

---

# O Tempo Real

## **Fundamentos dos Sistemas de Tempo Real**

Rômulo Silva de Oliveira

eBook Kindle, 2018

[www.romulosilvadeoliveira.eng.br/livrotemporeal](http://www.romulosilvadeoliveira.eng.br/livrotemporeal)

Outubro/2018



# Tempo Real 1/2

---

- É o tempo do mundo físico
- É o tempo do relógio da parede
  
- Não é tempo simulado
  - Simulações meteorológicas
  - Videogame
  
- Não é um tempo lógico
  - O qual fornece uma ordem dissociada do mundo físico

- Como o tempo real é medido ?
  - Relógio é o dispositivo que mede a passagem do tempo
- Todos os relógios se baseiam em:
  - Um oscilador mais ou menos estável
  - Conectado a um contador de ciclos

# Tempo Real: Relógios Mecânicos 1/4

---

- Primeiros relógios mecânicos na Europa no século XIII
  - Marcavam apenas as horas
  - Maioria dos trabalhadores precisava apenas de uma estimativa grosseira das horas
  - Visualizar o sol era suficiente para a maioria da população
  - Porém, as atividades dos monges Beneditinos seguiam uma rigorosa escala de horários (trabalho e oração)
    - Cadfael
    - O Nome da Rosa

# Tempo Real: Relógios Mecânicos 2/4

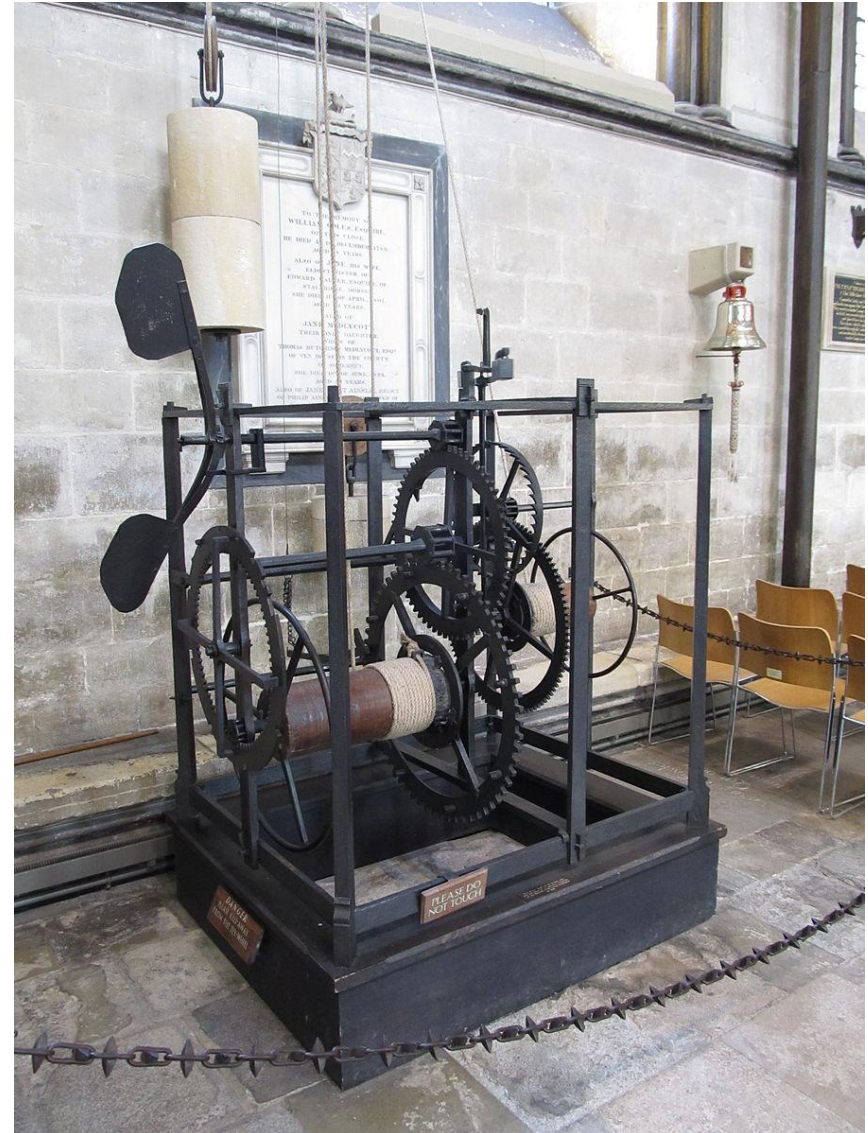
---

- Richard of Wallingford (1292-1336)
  - Abade e matemático na Abadia de St. Alban (Inglaterra)



# Tempo Real: Relógios Mecânicos 3/4

- Relógio da Catedral de Salisbury (Inglaterra)
- Datado de 1386
- Relógio mecânico mais antigo da Europa em funcionamento



# Tempo Real: Relógios Mecânicos 4/4

---

- Em 1714, o governo Britânico ofereceu um prêmio para quem conseguisse determinar a longitude de um navio no mar
  - Cerca de US\$20M em valores atuais
- Uma solução:
  - Terra gira  $360^\circ$  em 24 horas
  - São  $15^\circ$  em 1 hora
  - Basta um relógio preciso com a hora certa de Londres
  - John Harrison recebeu o prêmio (trabalhou de 1737 a 1773)
- Filme “Longitude” feito para a TV em 2000

