MCTA025-13 - SISTEMAS DISTRIBUÍDOS

RELÓGIOS LÓGICOS

Emilio Francesquini

30 de julho de 2018

Centro de Matemática, Computação e Cognição
Universidade Federal do ABC

UFABC

DISCLAIMER

- Estes slides foram preparados para o curso de **Sistemas Distribuídos na UFABC**.
- Este material pode ser usado livremente desde que sejam mantidos, além deste aviso, os créditos aos autores e instituições.
- Estes slides foram adaptados daqueles originalmente preparados (e gentilmente cedidos) pelo professor **Daniel Cordeiro, da EACH-USP** que por sua vez foram baseados naqueles disponibilizados online pelos autores do livro "Distributed Systems", 3ª Edição em: `https://www.distributed-systems.net`.

Num relógio é quatro e vinte,
No outro é quatro e meia,
É que de um relógio pro outro
As horas vareia!

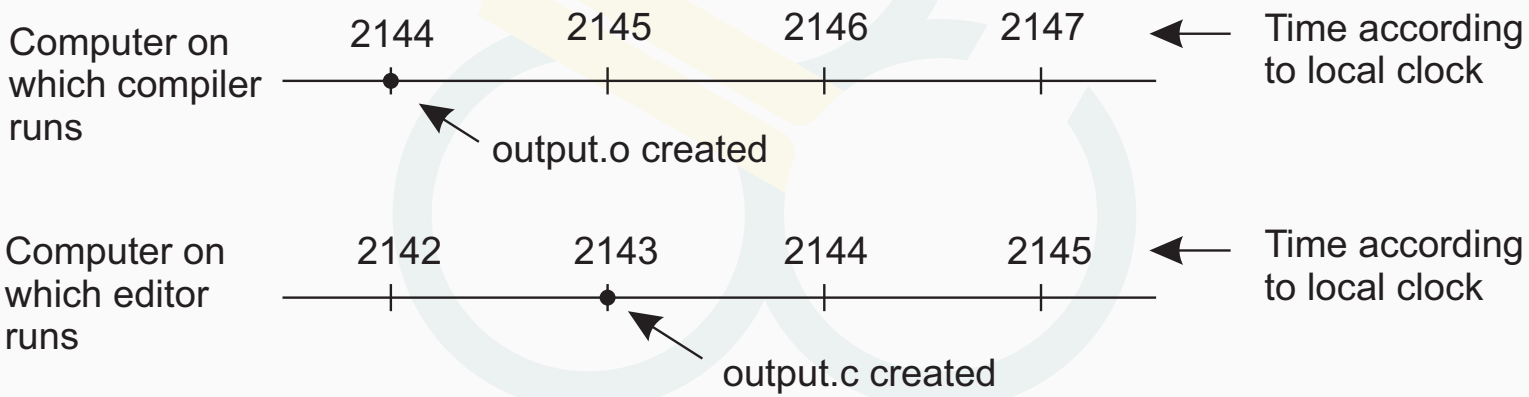
Adoniran Barbosa

SINCRONIZAÇÃO DE RELÓGIOS

- relógios físicos
- relógios lógicos
- relógios vetoriais (Próxima Aula)

- Em sistemas centralizados a definição do horário não é ambígua
- Em sistemas distribuídos isto não é verdade
  - Mesmo em sistemas multi-processador pode não ser verdade

Exemplo de problema: Make



O QUE É UM SEGUNDO?

- Dia solar - Tempo entre trânsitos solares
- Segundo solar - Dia solar / 86400 (3600 * 24)

Problema

- Em 1940 estabeleceu-se que o dia solar não é constante.
- Há 300 milhões de anos o ano tinha 400 dias.

O problema foi resolvido pegando a duração média do dia por um período muito longo.

OS RELÓGIOS ATÔMICOS

- Em 1948, com a invenção do relógio atômico passou a ser possível medir o tempo com muito mais precisão
- Os físicos então “tomaram” a definição do segundo dos astrônomos e definiram 1 segundo como o tempo que um átomo de césio 133 leva para fazer exatamente 9.192.631.770 transições
  - Este era o valor exato do segundo solar na época da definição
  - Deste então o segundo solar e O segundo divergiram em mais de 3 milissegundos

Na metade do século passado foram instituídos o **Bureau International de l'Heure (BIH)** e o **Temps Atomique International (TAI)**.

