

# Sistemas distribuidos

## Grado en Ingeniería Informática

### Tema 03-01: Sincronización en SD

Departamento de Ingeniería Informática  
Universidad de Cádiz



Escuela Superior de Ingeniería  
Dpto. de Ingeniería Informática



Curso 2019 – 2020

# Índice

- 1 Introducción
- 2 Tiempo físico
- 3 Sincronización
- 4 Método Cristian
- 5 Algoritmo de Berkeley
- 6 Network Time Protocol
- 7 Tiempo lógico
- 8 Tiempo lógico de Lamport
- 9 Vectores de tiempo
- 10 Tareas

# Sección 1 | Introducción

# Introducción

## Propiedades de los Sistemas Distribuidos

- **La información relevante se distribuye** entre varias máquinas.
- **Los procesos toman las decisiones sólo con** base en **la información** disponible en **forma local**.
- Debe evitarse un punto único de fallo.
- **No existe un reloj común** o alguna otra fuente precisa del tiempo global.

# Introducción

## Problemas a tener en cuenta

- Tiempos y estados globales.
- Exclusión mutua.
- Algoritmos de elección. Problemas de consenso.
- Operaciones atómicas distribuidas: Transacciones.
- Cada nodo posee un reloj estándar.
- La comunicación entre nodos presenta retardos.
- Cada nodo presenta una visión subjetiva del estado global.

# Introducción

## Posibles soluciones

Propuesta de solución: un único reloj preciso + red dedicada para transmitir la señal sin retardos

- No es práctico (coste), o es inviable (Internet)

Solución: tiempo distribuido

- Cada nodo posee su propio reloj tiempo físico local
- Los relojes son imprecisos: necesarios ajustarlos periódicamente a un tiempo físico de referencia

Por otra parte, la gestión consistente del estado global requiere al menos ordenar los eventos producidos por los nodos

- Tiempo lógico

# Introducción

## Posibles soluciones

### Sincronizar todos

- Sincronizar todos los relojes con reloj de referencia (NTP).

### Sincronizar entre los nodos

- Estimar retrasos por la conexión (Algoritmo de Cristian).
- Establecer un promedio (Algoritmo de Berkeley).

### No sincronizar, sólo ordenar eventos

- Ordenar los eventos, algoritmo de Algoritmo Lamport.
- Ordenar todos los nodos, relojes vectoriales.

## Sección 2 | Tiempo físico

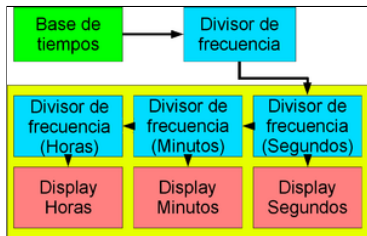


# Tiempo físico

## Relojes de cuarzo

Los relojes de los ordenadores son de **cuarzo**

- Las moléculas en el cristal de cuarzo vibran millones de veces por segundo (piezoelectricidad), a una velocidad que *nunca* cambia. El ordenador usa las vibraciones en el reloj del sistema para tomar el tiempo de sus operaciones de procedimiento
- La frecuencia de oscilación varía con la temperatura
- deriva(retraso):  $\sim 10^{-6}$  (90 ms en un día, 1s cada 11,6 días)



# Tiempo físico

## Relojes atómicos

Son de gran precisión pero muy caros

- deriva:  $\sim 10^{-13}$  (9 ns en un día, 1s cada 300.000 años)
- precio: \$ 50.000 - \$100.000



Otros modelos pueden ser los NIST (National Institute of Standards and Technology) en <http://tf.nist.gov/timefreq/cesium/atomichistory.htm>

# Tiempo físico

## Definiciones

- Segundo solar o astronómico:  $1/86.400$  del periodo de rotación de la Tierra (mean solar second) pese a ser perfectamente válido para las situaciones de la vida cotidiana, la Tierra no gira a velocidad constante (va perdiendo lentamente velocidad), por lo que no sirve como referencia
- Segundo atómico (IAT, 1967): 9.192.631.770 periodos de transición en un átomo de Cesio-133. Los relojes atómicos miden este tiempo deriva de  $\sim 3 * 10^{-8}$  con el segundo solar ( $\sim 1$  s al año)
- Tiempo universal coordinado (UTC): medido en segundos atómicos, sincronizado con tiempo astronómico (diferencia  $> 900$  ms  $\rightarrow$  inserción de 1 s)