# Tempo Real: Relógios Astronômicos 1/7

---

- Como a duração de **um dia** é definida ?
- Medição do tempo baseada na **rotação da terra**
  - Movimento aparente do Sol no céu
  - Adequado para seres biológicos
- Sol no ponto aparente mais alto: Trânsito Solar
  - Tróprico de Capricórnio passa em Guarulhos-SP
- Intervalo entre dois trânsitos solares: Dia Solar
- $1/(24*3600)$  do Dia Solar: Segundo Solar



# Tempo Real: Relógios Astronômicos 2/7

---

- O dia solar não é constante, varia ao longo do ano
  - Inclinação do eixo da Terra (vários movimentos oscilatórios)
  - Forma elíptica da órbita
  - Atração gravitacional da Lua
  - Perturbações Aleatórias
- Pode-se usar o segundo solar médio de um ano
  - Dia solar varia +/- 15 minutos em torno do valor médio anual

# Tempo Real: Relógios Astronômicos 3/7

---

- 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 (Inglaterra)
- UT0
  - Observação ótica do transito de estrelas
- UT1
  - UT0 corrigida considerando o movimento polar
  - Proporcional ao ângulo de rotação da terra, espaço como referência
- UT2
  - Correção empírica para a variação sazonal

# Tempo Real: Relógios Astronômicos 4/7

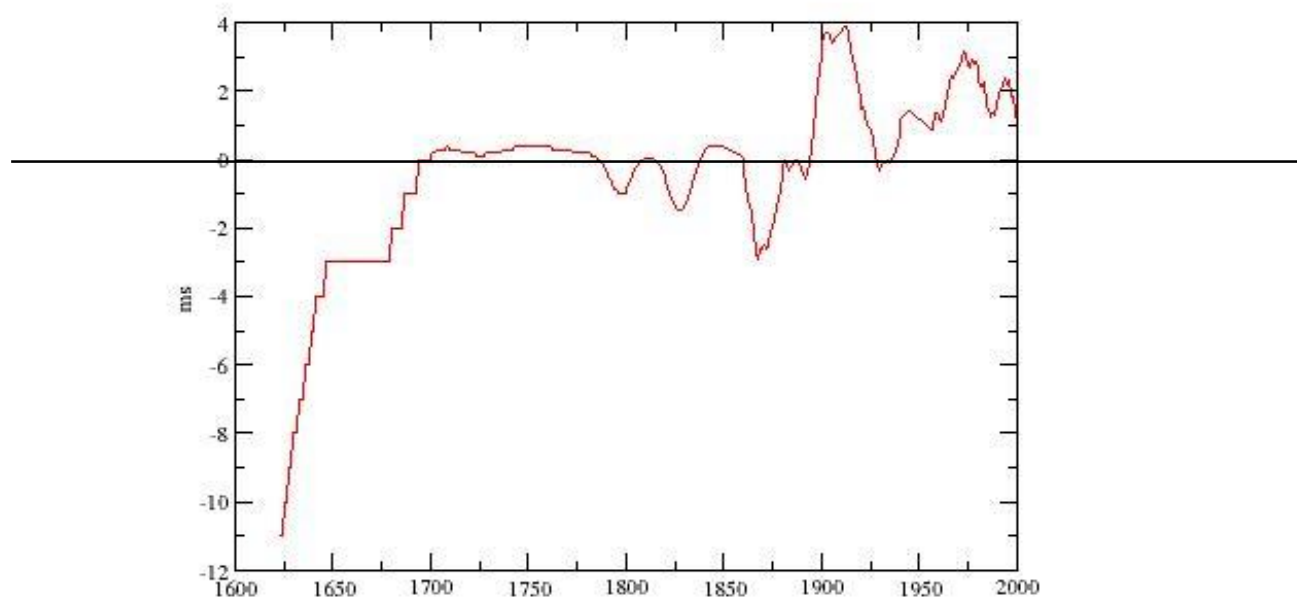
---

- UT varia
- Flutuações aleatórias (núcleo da Terra)
  - Terremoto no Japan em 2011 encurtou o dia em 1.8us
  - Terra gira mais rápido devido à redistribuição de massa
- Constante desaceleração da rotação da Terra
  - Devido ao afastamento da Lua