- Todos os países poderiam, então, seguir o tempo seguindo o TAI

Problema

- Como há uma defasagem entre o tempo solar e o tempo atômico em alguns milhares de anos o nascer do sol iria nascer ao meio dia
- Para corrigir essa defasagem estabeleceu-se o segundo bissexto
  - Introduzido sempre que a defasagem ultrapassar 800 milissegundos

Diferença entre UT1 e UTC

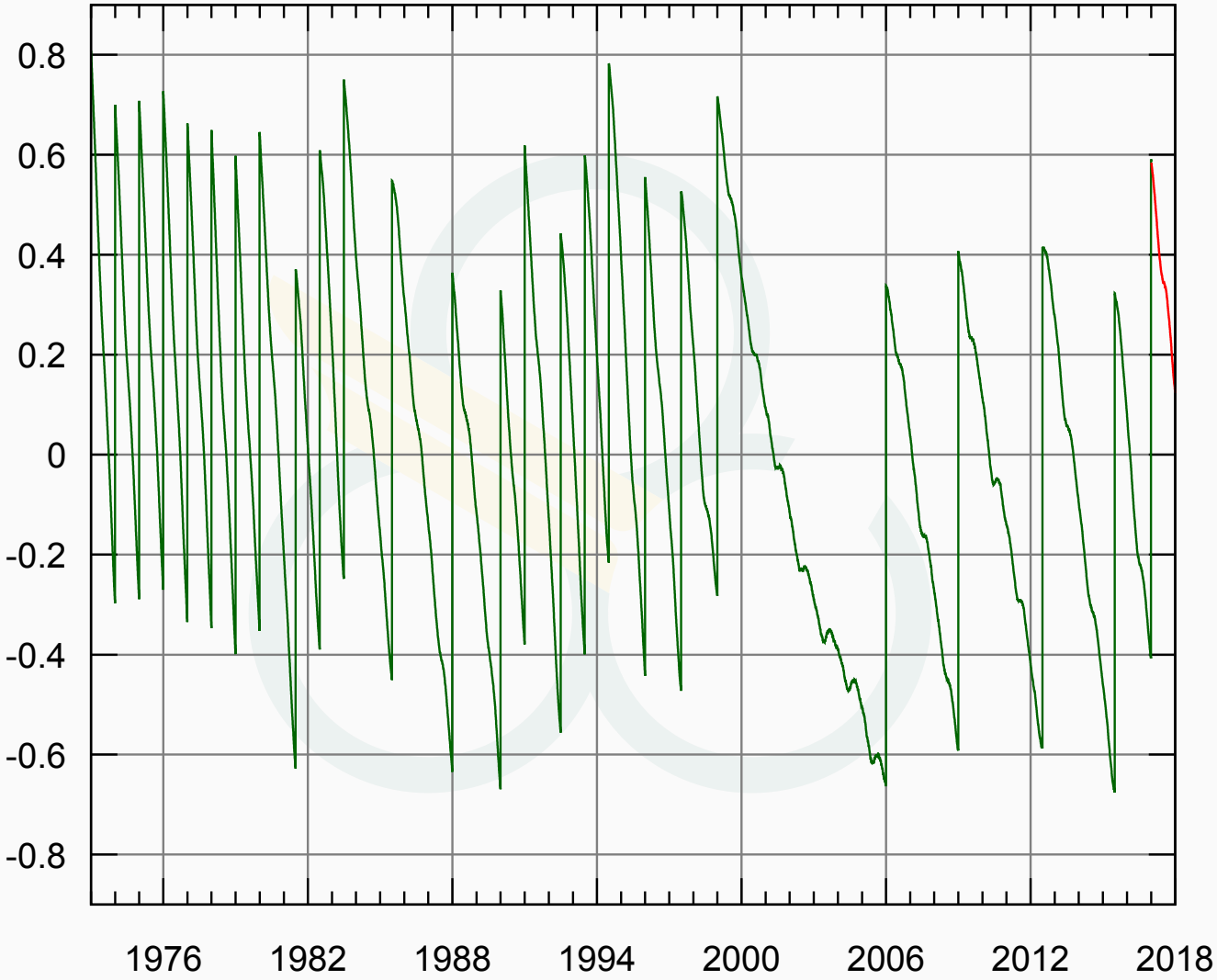


Figura: Wikipedia

Problema

Algumas vezes precisamos saber a hora exata e não apenas uma ordenação de eventos.