# Tiempo físico

## Definiciones

- **Tiempo físico o de referencia** normalmente UTC (*Universal Time Coordinated*)  
[http://www.bipm.org/en/scientific/tai/time\\_server.html](http://www.bipm.org/en/scientific/tai/time_server.html)
- **Resolución** periodo entre dos actualizaciones del registro del tiempo local
- **Desviación** *offset, skew,  $\theta$*  Diferencia entre el tiempo local y el tiempo físico de referencia de un instante
- **Deriva** *drift,  $\delta$*  desviación por unidad de tiempo (lo que adelanta o retrasa el reloj)
- **Precisión** *accuracy* desviación máxima que se puede garantizar en el ajuste de un reloj

## Sección 3 | Sincronización

# Sincronización

## de relojes físicos

- Los computadores de un sistema distribuido poseen relojes que no están sincronizados (derivas)
- Importante asegurar una correcta sincronización
  - En aplicaciones de tiempo real
  - Ordenación natural de eventos distribuidos (fechas de ficheros)
  - Análisis de rendimiento
- Tradicionalmente se han empleado protocolos de sincronización que intercambian mensajes
- Actualmente se puede mejorar mediante GPS

# Sincronización

## Externa

- Sincronización: procedimiento por el que se ajusta el valor de un reloj a un tiempo físico de referencia con una precisión preestablecida
- Referencias de tiempo UTC se difunden periódicamente por radio
- Precisión de receptores comerciales: Estaciones terrestres, Satélites geoestacionarios, Satélites GPS
- Usos: servicio horario preciso, contabilidad...

# Sincronización

## Interna

- Para muchas aplicaciones es más importante mantener bien sincronizados entre sí los relojes locales que conseguir una gran precisión en la sincronización externa (permite ordenar eventos (causalidad))
- Propuesta de solución: receptor UTC en cada nodo (no es práctico por coste)
- Solución: algoritmos de sincronización interna
  - centralizados: basados en un servidor específico
  - distribuidos: estadísticos



# Sincronización

## Métodos de Sincronización

- UTC: Universal Coordinated Time

- Transmisión de señal desde centros terrestres o satélites.
- Una o más máquinas del sistema distribuido son receptoras de señal UTC.

- Método de Cristian

- Es un algoritmo probabilístico
- Es un algoritmo centralizado en el cual un servidor brinda el tiempo unificado
- Este servidor puede estar conectado a un UTC para tener la hora correcta

- Algoritmo de Berkeley

- Es un algoritmo centralizado en el cual un servidor es seleccionado como maestro
- Este maestro NO puede estar conectado a un UTC para tener la hora correcta
- El maestro estima el valor de los relojes de los esclavos

- NTP (Network Time Protocol)

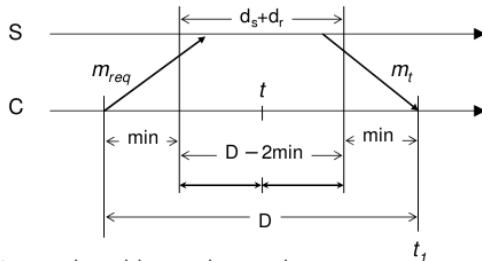
- Permitir sincronizar clientes con UTC sobre Internet
- Jerarquía de servidores en diferentes estratos
- Los fallos se solventan por medio de ajustes en la jerarquía

## Sección 4 | Método Cristian

# Método Cristian

## Explicación

### Algoritmo de Cristian



$t(m_t)$ : tiempo devuelto por el servidor en el mensaje  $m_t$

$D$ : tiempo desde que se envía  $m_{req}$  y se recibe  $m_t$

$min$ : tiempo mínimo de transmisión de un mensaje

Suposición: el servidor asigna la referencia  $t(m_t)$  en la mitad del intervalo  $D - 2 \cdot min$  (instante  $t$  en el cliente). Así se logra la mejor precisión

