TECNOLÓGICA DEL ORIENTE
INSTITUCIÓN DE EDUCACIÓN SUPERIOR

SISTEMAS DISTRIBUTIVOS

RELOJES LÓGICOS DE LAMPORT

RELOJES LÓGICOS DE LAMPORT

En un sistema distribuido, múltiples procesos autónomos ejecutan operaciones concurrentemente y se comunican mediante el envío y recepción de mensajes. Sin embargo, estos procesos carecen de un reloj global compartido, y sus propios relojes físicos pueden estar desincronizados (MRCET, 2019). Esta falta de sincronía complica la tarea de determinar el orden correcto de los eventos distribuidos, lo cual es esencial para preservar la consistencia, la causalidad y la coherencia lógica del sistema.

Para resolver esta problemática, el científico Leslie Lamport, en 1978, propuso un enfoque innovador basado no en tiempo real, sino en la relación causal entre eventos, dando lugar a lo que hoy se conoce como relojes lógicos de Lamport.

Fundamentos de los relojes lógicos

El objetivo principal de los relojes lógicos de Lamport, es asignar números crecientes a los eventos dentro de un sistema distribuido, de manera que se respete la relación de precedencia causal. Esta relación, formalizada por Lamport como “ocurrió antes que” (denotada por →), permite establecer un orden parcial entre eventos, sin depender de marcas de tiempo físicas.

Definición de la relación → ("happened-before"):

- Si dos eventos ocurren en el mismo proceso, el que aparece primero cronológicamente tiene precedencia: a → b.
- Si un proceso P envía un mensaje m en el evento a, y otro proceso recibe m en el evento b, entonces a → b.
- Si a → b y b → c, entonces a → c (transitividad).

Si no se puede demostrar que a → b ni b → a, los eventos a y b son concurrentes.

Algoritmo de Lamport: funcionamiento paso a paso

Cada proceso mantiene un contador lógico local (inicialmente en cero) y sigue tres reglas simples:

1. **Incremento local.** Antes de ejecutar un evento (interno, envío o recepción), el proceso incrementa su contador lógico en uno.
2. **Envío de mensaje.** Cuando un proceso envía un mensaje, incluye el valor actual de su contador lógico como marca de tiempo del mensaje.
3. **Recepción de mensaje.** Al recibir un mensaje con marca de tiempo T, el receptor ajusta su contador lógico a max(T, contador local) y luego lo incrementa en uno.

Este mecanismo asegura que si un evento a ocurre antes que otro evento b (en sentido causal), entonces L(a) < L(b), donde L representa el valor del reloj lógico de Lamport.

Ejemplo ilustrativo con tres procesos

Se consideran tres procesos distribuidos: P1, P2 y P3. Cada uno ejecuta eventos locales y se comunica mediante el envío de mensajes.

Eventos:

- **P1:** ejecuta e1, envía un mensaje a P2.
- **P2:** recibe el mensaje, ejecuta e2, envía otro a P3.
- **P3:** recibe el mensaje, ejecuta e3.

Aplicación del algoritmo:

1. P1: e1 → contador = 1
2. P1 envía mensaje → marca de tiempo = 2
3. P2 recibe mensaje (marca = 2) → ajusta su reloj a max(0, 2) = 2, luego lo incrementa → contador = 3
4. P2 ejecuta e2, luego envía mensaje → marca = 4
5. P3 recibe mensaje (marca = 4) → ajusta reloj a max(0, 4) = 4, luego lo incrementa → contador = 5

Los relojes asignan a cada evento una marca creciente, respetando la relación causal entre eventos.

Propiedades de los relojes de Lamport

- **Orden lógico garantizado**. Si un evento causa otro evento b, entonces L(a) < L(b).
- **No detectan concurrencia**. Si dos eventos son concurrentes, pueden tener valores arbitrarios. No se puede deducir si están causalmente relacionados.
- **Orden parcial, no total**. Los relojes de Lamport no definen un orden total consistente entre todos los eventos, solo preservan la causalidad.

Aplicaciones prácticas

Los relojes lógicos de Lamport se utilizan en diversos escenarios reales dentro de sistemas distribuidos:

- Sistemas de bases de datos replicadas: para ordenar operaciones y mantener consistencia eventual.
- Algoritmos de exclusión mutua: donde el orden lógico define prioridades entre solicitudes.
- Análisis de logs distribuidos: para reconstruir secuencias de eventos en incidentes o auditorías.
- Sistemas de control de versiones: para rastrear dependencia entre modificaciones concurrentes.

Limitaciones y evolución

Si bien los relojes de Lamport son conceptualmente elegantes y fáciles de implementar, presentan una limitación crucial: no permiten detectar la concurrencia. Es decir, si dos eventos son independientes, los relojes de Lamport podrían asignarles marcas que suponen una relación de precedencia inexistente (MRCET, 2019).

Para superar esta limitación, se desarrollaron los relojes vectoriales, los cuales representan el estado lógico de todos los procesos y permiten identificar eventos concurrentes.

Figura 1. Eventos locales con incrementos del reloj