Universal Coordinated Time (UTC):

- baseado no número de transições por segundo do átomo de césio 133 (bastante preciso)
- atualmente, o tempo é medido como a média de cerca de 50 relógios de césio espalhados pelo mundo
- introduz um *segundo bissexto* de tempos em tempos para compensar o fato de que os dias estão se tornando maiores

Nota:

O valor do UTC é enviado via *broadcast* por satélite e por ondas curtas de rádio. Satélites tem um acurácia de ± 0.5 ms.

CURIOSIDADE

Muitos relógios usam a frequência da rede elétrica (60Hz no Brasil) para manter a hora. Quando há segundos bissextos as companhias mantêm a frequência em 61 Hz por 60 segundos para adiantá-los.

Precisão

O objetivo é tentar fazer com que o desvio entre dois relógios em quaisquer duas máquinas fique dentro de um limite especificado, conhecido como a precisão π:

$$\forall t, \forall p, q : |C_p(t) - C_q(t)| \leq \pi$$

onde $C_p(t)$ é o horário do relógio computado para a máquina p no horário UTC t.

Acurácia

No caso da acurácia, queremos manter o relógio limitado a um valor α:

$$\forall t, \forall p : |C_p(t) - t| \leq \alpha$$

Sincronização

Sincronização interna: manter a precisão dos relógios

Sincronização externa: manter a acurácia dos relógios

Especificação dos relógios

- Todo relógio tem especificado sua taxa máxima de desvio do relógio ρ.
- $F(t)$: frequência do oscilador do relógio do hardware no tempo t
- F: frequência (constante) do relógio ideal:

$$\forall t : (1 - \rho) \leq \frac{F(t)}{F} \leq (1 + \rho)$$

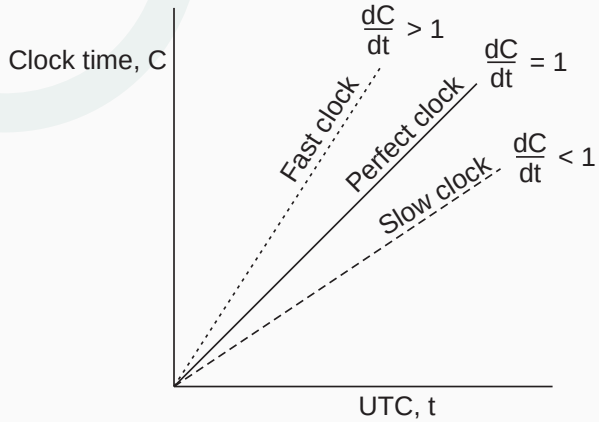
Observação

Interrupções de hardware acoplam um relógio de software a um relógio de hardware, que também tem sua taxa de desvio:

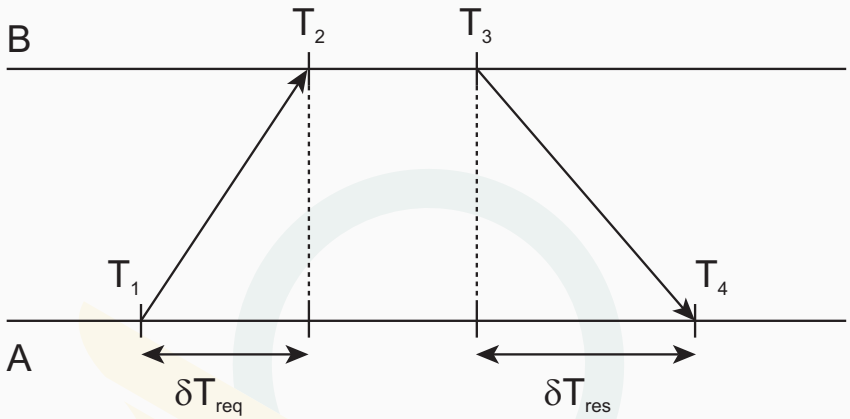
$$C_p(t) = \frac{1}{F} \int_0^t F(t)dt \Rightarrow \frac{dC_p(t)}{dt} = \frac{F(t)}{F}$$