Desviación:  $\theta = t - t(m_t) = t_1 - D/2 - t(m_t)$

Precisión =  $D/2 - min$

# Método Cristian

## Cuestiones

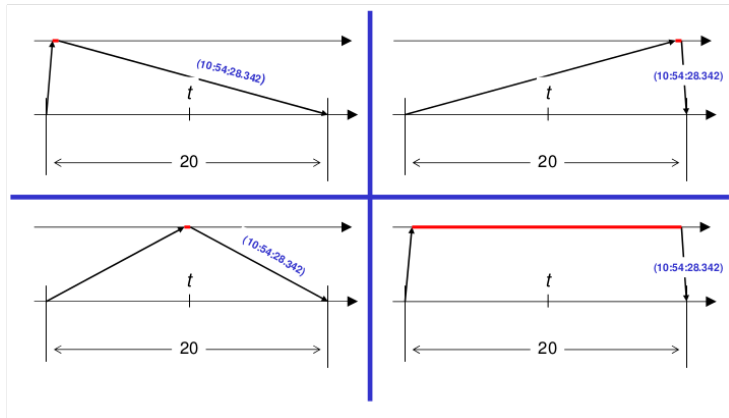
- Ejemplo del algoritmo de *Cristian* (3 peticiones):

<i>Pet.</i>	<i>D (ms)</i>	<i>t<sub>i</sub> (hh:mm:ss.ms)</i>	<i>t(m<sub>i</sub>) (hh:mm:ss.ms)</i>
(1)	22	10:54:22.236	10:54:23.674
(2)	26	10:54:24.000	10:54:25.450
(3)	20	10:54:26.946	10:54:28.342

- ¿Qué petición debería usar el cliente? Calcula la precisión y desviación obtenidas  
**Precisión = 10 ms    Desviación = 1406 ms**
- Conociendo que el tiempo mínimo de transmisión es de 7 ms, ¿cambia en algo la respuesta anterior?  
**Precisión = 3 ms**
- ¿Qué se necesitaría para obtener una precisión de 2 ms?  
**Siendo min = 7 ms, una petición con  $D \leq 18$  ms**

# Método Cristian

## Posibilidades



# Método Cristian

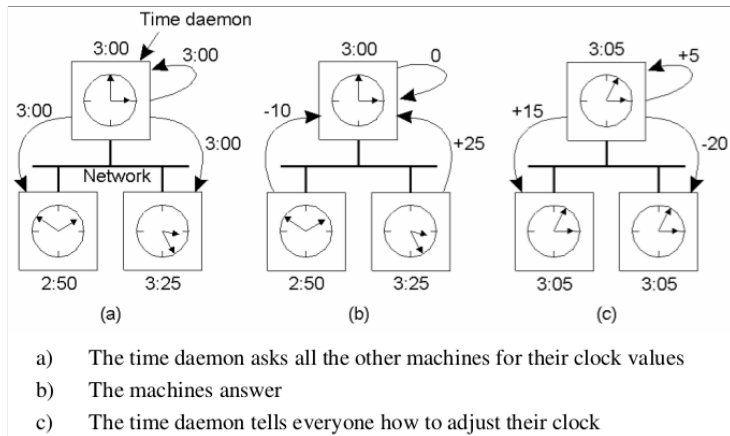
## Problemas

- Duración variable del tiempo de transmisión de los mensajes en la red, y del tiempo de respuesta del servidor
- Servidor único: sobrecarga y caída. **Solución** grupo de servidores sincronizado
- Servidor impostor: seguridad **Solución** autenticación del servidor
- Servidor con reloj que falla: tiempo erróneo en el SD **Solución** algoritmo de Berkeley

## Sección 5 | Algoritmo de Berkeley

# Método Algoritmo de Berkeley

## Explicación





# Método Algoritmo de Berkeley

## Cuestiones

- Ejemplo del algoritmo de *Berkeley*:

<i>Nodo</i>	<i>D (ms)</i>	<i>t (hh:mm:ss.ms)</i>	<i>Desviaciones</i>
<i>N1 (coord.)</i>	0	10:54:23.118	-948 ms
<i>N2</i>	22	10:54:22.236	-1842 ms
<i>N3</i>	26	10:54:24.000	-79 ms
<b>Excluido!</b> <i>N4</i>	190	10:41:46.179	-757983 ms
<i>N5</i>	20	10:54:26.946	+2870 ms

- Calcula el tiempo medio para la sincronización y la desviación a enviar a cada nodo