# Tempo Real: Relógios Astronômicos 5/7

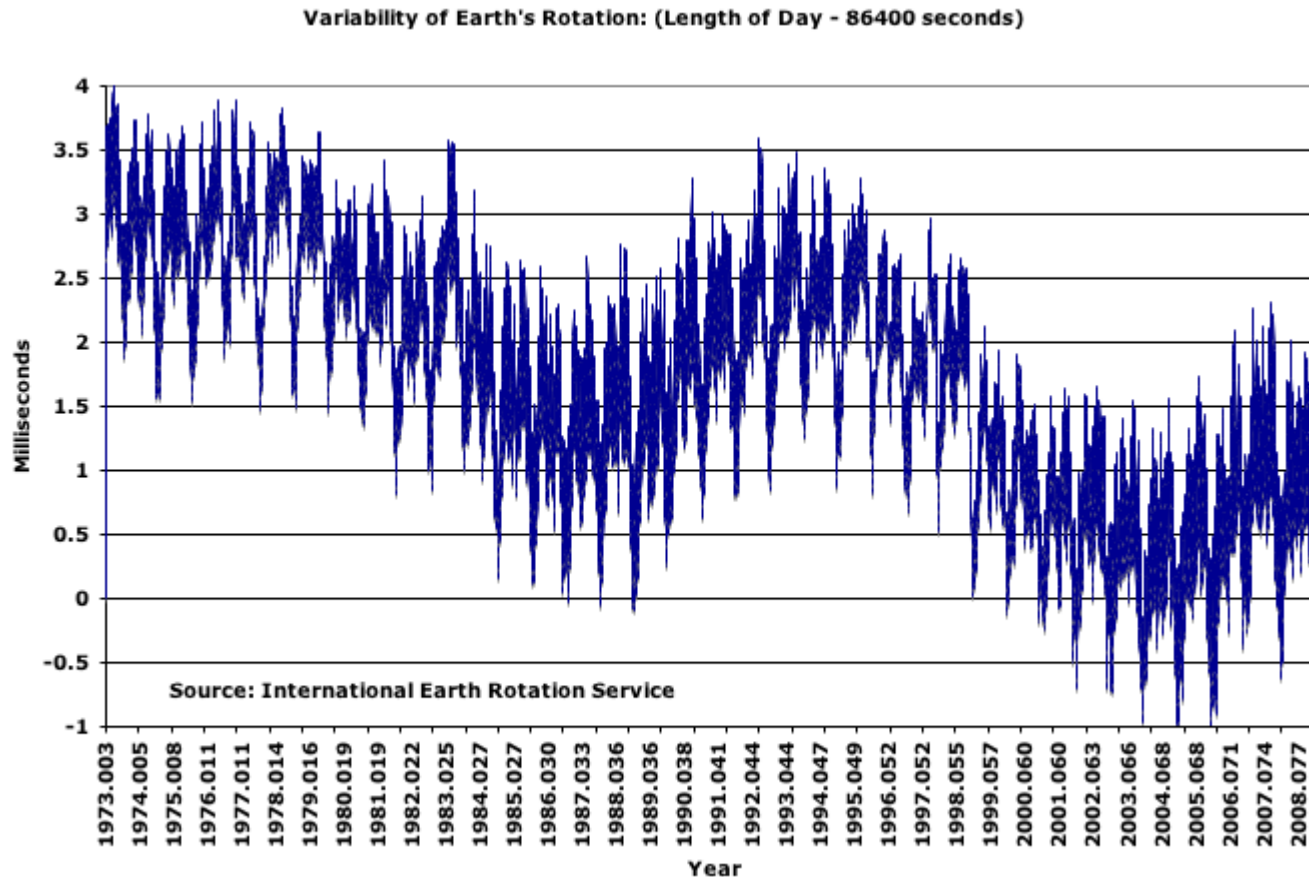
---

- 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



# Tempo Real: Relógios Astronômicos 6/7

- Variação da duração do dia



# Tempo Real: Relógios Astronômicos 7/7

---

- 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 em torno de seu eixo
  - Difícil de medir, criadas ET0, ET1, ET2, etc
- Porém, tudo mudou na década de 1950

# Tempo Real: Relógios Atômicos 1/6

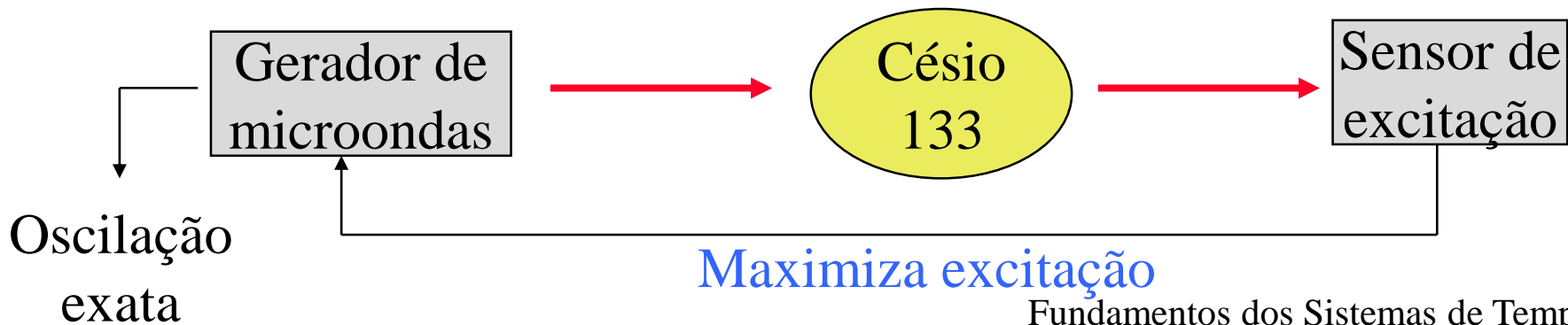
---

- Relógio atômico criado no final da década de 1940
- Utiliza propriedades imutáveis dos átomos
  - Frequências associadas com as transições entre estados de energia dos elétrons
- Existem hoje relógios atômicos com diversas tecnologias
  - Precisão de nanosegundos por dia