$$\Rightarrow \forall t : 1 - \rho \leq \frac{dC_p(t)}{dt} \leq 1 + \rho$$

Relógios rápidos, perfeitos e lentos



Recuperação do horário atual de um servidor



Cálculo da diferença relativa θ e o atraso δ

Assumindo que: $\delta T_{req} = T_2 - T_1 \approx T_4 - T_3 = \delta T_{res}$

$$\theta = T_3 + \big((T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)\big)/2 - T_4 = \big((T_2 - T_1) + (T_3 - T_4)\big)/2$$

$$\delta = \big((T_4 - T_1) - (T_3 - T_2)\big)/2$$

Network Time Protocol

Colete oito pares (θ, δ) e escolha os θ cujos atrasos δ são minimais.

Sincronização externa

Cada máquina pede a um *servidor de hora* a hora certa pelo menos uma vez a cada $\delta/(2\rho)$ (Network Time Protocol)

OK, mas...

você ainda precisa de uma maneira precisa de medir o *round trip delay*, incluindo o tratamento da interrupção e o processamento das mensagens.

Sincronização interna

Permita o servidor de hora sonde todas as máquinas periodicamente, calcule uma média e informe cada máquina como ela deve ajustar o seu horário relativo ao seu horário atual.

Nota:

Você provavelmente terá todas as máquinas em sincronia. Você nem precisa propagar o horário UTC.

É fundamental

saber que atrasar o relógio nunca é permitido. Você deve fazer ajustes suaves.

Relógio que atrasa não adianta.

Desconhecido

RELÓGIOS LÓGICOS

O que importa na maior parte dos sistemas distribuídos não é fazer com que todos os processos concordem exatamente com o horário, mas sim fazer com que eles concordem com a ordem em que os eventos ocorreram. Ou seja, precisamos de uma noção de ordem entre os eventos.

A relação “aconteceu-antes” (*happened-before*)

- se a e b são dois eventos de um mesmo processo e a ocorreu antes de b, então $a \rightarrow b$

A relação “aconteceu-antes” (*happened-before*)

- se a e b são dois eventos de um mesmo processo e a ocorreu antes de b, então $a \rightarrow b$
- se a for o evento de envio de uma mensagem e b for o evento de recebimento desta mesma mensagem, então $a \rightarrow b$

A relação “aconteceu-antes” (*happened-before*)

- se a e b são dois eventos de um mesmo processo e a ocorreu antes de b, então $a \rightarrow b$
- se a for o evento de envio de uma mensagem e b for o evento de recebimento desta mesma mensagem, então $a \rightarrow b$
- se $a \rightarrow b$ e $b \rightarrow c$, então $a \rightarrow c$

A relação “aconteceu-antes” (*happened-before*)

- se a e b são dois eventos de um mesmo processo e a ocorreu antes de b, então $a \rightarrow b$
- se a for o evento de envio de uma mensagem e b for o evento de recebimento desta mesma mensagem, então $a \rightarrow b$
- se $a \rightarrow b$ e $b \rightarrow c$, então $a \rightarrow c$

A relação “aconteceu-antes” (*happened-before*)

- se a e b são dois eventos de um mesmo processo e a ocorreu antes de b, então $a \rightarrow b$
- se a for o evento de envio de uma mensagem e b for o evento de recebimento desta mesma mensagem, então $a \rightarrow b$
- se $a \rightarrow b$ e $b \rightarrow c$, então $a \rightarrow c$

Eventos concorrentes

Se dois eventos x e y ocorrem em processos distintos e esses processos nunca interagem (mesmo que indiretamente) então nem $x \rightarrow y$ nem $y \rightarrow x$ são verdade. São eventos concorrentes. Quando se diz que dois eventos são concorrentes na verdade quer dizer que *nada pode (ou precisa) ser dito sobre a sua ordem*.

