IIC2523
Sistemas Distribuidos

Hernán F. Valdivieso López
(2025 - 2 / Clase 12)

Replicación de Datos I
¿Cómo aseguramos consistencia en las réplicas?

Temas de la clase

1. Introducción
    a. ¿Por qué replicar los datos?
    b. Modelos de Consistencia
2. Modelos de consistencia fuerte (Linealización) y Secuencial
3. Modelo de consistencia Causal
4. Modelo de consistencia eventual

Introducción

¿Por qué replicar los datos?

Modelos de Consistencia

¿Por qué replicar la información?

- En un sistema distribuido, la replicación de información permite ofrecer una serie de propiedades.
- **Alta Disponibilidad (*High Availability*):**
  - La replicación garantiza que si un nodo falla, el servicio general permanece disponible para los usuarios al tener copias de los datos en otros lugares.
  - Esto también ayuda a ser tolerante a fallos.
  - S hay n servidores y la probabilidad de fallo de uno es p, la disponibilidad con replicación es 1 - Prob(todos fallan) = $1 - p^n$

¿Por qué replicar la información?

- En un sistema distribuido, la replicación de información permite ofrecer una serie de propiedades.
- **Rendimiento y Escalabilidad (*Performance and Scalability*):**
  - **Reducción de Latencia**: Al tener copias de los datos más cerca de los clientes (físicamente o en la red), se reduce el tiempo de respuesta para las operaciones de lectura.
  - **Balanceo de Carga**: La replicación permite distribuir las solicitudes de lectura y escritura entre múltiples servidores, evitando cuellos de botella en un único punto.

¿Por qué replicar la información?

- En un sistema distribuido, la replicación de información permite ofrecer una serie de propiedades.
- **Operación Desconectada (*Disconnected Operation*):**
  - Permite a los clientes (por ejemplo, en dispositivos móviles) seguir trabajando con sus copias locales de datos incluso cuando no hay conectividad de red, y luego sincronizar los cambios al reconectarse.

¿Por qué replicar la información? Desafíos

- La replicación introduce un problema... cada vez que se actualiza una réplica, esta se diferencia de las demás.
  - Sin reloj global precisó es difícil identificar la "última" operación de escritura.

¿Por qué replicar la información? Desafíos

- La replicación introduce un problema... cada vez que se actualiza una réplica, esta se diferencia de las demás.
  - Sin reloj global precisó es difícil identificar la "última" operación de escritura.
- Es necesario propagar las actualizaciones de tal manera que las inconsistencias temporales no se noten.
  - Pero... esta propagación puede degradar severamente el rendimiento, especialmente en sistemas distribuidos a gran escala.

¿Por qué replicar la información? Desafíos

- La replicación introduce un problema... cada vez que se actualiza una réplica, esta se diferencia de las demás.
  - Sin reloj global precisó es difícil identificar la "última" operación de escritura.
- Es necesario propagar las actualizaciones de tal manera que las inconsistencias temporales no se noten.
  - Pero... esta propagación puede degradar severamente el rendimiento, especialmente en sistemas distribuidos a gran escala.
- La solución a este problema es relajar la consistencia en cierta medida.
  - Esto produce la necesitada de diferentes **modelos de consistencia**

Modelos de Consistencia

- Un modelo de consistencia es esencialmente un contrato entre los procesos/nodos y la base de datos.
  - Si los procesos/nodos aceptan obedecer ciertas reglas, la base de datos promete funcionar consistentemente.
- Los modelos se basan principalmente en operaciones que modifican algún dato (*write*) y operaciones de lecturas (*read*).
- **La replicación de un nodo "A" a otro nodo "B" sólo se confirma cuando el nodo "B" hace un *read* sobre el dato consultado.**

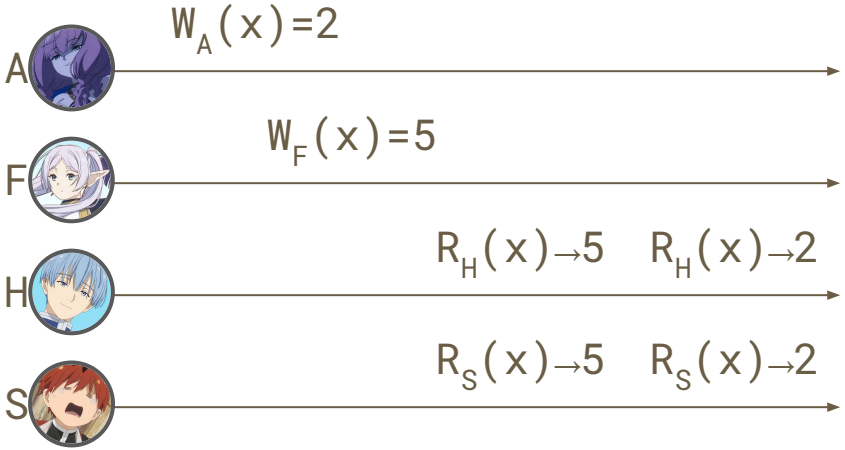
Modelo de Consistencia Secuencial y Fuerte

Consistencia Secuencial [Lamport, 1979]

- El resultado de cualquier ejecución es el mismo que si las operaciones de todos los procesos se ejecutarán **en algún orden secuencial** ... y cada proceso individual respeta dicho orden.
  - Cualquier intercalación válida de las operaciones entre nodos es aceptable... pero todos los nodos ven la misma intercalación.

