

Lección 12: Algoritmos de consenso

- Introducción
- Enunciado del problema
- Consenso: Algoritmo de una ronda
- Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos
- Consenso: Algoritmo del rey

Introducción

- Los sistemas distribuidos son propensos a fallos
- La *replicación* es una estrategia habitual para conseguir que un sistema sea “más” fiable
 - Si replico y no hay fallos, todos los nodos deberían calcular el mismo resultado (suponiendo que los datos de entrada y el algoritmo de cálculo es el mismo)
 - Si replico y hay fallos, pueden generarse distintos resultados
 - Resultado “válido” determinado por medio de **algoritmos de consenso**
- Tipos de fallos a considerar:
 - *Fallos por caídas*: un nodo deja de enviar mensajes
 - *Fallos bizantinos*: un nodo envía mensajes arbitrarios

Enunciado del problema

Lamport, Shostak, Pease, 1982

- Un grupo de ejércitos bizantinos está rodeando una ciudad enemiga. El balance de fuerzas es tal que si todos los ejércitos atacan simultáneamente, pueden capturar la ciudad; en caso contrario, todos deben retirarse para evitar la derrota. Los generales tienen mensajeros fiables capaces de entregar con éxito cualquier mensaje enviado de un general a otro. El problema es que algunos de los generales son traidores y tienen como objetivo que los ejércitos sean derrotados.

El objetivo es definir un algoritmo que facilite que todos los generales leales lleguen a un consenso sobre el plan de actuación. La decisión final será por votación de la mayoría sobre sus elecciones iniciales. Si empatan, la decisión es retirada.

Enunciado del problema

- Interpretación del problema:
 - Los generales son los nodos de cómputo
 - Los mensajeros son los canales de comunicación
 - Los generales pueden fallar, pero no los mensajeros
- Los generales traidores representan los fallos en el sistema
 - *Fallo por caída*: un traidor que simplemente deja de enviar mensajes
 - asumimos que podemos detectar cuándo un nodo cae
 - *Fallo bizantino*: un traidor que manda mensajes “confusos”
- La decisión final (consenso) está basada en la opinión de la mayoría

Consenso: Algoritmo de una ronda

- Cada general envía su plan a los demás generales y espera los planes de éstos

process General

```
planType finalPlan  
planType array[generals] plan
```

```
P1: plan[myID] := chooseAttackOrRetreat
```

```
P2: for all other generals G
```

```
P3:     send(G, myID, plan[myID])
```

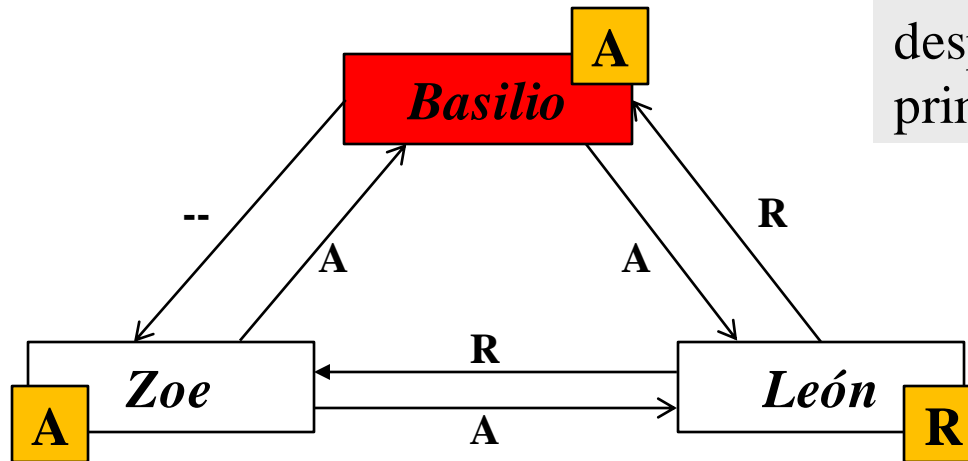
```
P4: for all other generals G
```

```
P5:     receive(G, plan[G])
```

```
P6: finalPlan := majority(plan)
```