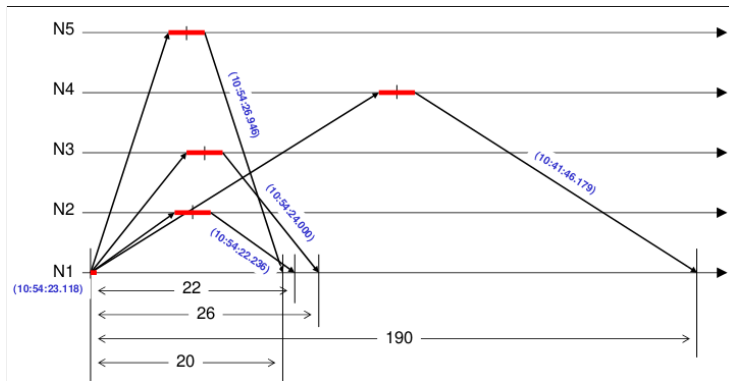
**Tiempo medio = 10:54:24.067**

- Usando el método de *Cristian*, calcula la precisión en el ajuste de cada nodo al sincronizarse (*min* no se conoce)

**D/2**

# Método Algoritmo de Berkeley

## Posibilidades

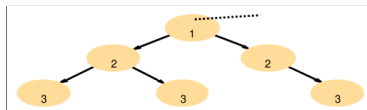


## Sección 6 | Network Time Protocol

# Network Time Protocol

## Explicación

- Estándar en Internet
- Proporciona sincronización redundante con UTC
- Estructurado en capas (strata) de servidores de tiempo
  - servidores primarios (strata 1): referencias UTC fiables
  - servidores de nivel 2 (strata 2): sincronizados con primarios
- Modos de operación:
  - red local con soporte adecuado: modo multicast
  - mayor precisión: modo de llamada a procedimiento
  - mejor sincronización interna: modo simétrico
- La red de servidores se puede reconfigurar



## Sección 7 | Tiempo lógico

# Tiempo lógico

## Introducción

- A veces la precisión obtenida al sincronizar los relojes no nos permite usar el tiempo físico para ordenar los eventos de los diferentes nodos de un sistema distribuido
  - siempre es posible ordenar los eventos de un mismo nodo (si se respeta la monotonidad del reloj)
  - en cambio, relaciones de causalidad entre eventos de nodos diferentes pueden verse distorsionadas
- Muchas aplicaciones requieren únicamente ordenar los eventos (y no tanto conocer el instante exacto en que ocurrieron)
- **Reloj lógico: contador de software que se incrementa monótonamente, cuyo valor no necesita estar relacionado con ningún reloj físico.**
- **Generalmente se asocia a cada proceso un reloj lógico.**

# Tiempo lógico

## Modelo de eventos

- Modelo de sistema: conjunto de procesos que comunican únicamente mediante paso de mensajes
  - enviar ( $p_i$ , mensaje)
  - recibir ( $p_j$ , mensaje)
  - $p_i$  y  $p_j$  son el emisor y el receptor del mensaje
- Simplificación: un proceso por nodo/máquina
- Cada proceso genera una secuencia de eventos. Identificamos tres tipos de eventos:
  - Envío de un mensaje (al ejecutar enviar)
  - Recepción de un mensaje (al ejecutar recibir)
  - Eventos locales/internos (resto de eventos, sin comunicación)

# Tiempo lógico

## Modelo de eventos

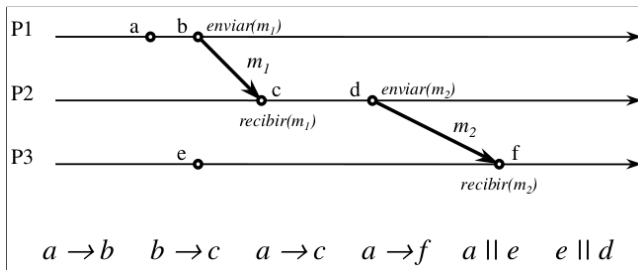
- Para ordenar los eventos de un mismo proceso bastaría con asociar a cada evento  $x$  el tiempo local  $T(x)$  (si la resolución es suficiente)
- Se dice que existe una **relación de causalidad** entre dos eventos del sistema ( $x \rightarrow y$ , “ $x$  ha sucedido antes que  $y$ ”, “ $x$  happened before  $y$ ”) si:
  - 1  $x$  e  $y$  son eventos del mismo proceso y  $T(x) < T(y)$
  - 2  $x$  e  $y$  son los eventos enviar( $m$ ) y recibir( $m$ ) del mismo mensaje  $m$
  - 3 Existe otro evento  $z$  tal que  $x \rightarrow z$  y  $z \rightarrow y$  (cierre transitivo de la relación)