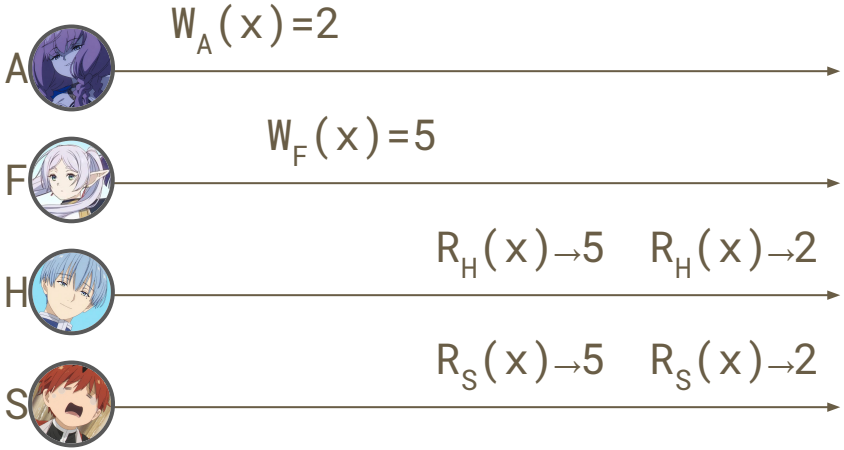
Consistencia Secuencial [Lamport, 1979]

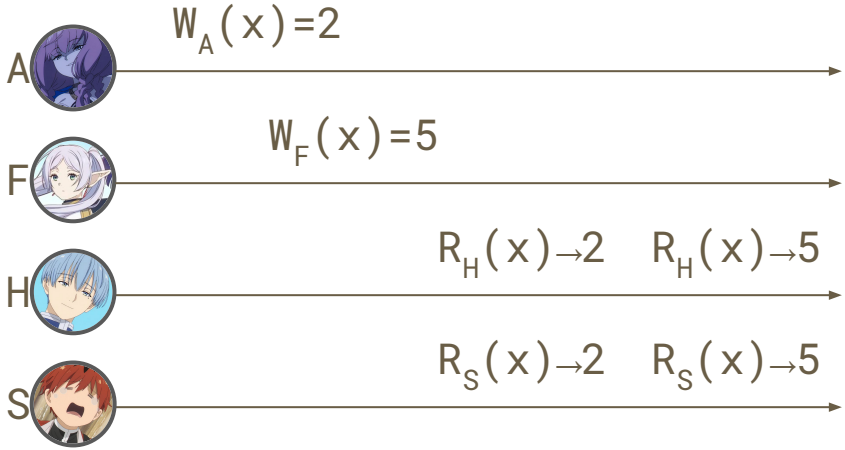
- El resultado de cualquier ejecución es el mismo que si las operaciones de todos los procesos se ejecutarán **en algún orden secuencial** ... y cada proceso individual respeta dicho orden.
  - Cualquier intercalación válida de las operaciones entre nodos es aceptable... pero todos los nodos ven la misma intercalación.



Consistencia Secuencial [Lamport, 1979]

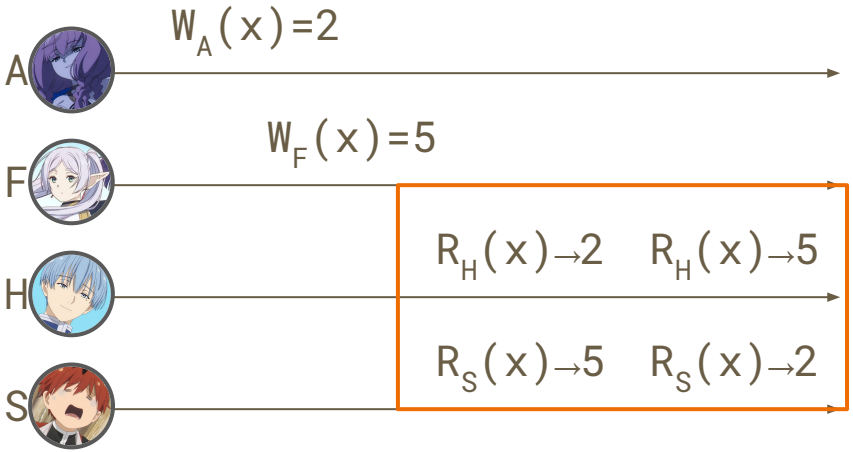
- El resultado de cualquier ejecución es el mismo que si las operaciones de todos los procesos se ejecutarán **en algún orden secuencial** ... y cada proceso individual respeta dicho orden.
  - Cualquier intercalación válida de las operaciones entre nodos es aceptable... pero todos los nodos ven la misma intercalación.





Consistencia Secuencial [Lamport, 1979]

- El resultado de cualquier ejecución es el mismo que si las operaciones de todos los procesos se ejecutarán **en algún orden secuencial** ... y cada proceso individual respeta dicho orden.
  - Cualquier intercalación válida de las operaciones entre nodos es aceptable... pero todos los nodos ven la misma intercalación.

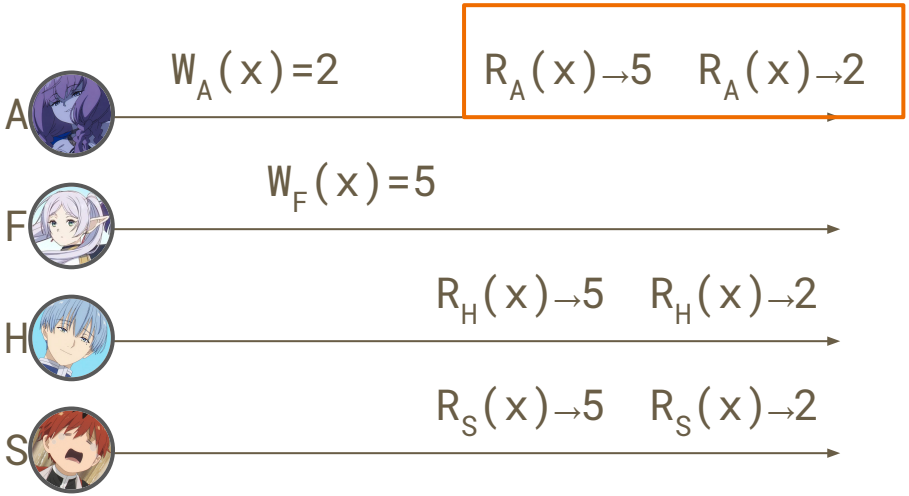


No es consistente secuencialmente.

¿Cuál fue primero, $W_A(x)=2$ o $W_F(x)=5$?