# Tempo Real: Relógios Atômicos 2/6

---

- 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

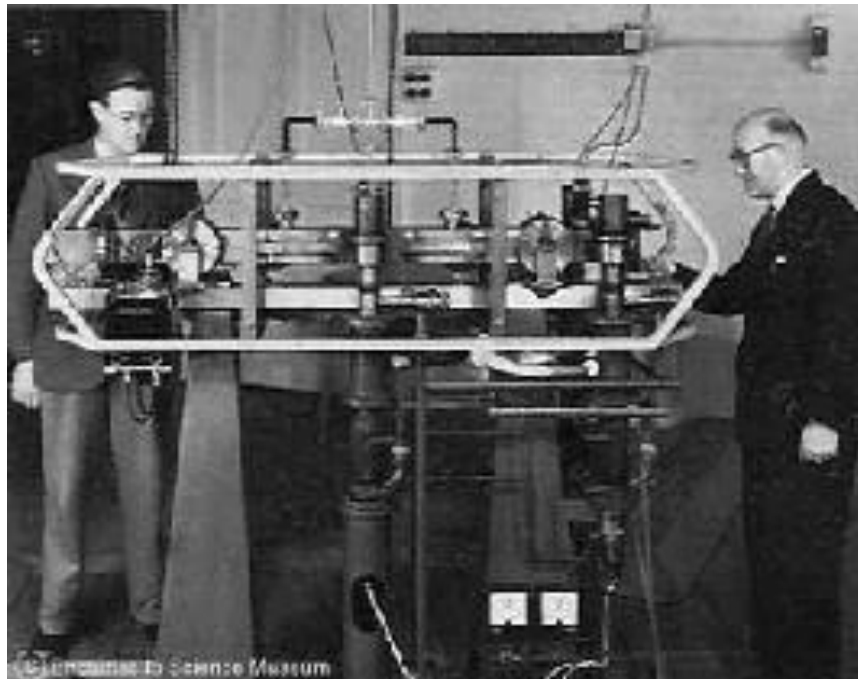




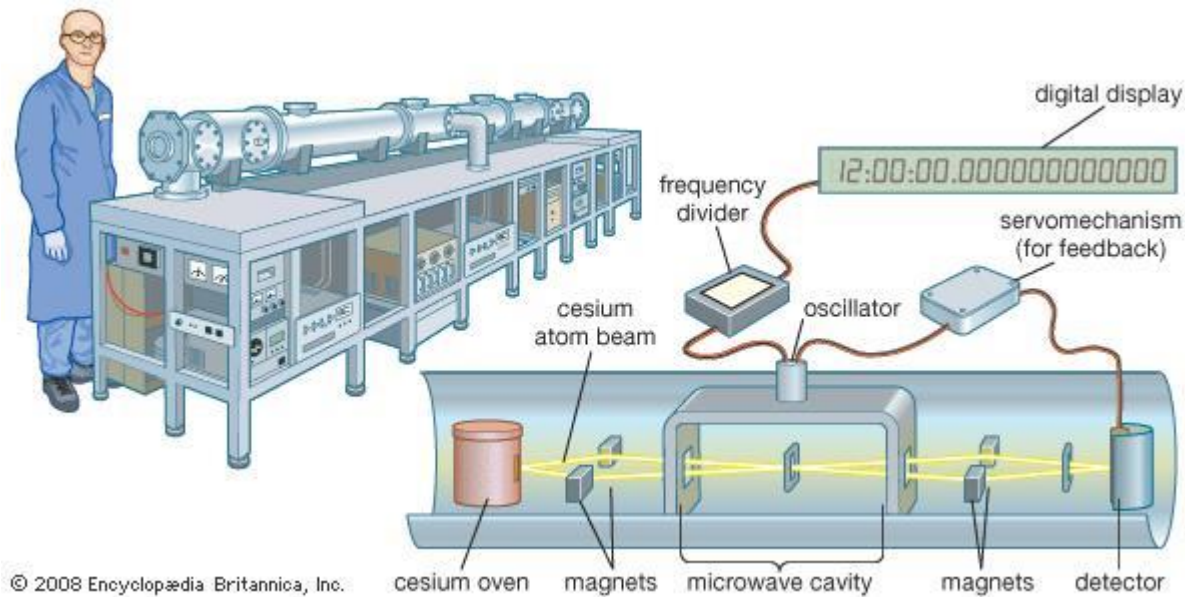
# Tempo Real: Relógios Atômicos 3/6

---

- Relógio atômico de 1955 usando Césio 133
- National Physical Laboratory, Reino Unido
- Erro menor do que 1 segundo em 300 anos
  - Hoje é menor que 1 segundo em milhões de anos



# Tempo Real: Relógios Atômicos 4/6



© 2008 Encyclopædia Britannica, Inc.

# Tempo Real: Relógios Atômicos 5/6

---

- Quantos períodos desta oscilação fazem 1 segundo?
- Vários anos gastos para correlacionar a oscilação do gerada 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**

# Tempo Real: Relógios Atômicos 6/6

---

- Ainda na década de 1950 relógios atômicos comerciais
- Horas atômicas locais independentes
  - 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 400 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 Bureau International des Poids et Mesures

# Tempo Real: UTC 1/5

---

- 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

# Tempo Real: UTC 2/5

---

- Solução é atrasar o TAI de vez enquando para manter a sincronia com o movimento aparente do sol
- Atrasado 1 segundo de cada vez
- Sempre as 24:00 de 31 de dezembro (ou 30 de junho)
- São os chamados “leap seconds”
  