Consenso: Algoritmo de una ronda

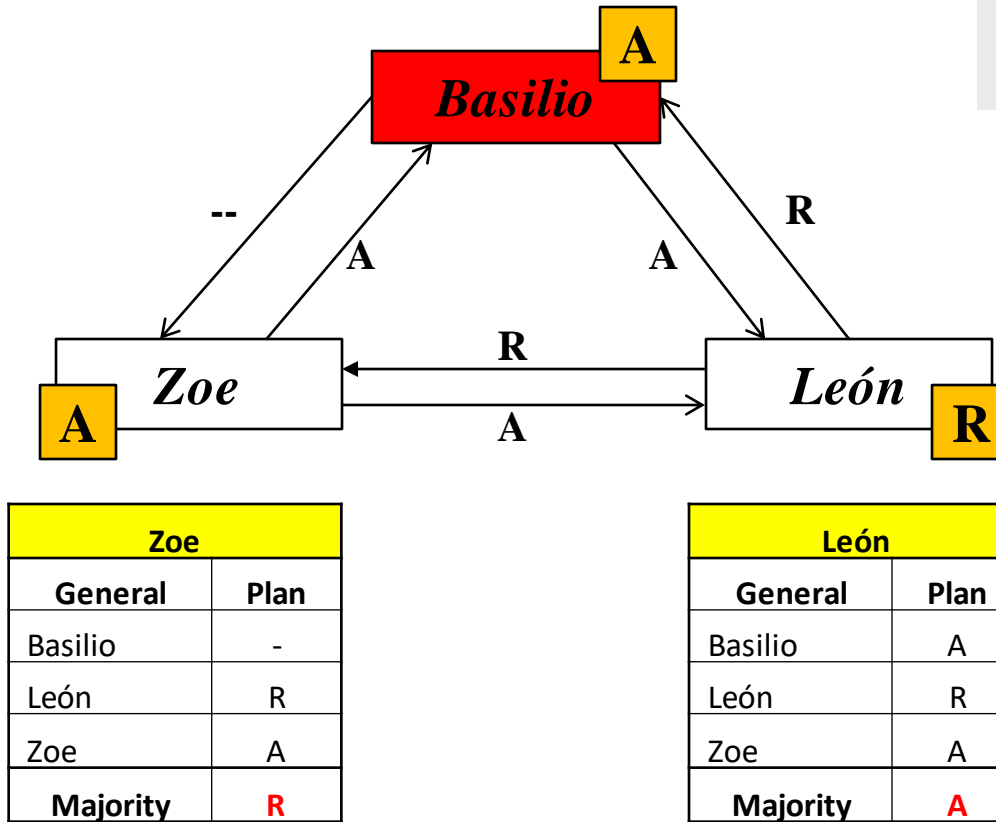
- Sean 3 generales, supongamos que uno de ellos es traidor (Basilio) y sufre un fallo por caída:



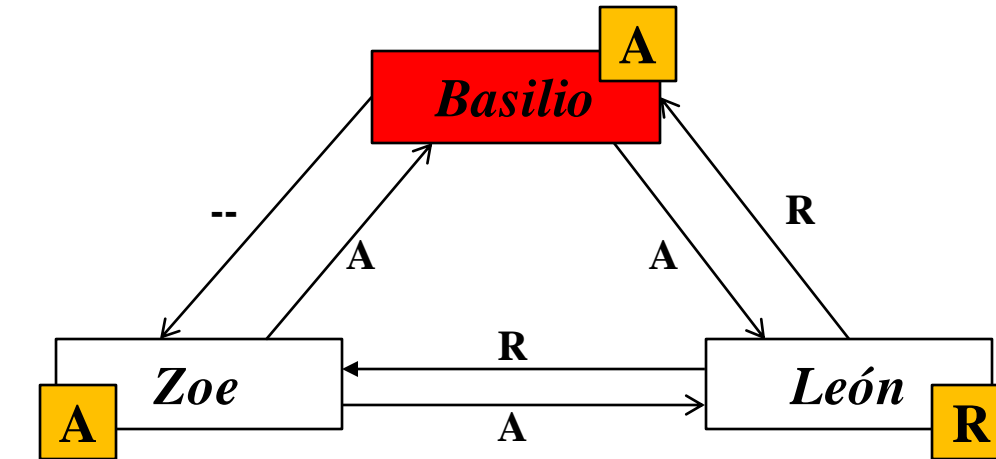
Basilio "peta" después del primer mensaje

