior diferença com o aparente depois do médio
 - 14,5 minutos em fevereiro

3

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2010

Relógio Físico - Astronômico

- UT (Universal Time)
 - Tempo definido em termos da rotação da Terra em torno do seu eixo, usando o Sol como referência
 - Tempo solar médio em Greenwich
- UT0
 - Observação ótica do transito de estrelas
- UT1
 - UT0 corrigida considerando o movimento polar
 - Proporcional ao ângulo de rotação da terra, espaço como referência
- UT1 varia
 - Mudanças periódicas (estações do ano)
 - Flutuações aleatórias (núcleo da Terra)
 - Constante desaceleração
- UT2
 - Correção empírica para a variação sazonal

4

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2010

Relógio Físico - Astronômico

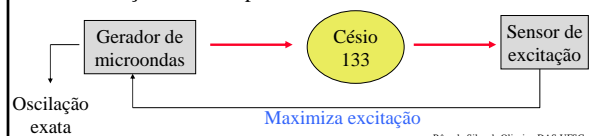
- Rotação da terra diminui com o tempo
 - 400 dias por ano a 300 milhões de anos atrás
 - Os dias estão ficando mais longos
 - Dia aumenta em torno de 1,7ms por século
- Qual a incerteza na leitura da UT ?
 - Em torno de 1ms nos anos 1950
 - Em torno de 10us atualmente
- ET (Ephemeris Time, Efemérides)
 - Definido em 1950
 - Baseado no movimento orbital da Terra em torno do Sol
 - Mais estável que a rotação da terra
 - Difícil de medir, criadas ET0, ET1, ET2

5

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2010

Relógio Físico - Atômico

- Átomos possuem frequências características
- Nuvem de Césio 133 atravessa uma câmara de vácuo
- Campo magnético seleciona apenas átomos em um certo estado de energia
- Átomos selecionados passam por microondas
- Na frequência exata, átomos mudam estado de energia
- Mudança de estado pode ser medida



6

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2010

Relógio Físico - Atômico

- Relógio atômico criado no final da década de 1940
- Relógio atômico fornece uma oscilação estável
- Porém, quantos períodos desta oscilação fazem 1 segundo?

- Vários anos gastos para correlacionar a oscilação do gerado pelo relógio atômico com a hora astronômica
- Em 1955 com a UT2
- Depois com a ET
- Definição de segundo atômico: Tempo necessário para ocorrerem 9.192.631.770 períodos da oscilação obtida do átomo de césio 133
- Adotado como unidade fundamental do Sistema Internacional de Unidades em 1967

7

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2010

Relógio Físico - Atômico

- Ainda na década de 1950 relógios atômicos comerciais
- Horas atômicas locais independentes
 - Exemplo: TA(ONRJ), Observatório Nacional no Rio de Janeiro
- Necessidade de gerar uma hora atômica média
- Média coordenada pelo Bureau International de l'Heure - BIH, Paris-França, deu origem ao TAI em 1972
 - Mais de 50 laboratórios
 - Cada laboratório informa o BIH quantos ticks ocorreram
- BIH faz a média, produz o **International Atomic Time - TAI**
- Em 1988 o BIH foi dissolvido
- Definição do TAI passou para o BIPM
 - Bureau International des Poids et Mesures

8

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2010

Relógio Físico - UTC

- Problema:

24*3600 segundos do TAI é cerca de 2,5 mS menor que o dia solar médio
 - Dia solar médio está ficando maior
 - Rotação da terra está ficando mais lenta
- Erro é cumulativo
 - Quase 1 segundo ao longo de 1 ano
- Usando somente o TAI
 - Meio-dia do relógio e do sol ficariam diferentes

9

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2010

Relógio Físico - UTC

- Solução é atrasar o TAI de vez enquanto para manter a sincronia com o movimento aparente do sol
 - Atrasado 1 segundo de cada vez
 - Sempre as 24:00 de 31 de dezembro
 - São os chamados "leap seconds"
- Este relógio atômico corrigido é chamado a partir de 1967 de **UTC - Universal Coordinated Time**

- Diferença máxima entre UTC e UT1 é de 0,950 ms
- UTC é mantida pelo BIPM
- UTC varia conforme a TAI, mas difere por um número inteiro de segundos
- Corrige desaceleração da Terra, a qual não é exatamente constante
 - Até 2010 foram 34 segundos atrasados
- UTC é padrão oficial e de fato em todo o planeta

10

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2010

Relógio Físico - Via GPS

- GPS - Global Positioning System
- Sistema de navegação baseado em satélites orbitando a terra
- Fornece 24 horas por dia, no globo inteiro:
 - Posição precisa em 3 dimensões
 - Tempo preciso, relacionado com o UTC
- Operado pela Força Aérea americana, dirigido pelo DoD
- Projetado originalmente para fins militares
- Atualmente usado largamente para fins civis:
 - Monitoração de veículos, mapeamento, navegação
- Capacidade operacional completa em julho de 1995
 - Continuamente melhorado, nova geração prevista para 2010
- Enorme variedade de empresas fornecedoras e diferentes modelos
 - Com diferente precisão e preço

11

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2010

Relógio Físico - Via GPS

- Níveis de precisão diferentes para civis e militares
 - 100ns ou menos
- GPS-Time associado com o TAI
- Mantido por relógios atômicos em terra e nos satélites
- Receptores para tempo são diferentes dos para navegação
 - Em geral assumem posição fixa e conhecida
 - Atrasos na antena, cabo e eletrônica devem ser computados
- Receptores para tempo fornecem
 - Um pulso por segundo
 - Onda quadrada com frequência precisa (GPS Disciplined Oscillators)
- Muitos sinalizam tempo via RS-232, IEEE-488 e ethernet
- Problema: Colocação da antena é crítica
 - Visada direta entre antena e satélite, reflexos, perdas no cabo
 - Determinação da posição da antena