- Este relógio atômico corrigido é chamado a partir de 1967 de

UTC - Universal Time Coordinated

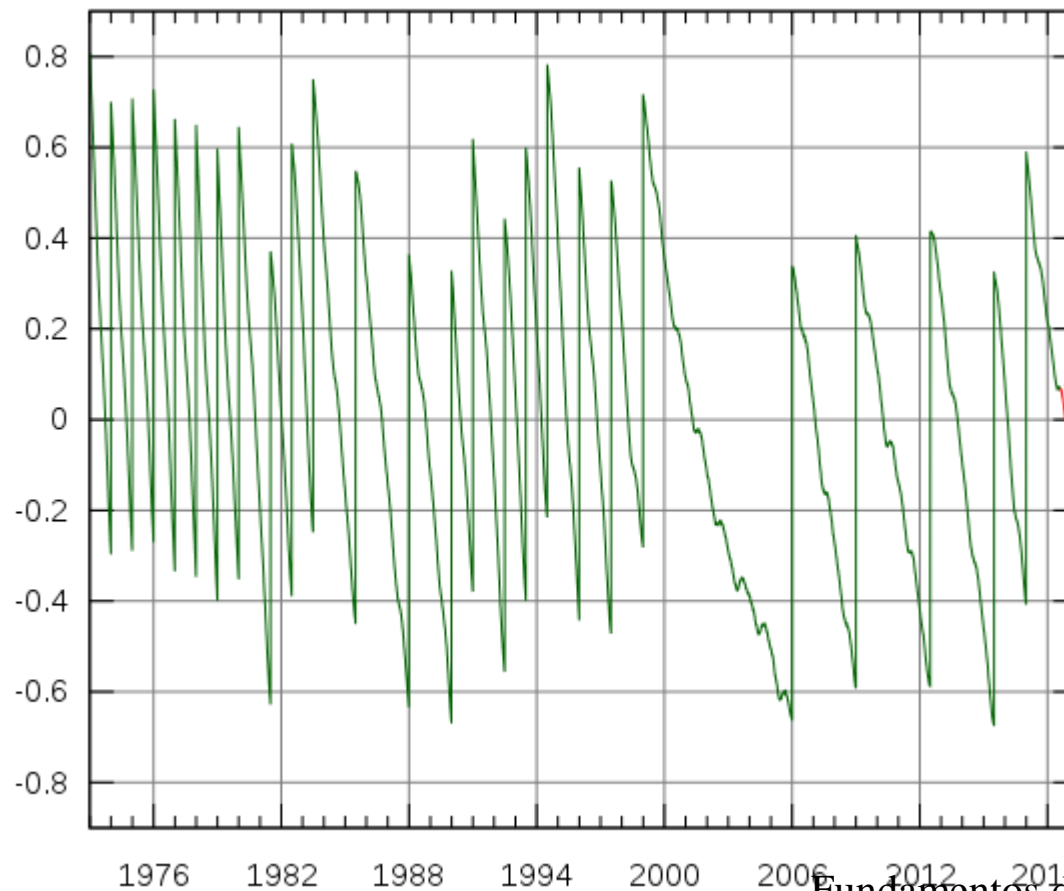
# Tempo Real: UTC 3/5

---

- 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 varia)
- Até novembro/2017 foram 37 segundos atrasados
- Em 10/12/2017 temos  $UT1-UTC = +0.2$  segundos
  - Sol está adiantado em função do último leap second
  - Não haverá leap second em dezembro de 2017
- UTC é padrão oficial e de fato em todo o planeta

# Tempo Real: UTC 4/5

- Diferença entre UT1 e UTC
  - Pulos verticais são os *leap seconds*



Agosto  
2018



# Tempo Real: UTC 5/5

---

- Como obter a UTC ?
- Receptor GPS
- Internet

# Tempo Real: UTC via GPS 1/3

---

- GPS - Global Positioning System
  - Sistema de navegação baseado em satélites
- Fornece 24 horas por dia, no globo inteiro:
  - Posição precisa em 3 dimensões
  - Tempo preciso, relacionado com o UTC
- Receptores para tempo são diferentes dos para navegação
- Assumem posição fixa e conhecida
- Consideram atrasos na antena, cabo e eletrônica

# Tempo Real: UTC via GPS 2/3

---

- 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
- Relógios atômicos em terra e nos satélites
  - Precisão de 100ns ou até menos
- Enorme variedade de empresas fornecedoras
  - Diferentes modelos, preços e precisão