# Tiempo lógico

## Concurrentes

Si entre dos eventos no hay relación de casualidad, se dice que son **concurrentes - paralelos**:  $x \parallel y$



## Sección 8 | Tiempo lógico de Lamport

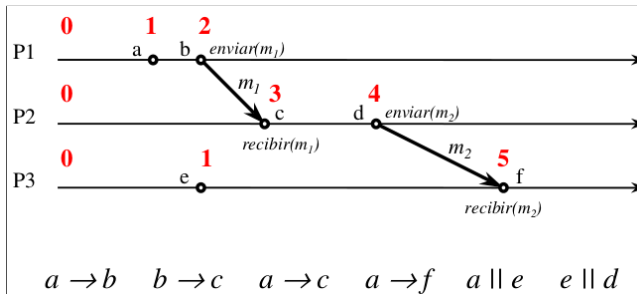
# Tiempo lógico de Lamport

## Introducción

- Propuesto en 1978, **para indicar relaciones de causalidad**. Cada proceso  $P_i$  tiene su reloj lógico local  $C_i$ , para asociar marcas de tiempo a sus eventos (un simple contador asíncrono basta)
- Algoritmo:
  - Inicialmente,  $C_i = 0, \forall i$
  - Antes de un evento local o envío de mensajes en  $p_i$ :  $C_i = C_i + 1$
  - Cuando  $p_j$  envía un mensaje  $m$  a  $p_i$  incluye el valor de su reloj lógico en el mensaje,  $C_m$ . Al recibir el mensaje,  $p_i$  actualiza su reloj local de la siguiente manera
    - 1  $C_i = \max(C_i, C_m)$
    - 2  $C_i = C_i + 1$
- Problema  $C_i(x) < C_j(y)$  no implica  $x \rightarrow y$

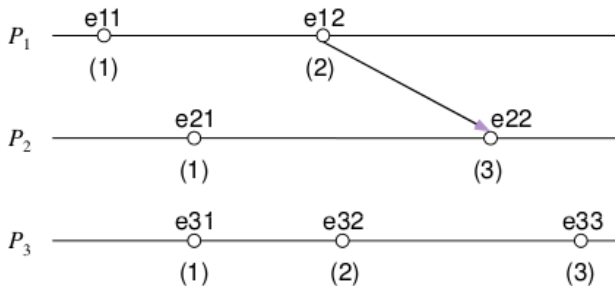
# Tiempo lógico de Lamport

## Esquema



# Tiempo lógico de Lamport

## Problemas



$C(e_{11}) < C(e_{22})$ , y  $e_{11} \rightarrow e_{22}$  es cierto

$C(e_{11}) < C(e_{32})$ , pero  $e_{11} \rightarrow e_{32}$  es falso

## Sección 9 | Vectores de tiempo

# Vectores de tiempo

## Introducción

### Relojes vectoriales

- Son un caso más potente que Lamport.
- Sistemas con comunicaciones entre muchos nodos: Amazon

### Concepto intuitivo

- Cada nodo envía no sólo su reloj lógico, si no todos los que tiene constancia.

# Vectores de tiempo

## Introducción

- Garantizan  $V_i(x) < V_j(y) \leftrightarrow x \rightarrow y$ 
  - $V$ : Vector de  $N$  componentes ( $N$ =número de procesos)
  - $V_i[i]$ : Reloj lógico (local) del proceso  $P_i$
  - $V_i[j]$ : Último valor que el proceso  $P_i$  conoce del reloj del proceso  $P_j$
- Algoritmo
  - Inicialmente  $V_i[j] = 0, \forall i, j$
  - Evento local o envío de mensaje  $p_i$ :  $V_i[i] = V_i[i] + 1$
  - Cuando  $p_j$  envía un mensaje  $m$  a  $p_i$ ,  $p_j$  incluye el valor de su vector de tiempos,  $V_m$ . Al recibir dicho mensaje,  $p_i$  actualiza su vector de la siguiente manera
    - 1  $\forall k: V_i[k] = \max(V_i[k], V_m[k])$
    - 2  $V_i[i] = V_i[i] + 1$