Consistencia Secuencial [Lamport, 1979]

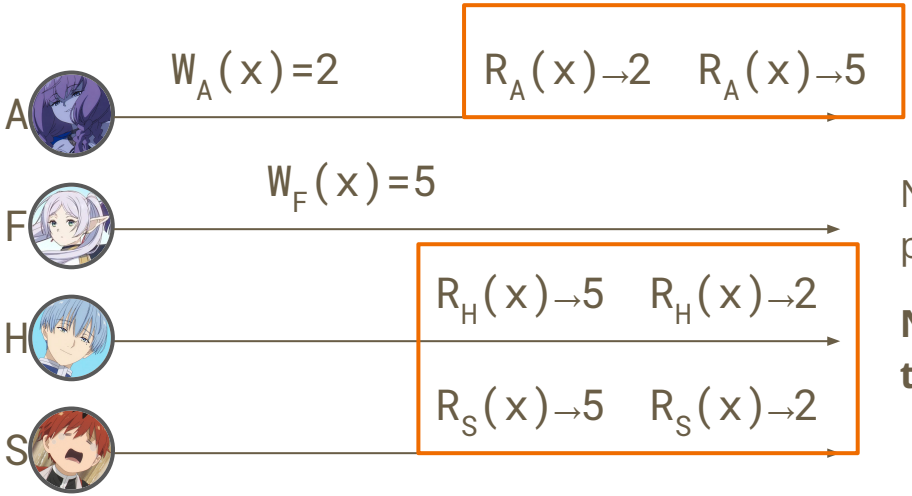
- El resultado de cualquier ejecución es el mismo que si las operaciones de todos los procesos se ejecutarán **en algún orden secuencial** ... y cada proceso individual respeta dicho orden.
  - Cualquier intercalación **válida** de las operaciones entre nodos es aceptable... pero todos los nodos ven la misma intercalación.



No es válido que el nodo A no puede leer 2 después del 5

Consistencia Secuencial [Lamport, 1979]

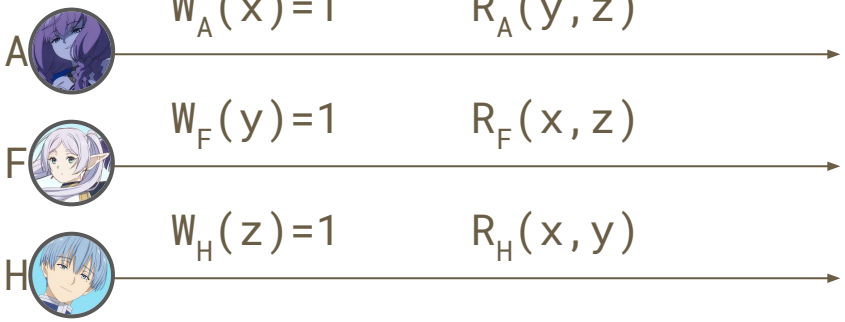
- El resultado de cualquier ejecución es el mismo que si las operaciones de todos los procesos se ejecutarán **en algún orden secuencial** ... y cada proceso individual respeta dicho orden.
  - Cualquier intercalación **válida** de las operaciones entre nodos es aceptable... pero todos los nodos ven la misma intercalación.



Nodo A indica que 5 se escribe después de 2, pero nodo H y S dan a entender lo opuesto.

No hay una secuencia de operaciones que todos los nodos respeten

Consistencia Secuencial [Lamport, 1979]



Modifican una variable y leen las otras.

¿es posible ver un *read* 00 00 00 o 00 10 01? 🤔

$W_A(x)=1$
$W_F(y)=1$
$W_H(z)=1$
$R_A(y,z)$ [11]
$R_F(x,z)$ [11]
$R_H(x,y)$ [11]

Read: 11 11 11

$W_A(x)=1$
$R_A(y,z)$ [00]
$W_F(y)=1$
$R_F(x,z)$ [10]
$W_H(z)=1$
$R_H(x,y)$ [11]

Read: 00 10 11

$W_A(x)=1$
$W_F(y)=1$
$R_F(x,z)$ [10]
$R_A(y,z)$ [10]
$W_H(z)=1$
$R_H(x,y)$ [11]

Read: 10 10 11

$W_F(y)=1$ [00]
$W_H(z)=1$
$R_F(x,z)$ [01]
$R_H(x,y)$ [01]
$W_A(x)=1$
$R_A(y,z)$ [11]

Read: 01 01 11

Consistencia Secuencial [Lamport, 1979]

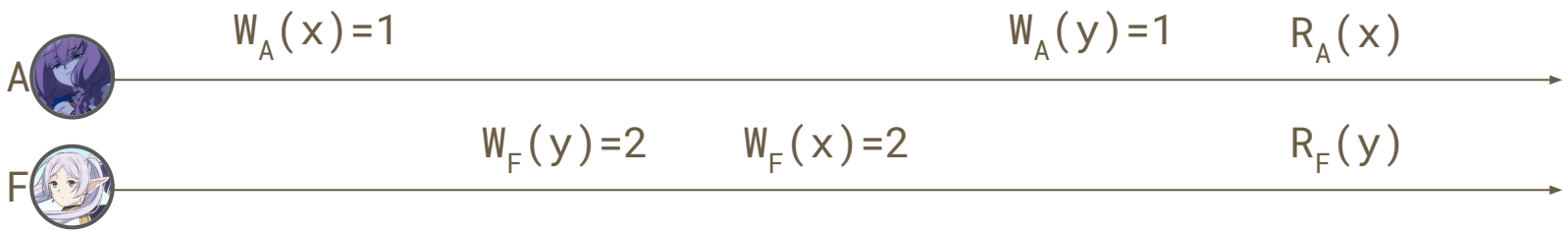
Resumen

El resultado final es como si las operaciones de todos los nodos se hubieran entrelazado de alguna manera serial/secuencial, preservando el orden individual de cada nodo.

Consistencia Secuencial [Lamport, 1979]

Problema

Muchas opciones válidas que son secuencialmente consistente.