# Tempo Real: UTC via GPS 3/3

- GPS1000 Time Receiver – World Time Solutions
  - Precisão de 100 ns da UTC



# Tempo Real: UTC via Internet 1/3

---

- 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

# Tempo Real: UTC via Internet 2/3

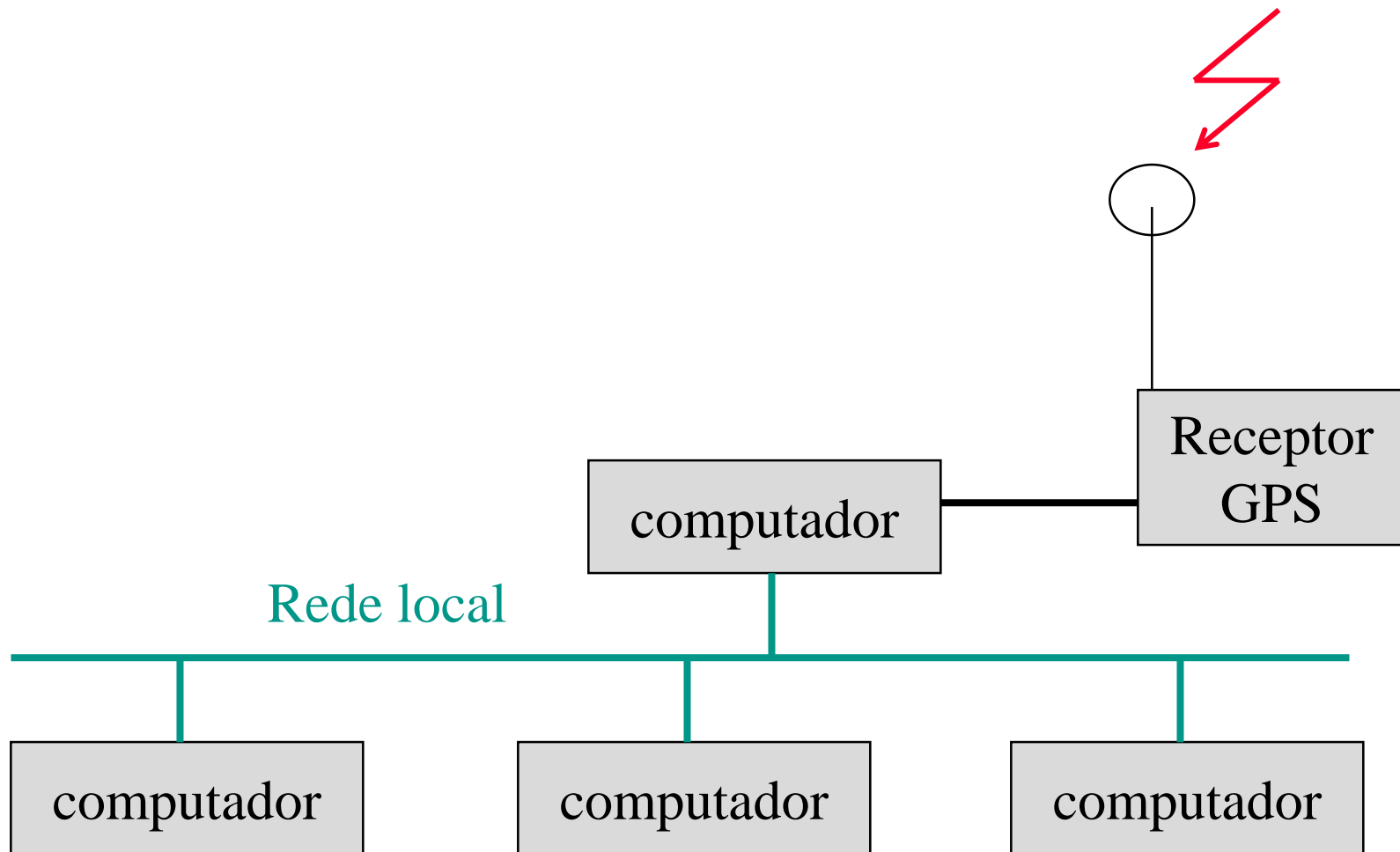
---

- MC1000 NTP Time Server – World Time Solutions
  - Sincroniza a rede usando protocolos NTP / SNTP



# Tempo Real: UTC via Internet 3/3

---



# Tempo Real: Relógios em Computadores 1/9

---

- Sincronização com GPS ou NTP ocorre em intervalos
  - GPS: a cada segundo
  - NTP: depende da estabilidade do relógio,  $> 16$  segundos
- Como o computador mantém a hora entre ajustes ?
  - Relógio interno que é ajustado de tempos em tempos
  - Oscilador do relógio interno: [Cristais de quartzo](#)