12

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2010

Relógio Físico – Via NTP

- Network Time Protocol (NTP)
- Protocolo para Internet, dissemina a hora certa
- Mais fácil que instalar receptor GPS em todos os computadores
 - Menos preciso
- Baseado em UDP/IP
- Versão zero em 1985, precisão melhor que 100ms
- Versão 4 do NTP inclui aspectos de segurança
- Existe uma versão simplificada:
 - SNTP, Simple Network Time Protocol version 4
- Precisão depende de onde está o servidor SNTP consultado
 - 10ms, 1ms, 1us

13

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2010

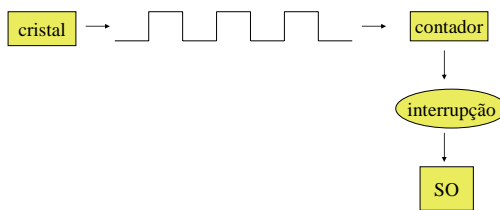
Relógio Físico - Computadores

- Cristais de quartzo sob tensão
 - Oscilam em uma frequência bem definida
 - Frequência depende do tipo de cristal, lapidação e tensão
- Um contador (Timer) é iniciado com algum valor
- Cada oscilação do cristal decreta o contador
- Quando contador chega a zero
 - Interrupção é gerada (clock tick)
 - Contador é reinicializado
- Período das interrupções definido pelo valor colocado na inicialização do timer

14

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2010

Relógio Físico - Computadores



- Cristais variam
 - É impossível produzir cristais com frequência exatamente igual
 - Na prática é preciso considerar frequências ligeiramente diferentes

15

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2010

Sincronização de Relógios

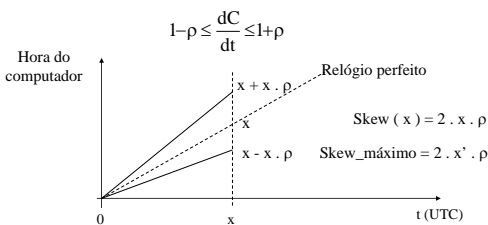
- Seja t a hora UTC
- Seja $C_p(t)$ a hora indicada pela máquina p no instante t
- Ideal: Para qualquer p , qualquer t , $C_p(t) = t$
- Ou ainda: $dC / dt = 1$
 - $dC / dt > 1$ indica relógio muito rápido
 - $dC / dt < 1$ indica relógio muito lento
- Exemplo: Timer deve gerar 60 interrupções por segundo
 - Resulta em $60 * 60 * 60 = 216000$ ticks por hora
 - Erro típico é de 10^{-5}
 - Máquina típica vai gerar entre 215998 e 216002 ticks por hora
- Diferença absoluta entre relógios é chamada **SKEW**

16

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2010

Sincronização de Relógios

- Drift Rate máximo - ρ
 - Indica a precisão do timer
 - Definido por:



17

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2010

Sincronização de relógios

- Algumas aplicações demandam sincronização de relógios
 - Frequente no mundo do controle e automação
- Interna
 - Apenas entre os computadores do sistema
 - Sem relação com o mundo exterior
- Externa
 - Com o mundo exterior, ou seja, UTC
- Centralizada
- Distribuída

18

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2010

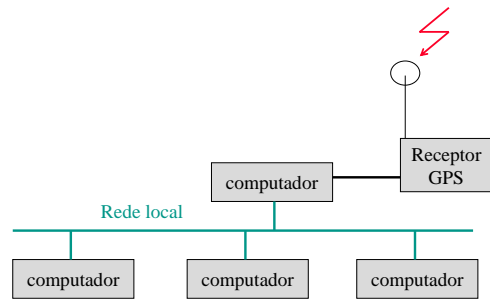
Sincronização - Solução Centralizada

- Time Server tem acesso ao UTC
- Periodicamente, no máximo a cada $Skew_{máximo} / 2 \cdot \rho$
 - Clientes perguntam a hora
 - Time Server responde a UTC
- Se $UTC < hora\ local$
 - Não pode atrasar o relógio
 - Faz a correção gradualmente
- Tempo para comunicação entre clientes e servidores
 - Mede atraso entre request e reply, divide por 2
 - Usa média do atraso de vários pares request-reply
 - Considera tempo de processamento do server

19

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2010

Sincronização Através de GPS



20

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2010

Sincronização - Solução Distribuída

- Não existe um servidor centralizado
- Existem intervalos de sincronização
- No início de cada intervalo:
 - Cada máquina difunde a sua hora local
 - Relógios dessincronizados, difusão não ocorre ao mesmo tempo
- Após enviar a sua hora:
 - Cada máquina coleta todas as outras difusões
 - Limita coleta a um intervalo S
 - Descarta valores extremos
 - Estima atrasos de comunicação e processamento
 - Computa nova hora local fazendo a média

21

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2010

Resumo

- Algumas aplicações necessitam manipular o tempo
- Relógio Físico
 - Astronômico
 - Atômico
 - UTC
 - Via GPS ou NTP
- Computadores utilizam a oscilação dos cristais
 - Precisão é limitada
- Sincronização de Relógios é por vezes necessária
 - Pode ser interna ou externa
 - Algoritmo centralizado
 - Algoritmo distribuído

22

Rômulo Silva de Oliveira, DAS-UFSC, maio/2010