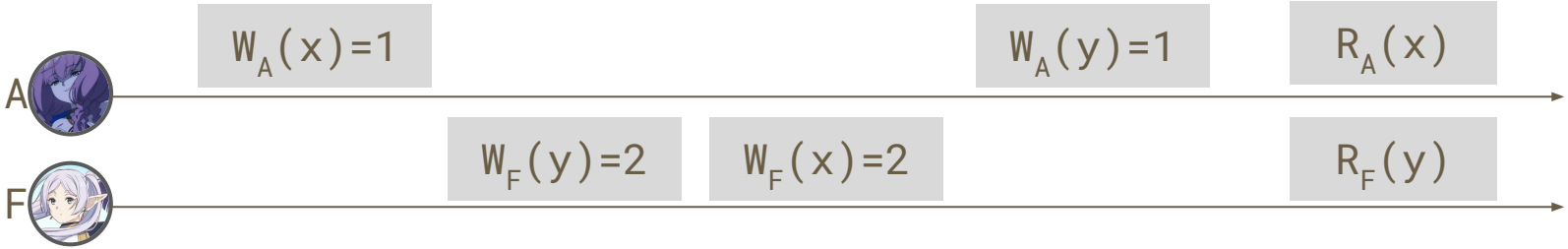
Existen 6 formas de ordenar $W_A(x)=1$ $W_A(y)=1$ $W_F(y)=2$ $W_F(x)=2$ que serán secuencialmente consistentes.

Consistencia Fuerte [Herlihy & Wing, 1986]

- Consistencia más estricta que la secuencia. Llamada también linealizable.
- Cada operación debe aparecer como que tiene efecto instantáneo en algún momento entre su inicio y su finalización.
  - La consistencia fuerte está **totalmente ligado al tiempo real de las operaciones**.
- Al momento que se completa un *write*, esta operación se propaga inmediato a las demás réplicas.

Consistencia Fuerte [Herlihy & Wing, 1986]

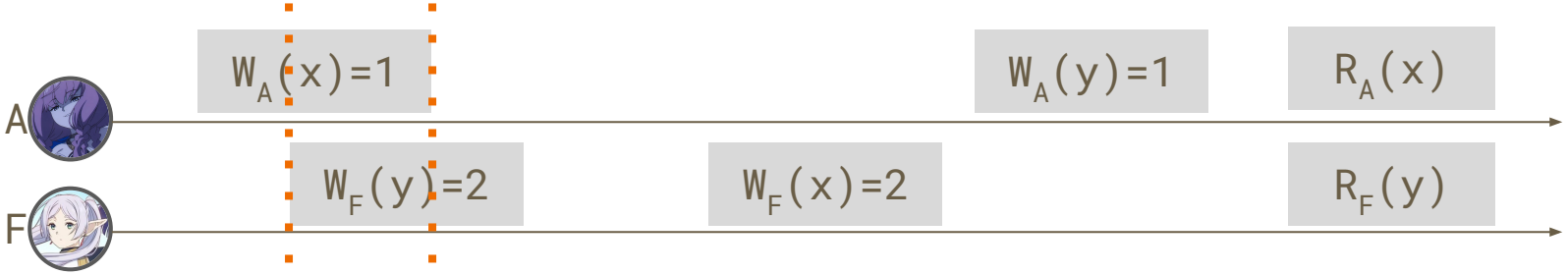
- Consistencia más estricta que la secuencia. Llamada también linealizable.
- Cada operación debe aparecer como que tiene efecto instantáneo en algún momento entre su inicio y su finalización.
  - La consistencia fuerte está **totalmente ligado al tiempo real de las operaciones**.
- Al momento que se completa un *write*, esta operación se propaga inmediato a las demás réplicas.



Solo 1 secuencia válida de *writes*

Consistencia Fuerte [Herlihy & Wing, 1986]

- Consistencia más estricta que la secuencia. Llamada también linealizable.
- Cada operación debe aparecer como que tiene efecto instantáneo en **algún momento entre su inicio y su finalización**.
  - La consistencia fuerte está **totalmente ligado al tiempo real de las operaciones**.
- Al momento que se completa un *write*, esta operación se propaga inmediato a las demás réplicas.