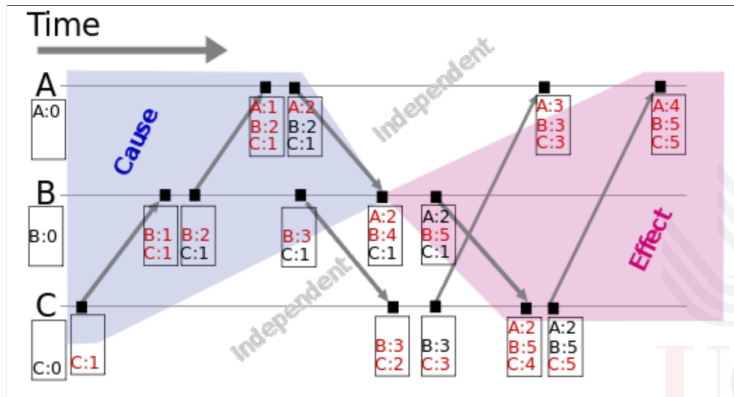
# Vectores de tiempo

## Introducción

- Definición
  - $V1 < V2 \leftrightarrow \forall i, V1[i] \leq V2[i] \text{ and } \exists j, V1[j] < V2[j]$
- Existirá relación de causalidad entre dos eventos  $(x, y)$  si y sólo si
  - $V(x) < V(y)$
  - $V(y) < V(x)$
- Si no, los eventos son concurrentes

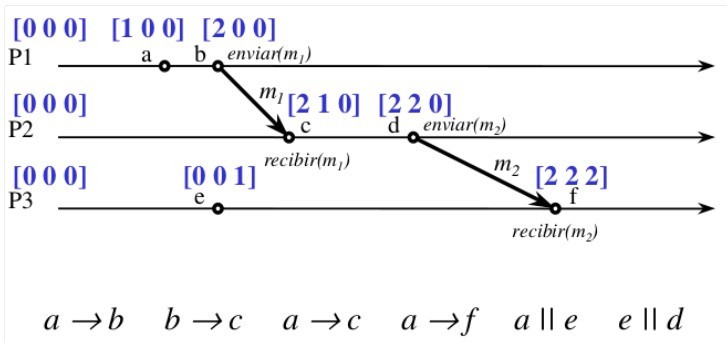
# Vectores de tiempo

## Ejemplo



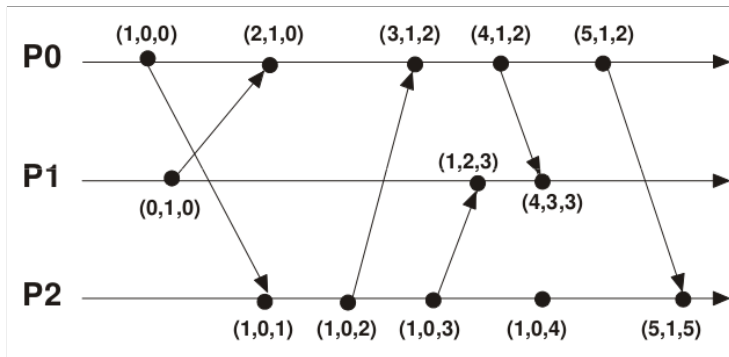
# Vectores de tiempo

## Esquema



# Vectores de tiempo

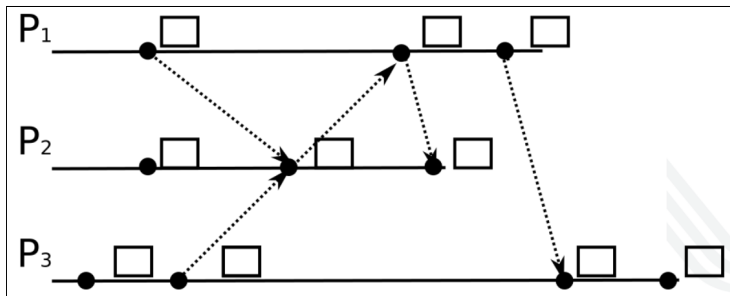
## Esquema



# Sección 10 | Tareas

# Tareas

- Resuelva la siguiente secuencia con el algoritmo de Lamport y el de relojes vectoriales, completando los huecos con los números obtenidos por el algoritmo.



- Implemente el algoritmo Berkeley en Python usando la plantilla del campus virtual.