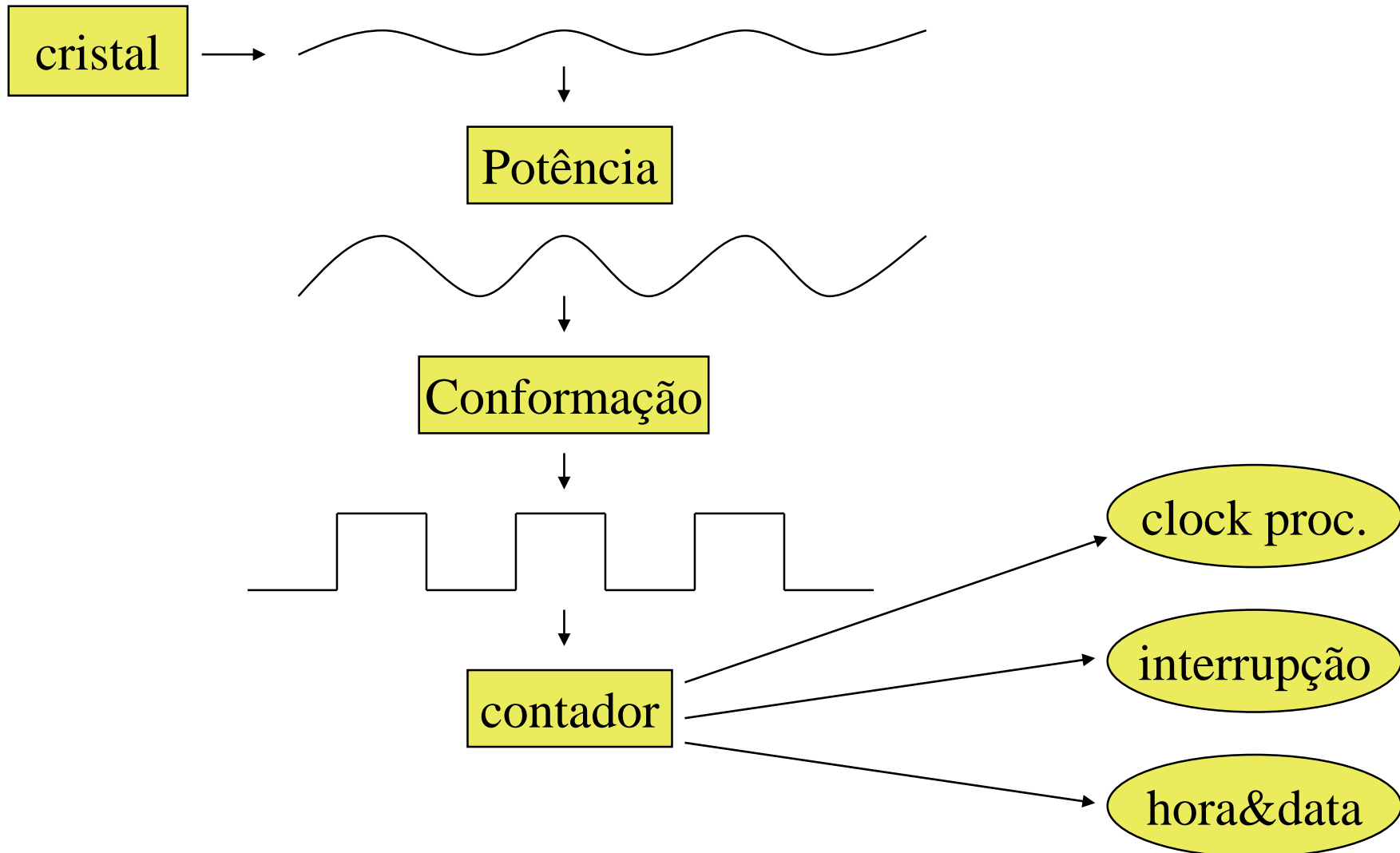


# Tempo Real: Relógios em Computadores 2/9

---

- Cristais de quartzo sob tensão mecânica e elétrica
- Oscilam em uma frequência bem definida
- Frequência depende do tipo de cristal, lapidação e tensão
  
- Relógio em hardware
  - Conta os ciclos, mantem a hora
- Temporizador em hardware (Timer)
  - É iniciado com algum valor
  - Cada oscilação do cristal decrementa o contador
  - Quando contador chega a zero, interrupção é gerada
  - Contador é reinicializado

# Tempo Real: Relógios em Computadores 3/9



# Tempo Real: Relógios em Computadores 4/9

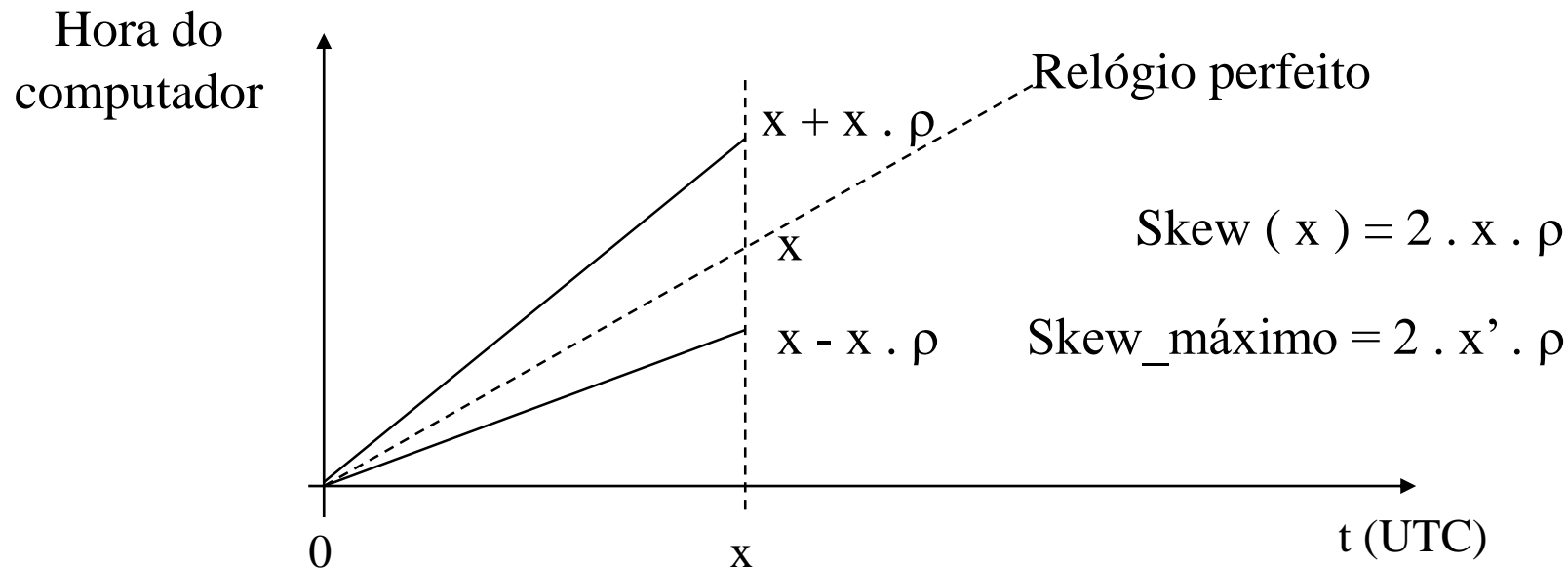
---

- Cristais variam
  - É impossível produzir cristais com frequência exatamente igual
  - Na prática é preciso considerar frequências ligeiramente diferentes
- Seja  $t$  a hora UTC
- Seja  $C_p(t)$  a hora indicada pelo computador  $p$  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