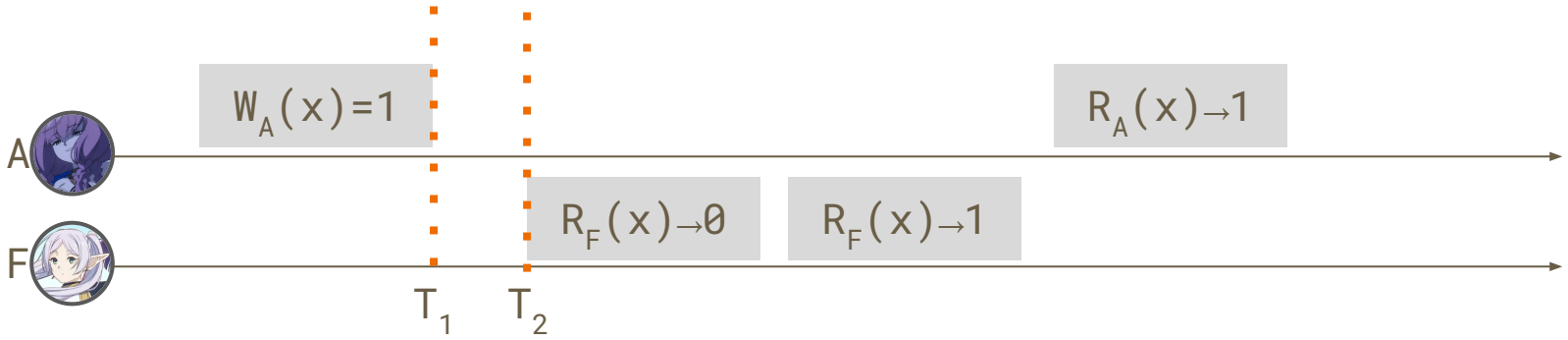
Solo 2 secuencia válida de *writes*

Partir con $W_a(x)=1$ o partir con $W_f(y)=2$

Diferencia entre Consistencia Fuerte y Secuencial

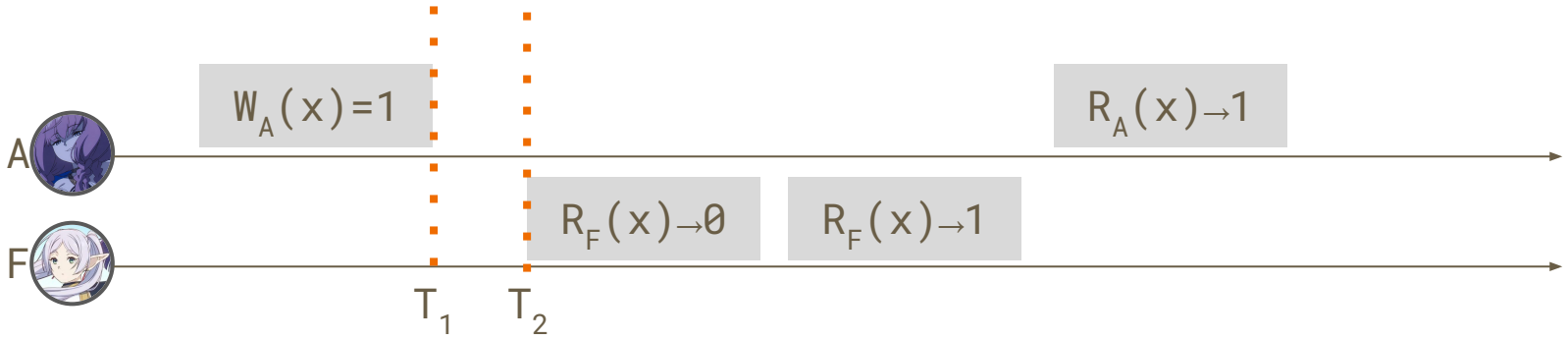
- Toda linealización (consistencia fuerte) es secuencialmente consistente, pero no toda consistencia secuencial es linealizable.
  - Linealización implica consistencia secuencial
- La linealización es más estricta porque impone una relación de orden total basada **en el tiempo real**, mientras que la consistencia secuencial solo requiere que se preserve el orden de programa de cada cliente.
- En un sistema distribuido, es muy difícil garantizar consistencia fuerte dada la latencia de los mensajes.

Diferencia entre Consistencia Fuerte y Secuencial



- Asumiendo $T_1 < T_2$ ¿Se cumple algún modelo de consistencia?

Diferencia entre Consistencia Fuerte y Secuencial



- Asumiendo $T_1 < T_2$ ¿Se cumple algún modelo de consistencia?
- Es consistente secuencialmente, pero no es linealizable.
- Puede ser que nodo F leyó la variable X antes que le llegara la propagación del cambio de X por el nodo A.
  - Existe una secuencia **válida secuencial** $(R_F \rightarrow W_A \rightarrow R_F \rightarrow R_A)$
  - No respeta el requisito de **tiempo real** de la consistencia fuerte.

Modelo de Consistencia Causal

Consistencia Causal [Huto & Ahamad, 1990]

- El modelo de consistencia causal es un debilitamiento de la consistencia secuencial.
- Hace una distinción entre los eventos que están potencialmente relacionados causalmente y aquellos que no lo están.

Consistencia Causal [Huto & Ahamad, 1990]

- El modelo de consistencia causal es un debilitamiento de la consistencia secuencial.
- Hace una distinción entre los eventos que están potencialmente relacionados causalmente y aquellos que no lo están.
  - Si un evento B es causado o influenciado por un evento anterior A, la causalidad requiere que todos los demás vean primero A y luego B.
  - Si un evento C, ejecutado por otro nodo de forma concurrente a B, no tiene ninguna causa, puede estar posicionado en diferentes partes para diversas réplicas. No está "obligado" a una única secuencia.

Consistencia Causal [Huto & Ahamad, 1990]

Ejemplo foro de discusión

- Persona 1 publica un *post* sobre Memes.
- Persona 2 lee el post de meme y hace un comentario
- Persona 3 publica un *post* sobre Anime

Consistencia Causal [Huto & Ahamad, 1990]

Ejemplo foro de discusión

- Persona 1 publica un *post* sobre Memes.
- Persona 2 lee el post de meme y hace un comentario
- Persona 3 publica un *post* sobre Anime

En un sistema con consistencia causal ocurre que:

- Todos los usuarios deben ver primero el post de meme y luego el comentario.
- No se impone un orden global entre el *post* de "Memes" y "Anime", ya que no hay una relación causal directa entre ellos.

Consistencia Causal [Huto & Ahamad, 1990]

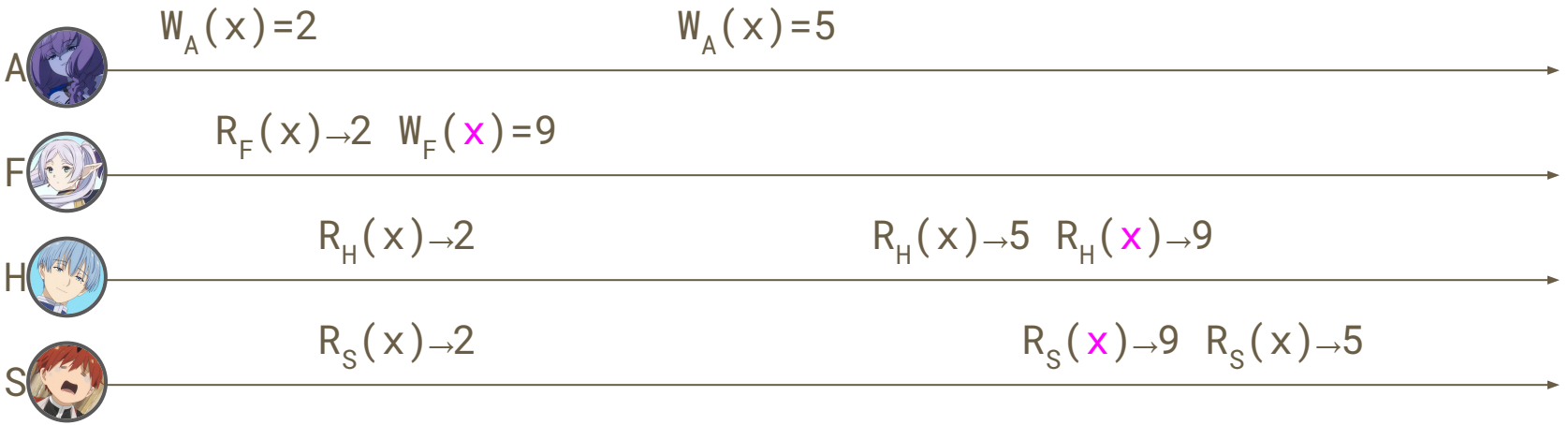
Ejemplo foro de discusión

- Persona 1 publica un *post* sobre Memes.
- Persona 2 lee el post de meme y hace un comentario
- Persona 3 publica un *post* sobre Anime