A relação “aconteceu-antes” (*happened-before*)

- se a e b são dois eventos de um mesmo processo e a ocorreu antes de b, então $a \rightarrow b$
- se a for o evento de envio de uma mensagem e b for o evento de recebimento desta mesma mensagem, então $a \rightarrow b$
- se $a \rightarrow b$ e $b \rightarrow c$, então $a \rightarrow c$

Eventos concorrentes

Se dois eventos x e y ocorrem em processos distintos e esses processos nunca interagem (mesmo que indiretamente) então nem $x \rightarrow y$ nem $y \rightarrow x$ são verdade. São eventos concorrentes. Quando se diz que dois eventos são concorrentes na verdade quer dizer que *nada pode (ou precisa) ser dito sobre a sua ordem*.

Nota:

Isso introduz uma noção de ordem parcial dos eventos em um sistema com processos executando concorrentemente.

Problema

Como fazemos para manter uma visão global do comportamento do sistema que seja consistente com a relação aconteceu-antes?

Problema

Como fazemos para manter uma visão global do comportamento do sistema que seja consistente com a relação aconteceu-antes?

Solução

Associar um *timestamp* $C(e)$ a cada evento e tal que:

P1 se a e b são dois eventos no mesmo processo e $a \rightarrow b$, então é obrigatório que $C(a) < C(b)$

P2 se a corresponder ao envio de uma mensagem m e b ao recebimento desta mensagem, então também é válido que $C(a) < C(b)$

Problema

Como fazemos para manter uma visão global do comportamento do sistema que seja consistente com a relação aconteceu-antes?

Solução

Associar um *timestamp* $C(e)$ a cada evento e tal que:

P1 se a e b são dois eventos no mesmo processo e $a \rightarrow b$, então é obrigatório que $C(a) < C(b)$

P2 se a corresponder ao envio de uma mensagem m e b ao recebimento desta mensagem, então também é válido que $C(a) < C(b)$

Outro problema

Como associar um *timestamp* a um evento quando não há um relógio global? Solução: manter um conjunto de relógios lógicos consistentes, um para cada processo

Solução

Cada processo P_i mantém um contador C_i local e o ajusta de acordo com as seguintes regras:

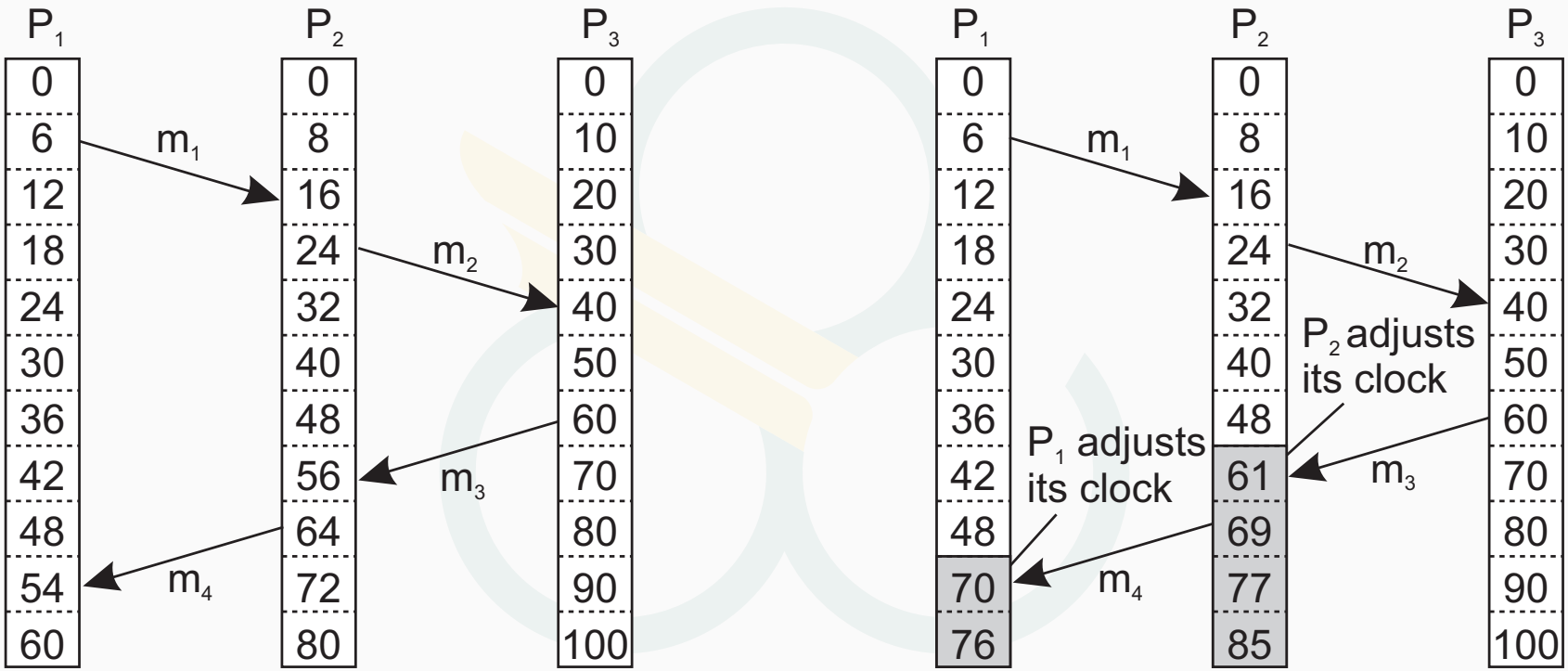
1. para quaisquer dois **eventos sucessivos** que ocorrer em P_i, C_i é incrementado em 1
2. toda vez que uma mensagem m for enviada por um processo P_i, a mensagem deve receber um *timestamp* $ts(m) = C_i$
3. sempre que uma mensagem m for recebida por um processo P_j, P_j ajustará seu contador local C_j para $\max\{C_j, ts(m)\}$ e executará o passo 1 antes de repassar m para a aplicação