# Tempo Real: Relógios em Computadores 5/9

- Diferença absoluta entre relógios é chamada **skew**
- Diferença nas frequências é chamada **drift rate**
- O drift rate máximo  $\rho$  indica a precisão do timer:

$$1-\rho \leq \frac{dC}{dt} \leq 1+\rho$$

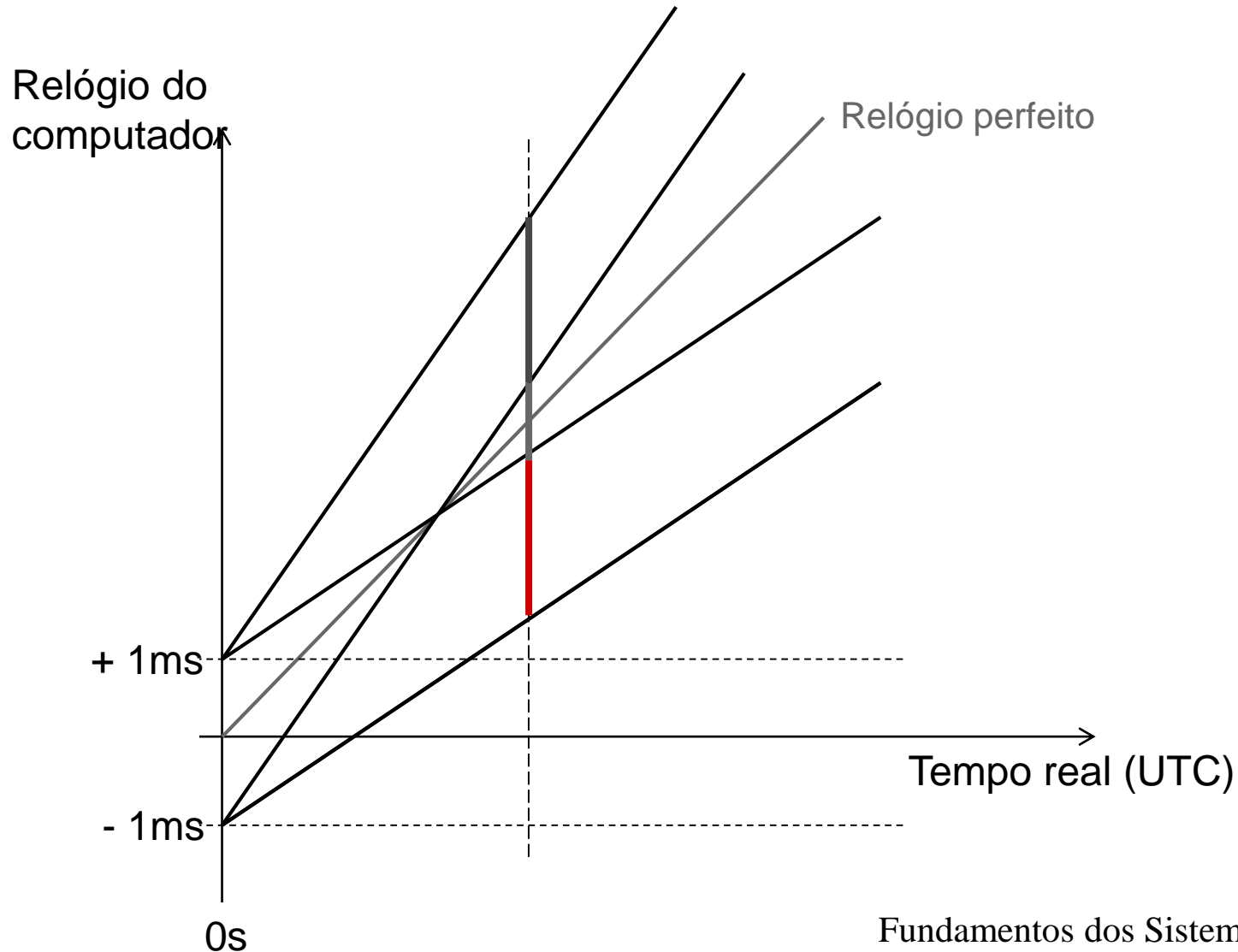


# Tempo Real: Relógios em Computadores 6/9

---

- O relógio do computador pode iniciar adiantado
  - E continuar adiantando mais em função da taxa de deriva
- Ou então pode iniciar atrasado
  - E continuar atrasando mais
- Estas duas situações extremas definem a faixa de horários que poderão ser observados no relógio do computador, a medida que o tempo real (UTC) avança
- No caso geral não sabemos se o relógio de um computador K qualquer inicia adiantado ou atrasado, e depois adianta ou atrasa
- A hora indicada por ele será dada por  $CK(t) = (\pm\Delta r) + t + (\pm(\rho \times t))$
- Só podemos comparar anotações de tempo se elas forem feitas segundo um mesmo relógio de referência
  - Relógio de referência é normalmente a UTC
  - Em alguns casos pode ser o relógio de um dos computadores do sistema
- Anotações de tempo feitas a partir de outros relógios precisam ser “traduzidas” para o relógio de referência

# Tempo Real: Relógios em Computadores 7/9



# Tempo Real: Relógios em Computadores 8/9

---

- Algumas aplicações demandam sincronização de relógios
  - Controle semafórico
  - Usina hidroelétrica
- Sincronização interna
  - Apenas entre os computadores do sistema
  - Sem relação com o mundo exterior
- Sincronização externa
  - Com o mundo exterior, ou seja, UTC

# Tempo Real: Relógios em Computadores 9/9

---

- Drift rate típico em torno de  $10^{-5}$
- O quão rápido os relógios se afastam ?
  
- Dois relógios tem a mesma hora
- Qual o erro depois de 1 dia ?

$$\text{skew} = 2 \times 10^{-5} \times ( 24 \times 60 \times 60 ) = 1,728 \text{ segundos}$$



# Resumo

---

- O que é o tempo real
- Relógios mecânicos
- Relógios astronômicos
- Relógios atômicos, TAI
- UTC (TAI coordenada com UT1)
- Como obter UTC via GPS
- Como obter UTC via Internet
- Relógios em computadores