En un sistema con consistencia causal ocurre que:

- Todos los usuarios deben ver primero el post de meme y luego el comentario.
- No se impone un orden global entre el *post* de "Memes" y "Anime", ya que no hay una relación causal directa entre ellos.
  - Un usuario le puede aparecer primero el post de "Memes", mientras que otro ve primero el post de "Anime". Lo único que se exige es que el comentario que hizo persona 2 esté posterior a la publicación del *post* de Memes.

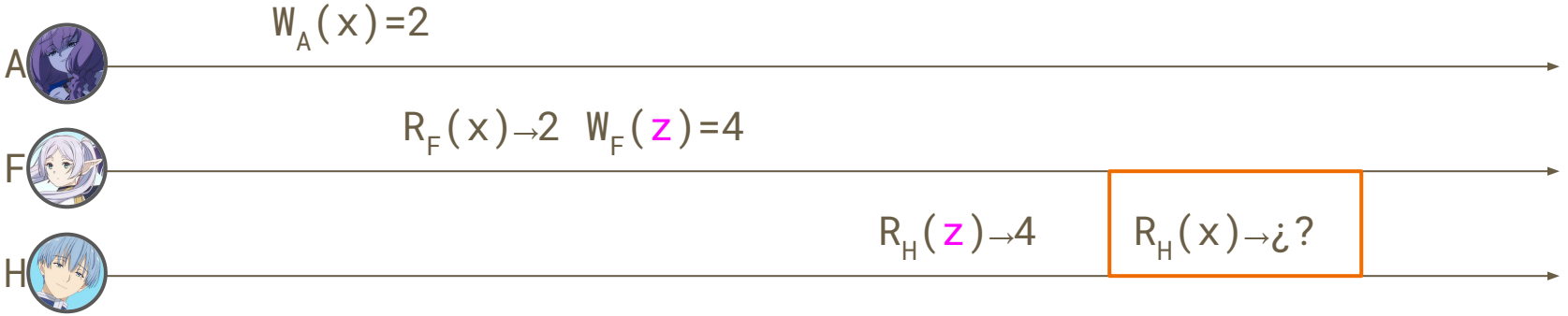
Consistencia Causal [Huto & Ahamad, 1990]



- Nodos H y S ven los *write* en órdenes distintos → No es consistente secuencial
- Nodo F leyó la escritura del nodo A (x=2) antes de escribir él (x=9)
  - Solo se exige que se respete que 2 viene antes de 9. Si algún nodo lee el 2 posterior al 9, se rompe la consistencia causal.

Consistencia Causal [Huto & Ahamad, 1990]

- Solo se exige causalidad.



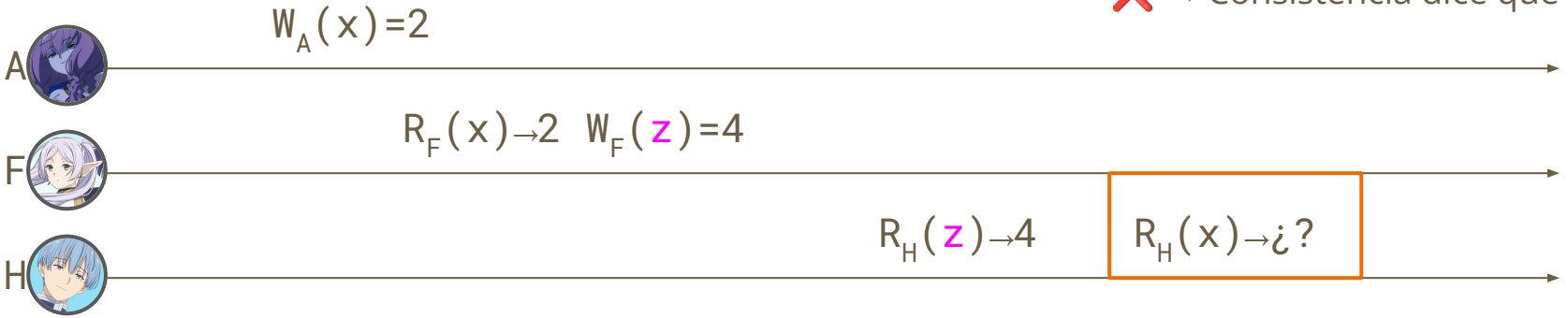
- ¿Qué podemos decir del valor de **X** al final si aseguramos consistencia causal?

Consistencia Causal [Huto & Ahamad, 1990]

- Solo se exige causalidad.