Observações:

- a propriedade **P1** é satisfeita por (1); propriedade **P2** por (2) e (3)
- ainda assim pode acontecer de dois eventos ocorrerem ao mesmo tempo. Desempate usando os IDs dos processos.

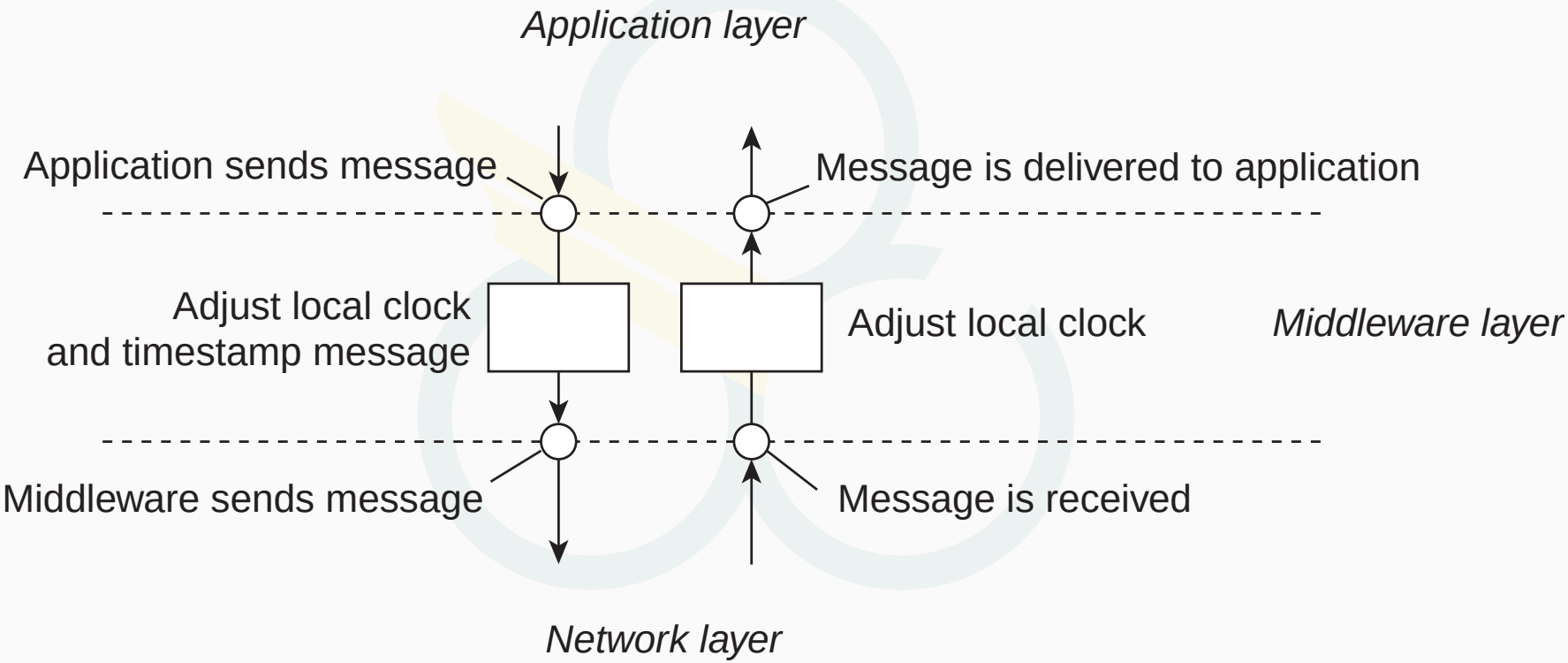
RELÓGIO LÓGICO DE LAMPORT – EXEMPLO

Considere três processos com contadores de eventos funcionando a velocidades diferentes.



Nota

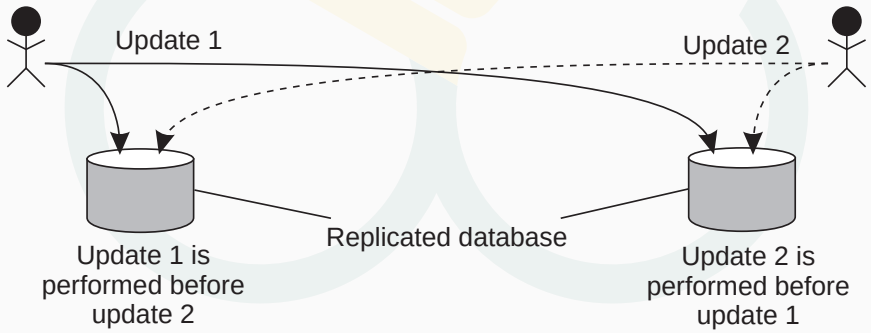
Os ajustes ocorrem na camada do *middleware*



Problema

Alguma vezes precisamos garantir que atualizações concorrentes em um banco de dados replicado sejam vistos por todos como se tivessem ocorrido na mesma ordem.

- P_1 adiciona R$ 100 a uma conta (valor inicial: R$ 1000)
- P_2 incrementa a conta em 1%
- Há duas réplicas



Resultado

Na ausência de sincronização correta,
réplica #1 ← R$ 1111, enquanto que na réplica #2 ← R$ 1110.

Solução

- processo P_i envia uma mensagem com timestamp m_i para todos os outros. A mensagem é colocada em sua fila local $queue_i$.
- toda mensagem que chegar em P_j é colocada na fila $queue_j$ priorizada pelo seu timestamp e confirmada (*acknowledged*) por todos os outros processos

P_j repassa a mensagem m_i para a sua aplicação somente se:

(1) m_i estiver na cabeça da fila $queue_j$

(2) para todo processo P_k, existe uma mensagem m_k na $queue_j$ com um *timestamp* maior.

Nota

Assumimos que a comunicação é confiável e que a ordem FIFO (entre as mensagens enviadas por um nó, e não na fila) é respeitada.

O ALGORITMO DE MULTICAST FUNCIONA?

Observe que:

- se uma mensagem *m* ficar pronta em um servidor *S*, *m* foi recebido por todos os outros servidores (que enviaram ACKs dizendo que *m* foi recebido)
- se *n* é uma mensagem originada no mesmo lugar que *m* e for enviada antes de *m*, então todos receberão *n* antes de *m* e *n* ficará no topo da fila antes de *m*
- se *n* for originada em outro lugar, é um pouco mais complicado. Pode ser que *m* e *n* cheguem em ordem diferente nos servidores, mas é certeza de que antes de tirar um deles da fila, ele terá que receber os ACKs de todos os outros servidores, o que permitirá comparar os valores dos relógios e entregar para as mensagens na ordem total dos relógios