✅ → Consistencia dice que **Si**

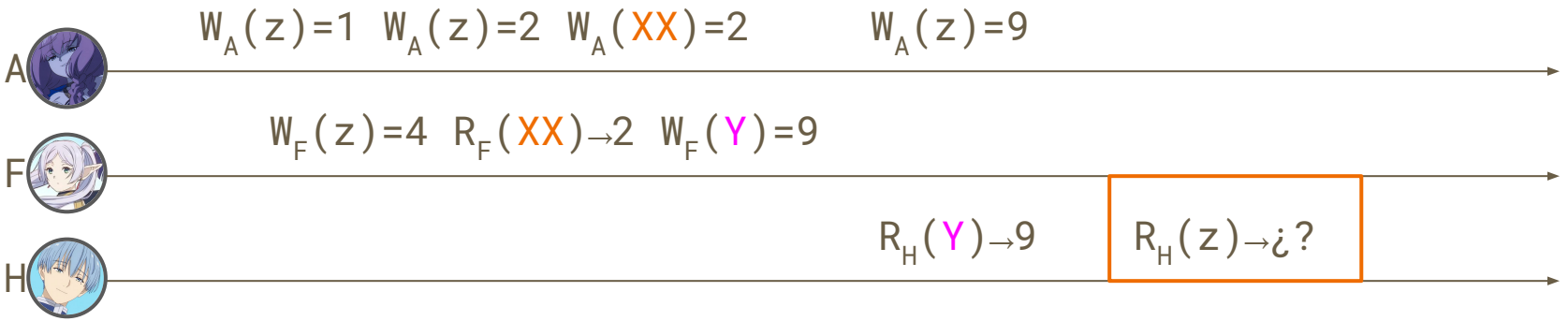
❌ → Consistencia dice que **No**



- ¿Qué podemos decir del valor de **X** al final si aseguramos consistencia causal?
  - ¿Puede tomar el valor 2? ✅
  - ¿Puede tomar el valor NULL (sin definir la variable todavía)? ❌

Consistencia Causal [Huto & Ahamad, 1990]

- Solo se exige causalidad.



- ¿Qué podemos decir del valor de **Z** al final si aseguramos consistencia causal?

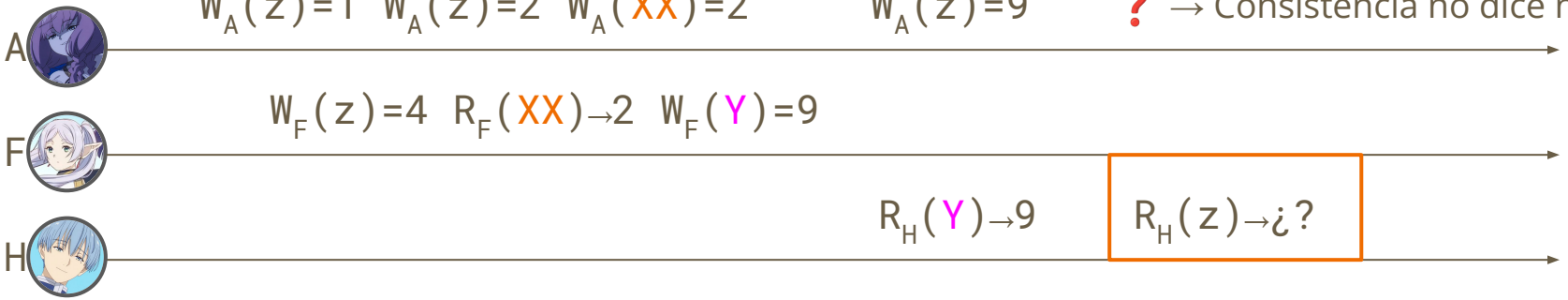
Consistencia Causal [Huto & Ahamad, 1990]

- Solo se exige causalidad.

✅ → Consistencia dice que **Si**

❌ → Consistencia dice que **No**

❓ → Consistencia no dice nada.



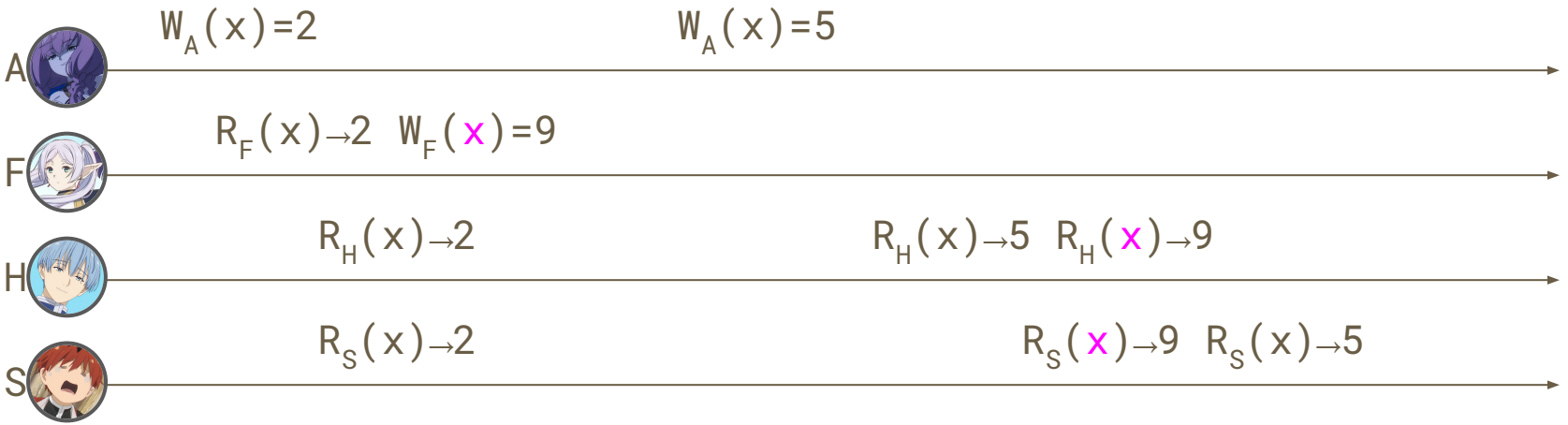
- ¿Qué podemos decir del valor de **Z** al final si aseguramos consistencia causal?
  - ¿Puede tomar el valor 1? ❌
  - ¿Puede tomar el valor 2? ✅
  - ¿Puede tomar el valor 4? ✅
  - ¿Puede tomar el valor 9? ❓
  - ¿Puede tomar el valor NULL? ❌

Modelo de Consistencia Eventual

Consistencia Eventual [Vogels, 2009]

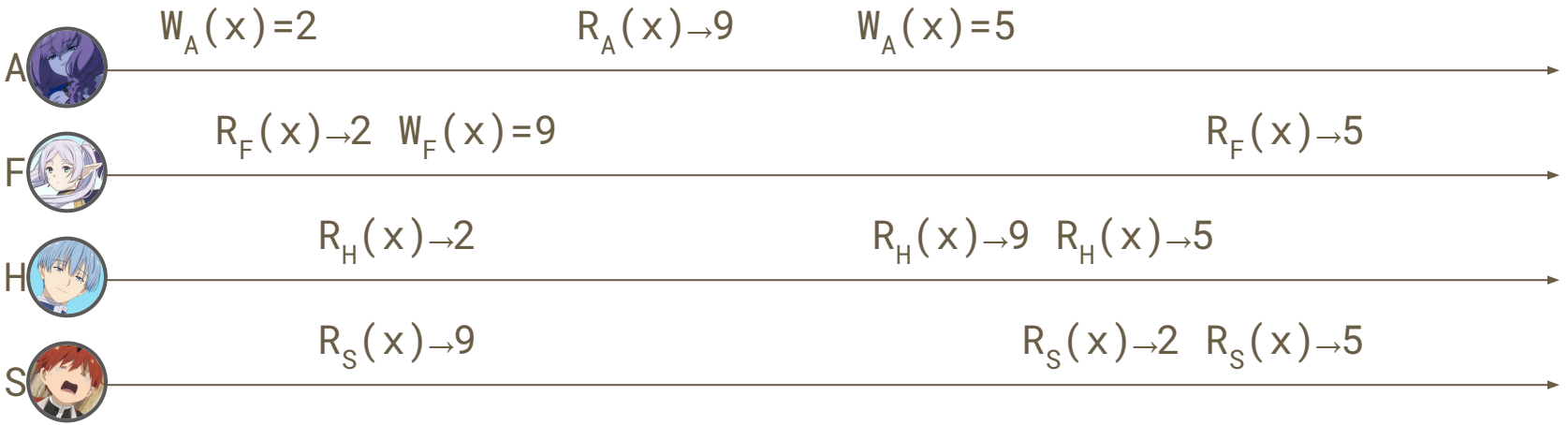
- Modelo que prioriza la alta disponibilidad y el rendimiento sobre la consistencia.
- Si 2 o más nodos no están escribiendo exactamente al mismo tiempo (no hay conflicto de escritura), las réplicas convergerá hacia copias idénticas entre sí.
- Se garantiza que las actualizaciones se propagan eventualmente a las réplicas.
  - Esto permite una relajación en la consistencia entre réplicas. Dos clientes pueden observar réplicas diferentes, e incluso un cliente puede observar datos obsoletos.
- En caso que exista un conflicto de escritura, necesitamos alguna estrategia... por ejemplo, se escoge uno que sobreescriba al otro.

Consistencia Eventual [Vogels, 2009]



- Vimos anteriormente que este caso es consistente causal, pero no es consistente eventual.
  - H primero recibió $W_A(x)=5$ y luego recibió $W_F(x)=9$
  - S primero recibió $W_F(x)=9$ y luego recibió $W_A(x)=5$
  - No van a llegar a un resultado igual.

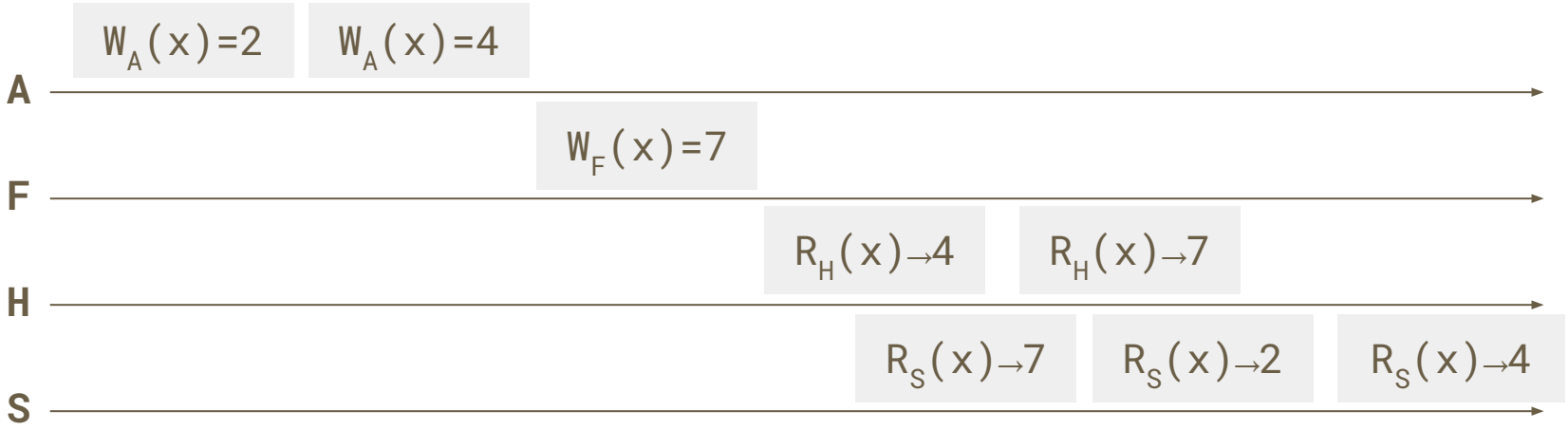
Consistencia Eventual [Vogels, 2009]



- Nodos H y S ven los *write* en distinto orden → No es consistente secuencial.
- Nodo S ve primero que x es 9 y luego que es 2 → No es consistente causal
  - Ojo que este caso sigue siendo factible... Si la comunicación de A → S es más lenta, puede pasar que $W_A(x)=2$ llegue después que nodo F propagó su cambio.
- Todos llegan finalmente a ver x=5 → Consistente eventual

Poniendo a prueba lo que hemos aprendido 👀

Para cada modelo indique si se cumple o no



a. Consistencia Fuerte (linealización)
b. Consistencia Secuencial
c. Consistencia Causal
d. Consistencia Eventual

Próximos eventos

Próxima clase

- Replicación de Datos II - Protocolos de Replicación
  - ¿Cuales existen?
  - ¿Qué tipo de consistencia intenta abordar los Protocolos?

Evaluación

- El otro lúnes su publica control 4, evalúa hasta la próxima clase.

IIC2523
Sistemas Distribuidos

Hernán F. Valdivieso López
(2025 - 2 / Clase 12)

Créditos (animes utilizados)

Sōsō no Frieren