Consenso: Algoritmo de una ronda

Basilio "peta" después del primer mensaje



Consenso: Algoritmo de una ronda



Zoe	
General	Plan
Basilio	-
León	R
Zoe	A
Majority	R

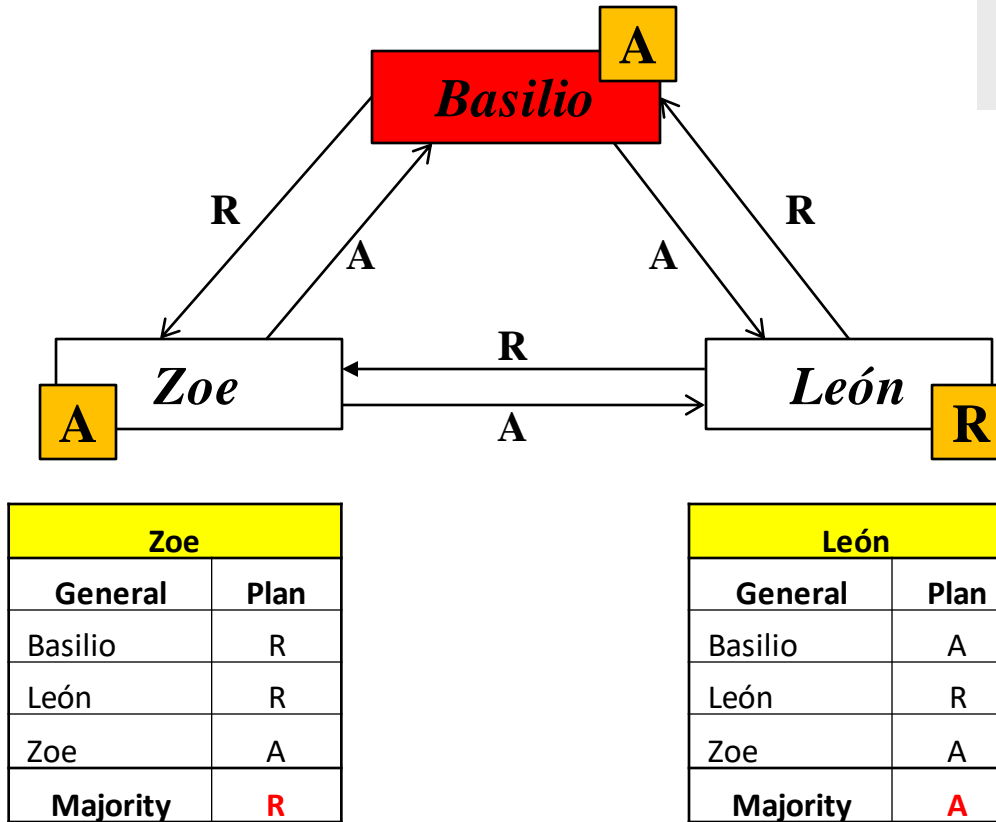
León	
General	Plan
Basilio	A
León	R
Zoe	A
Majority	A

Decisiones de los
generales leales

Plan final = **R**

Consenso: Algoritmo de una ronda

Tampoco para
fallos
bizantinos



Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

- El algoritmo anterior atribuye la misma importancia a los planes de los distintos generales
- ¿Por qué no dar más importancia a los planes de los generales leales?
 - Necesitamos conocer su identidad
 - En un sistema distribuido no se puede conocer la identidad de los generales traidores (nodos que fallarán)
- Por tanto, la solución pasa por asegurar que los planes de los traidores no afecten al consenso de los leales
 - Envío de planes basado en “doble vuelta”:
 - “Primera vuelta”: generales envían su decisión
 - “Segunda vuelta”: generales envían los planes recibidos de otros generales

Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

process General

```
planType finalPlan
planType array[generals] plan
planType array[generals, generals] reportedPlan
planType array[generals] majorityPlan
```

P1: plan[myID] := chooseAttackOrRetreat

P2: for all other generals G // First round

P3: send(G, myID, plan[myID])

P4: for all other generals G

P5: receive(G, plan[G])

P6: for all other generals G // Second round

P7: for all other generals G' except G

P8: send(G', myID, G, plan[G])

P9: for all other generals G

P10: for all other generals G' except G

P11: receive(G, G', reportedPlan[G, G'])

... // First and second Vote

G me dice que
G' le dijo...

Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

process General

```
planType finalPlan
planType array[generals] plan
planType array[generals, generals] reportedPlan
planType array[generals] majorityPlan
```

P1: plan[myID] := chooseAttackOrRetreat

P2: for all other generals G // First round

P3: send(G, myID, plan[myID])

P4: for all other generals G

P5: receive(G, plan[G])

P6: for all other generals G // Second round

P7: for all other generals G' except G

P8: send(G', myID, G, plan[G])

P9: for all other generals G

P10: for all other generals G' except G

P11: receive(G, G', reportedPlan[G, G'])

... // First and second Vote

G me dice que
G' le dijo...

Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

```
... // First and Second Round

P12: for all generals G                                // First vote
P13:     majorityPlan[G] := majority(plan[G]  $\cup$  reportedPlan[*,G])

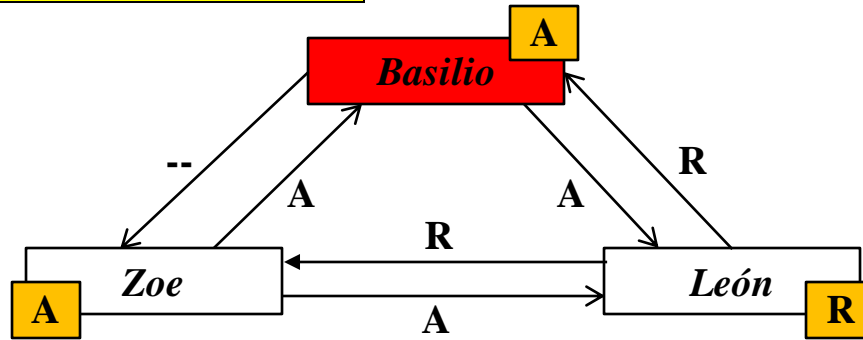
P14: majorityPlan[myID] := plan[myID]                  // Second vote
P15: finalPlan := majority(majorityPlan)
```

Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

- Los siguientes escenarios pretenden mostrar que:
 - **Ejemplo 1:** El algoritmo evita decisiones inconsistentes como consecuencia de fallos por caídas
 - **Ejemplo 2:** El algoritmo puede llevar a decisiones inconsistentes si se trata de fallos bizantinos (2 generales leales, 1 general traidor)
 - **Ejemplo 3:** El algoritmo puede garantizar decisiones consistentes si se trata de fallos bizantinos (3 generales leales, 1 general traidor)

Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

Ejemplo 1: caída en “primera vuelta”



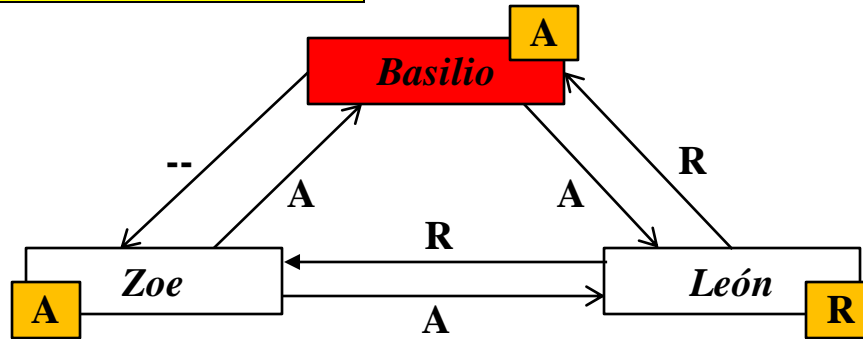
Basilio "peta" después del primer mensaje

Zoe				
General	Plan	Reported by		Majority
		Basilio	León	
Basilio				
León				
Zoe				
Majority				

León				
General	Plan	Reported by		Majority
		Basilio	Zoe	
Basilio				
León				
Zoe				
Majority				

Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

Ejemplo 1: caída en “primera vuelta”



Basilio "peta" después del primer mensaje

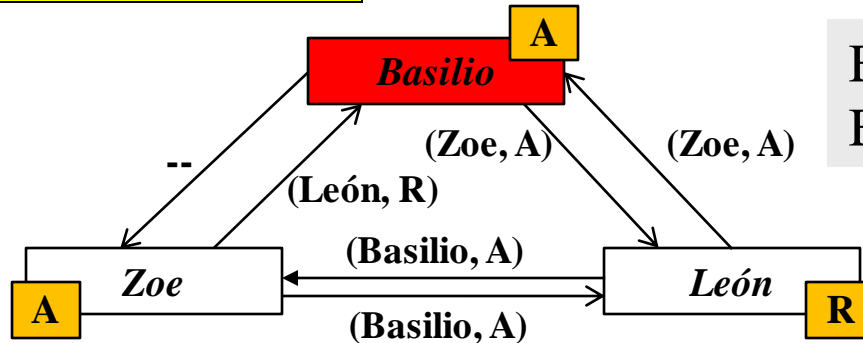
Zoe				
General	Plan	Reported by		Majority
		Basilio	León	
Basilio	-		A	A
León	R	-		R
Zoe	A			A
Majority				A

León				
General	Plan	Reported by		Majority
		Basilio	Zoe	
Basilio	A		-	A
León	R			R
Zoe	A	-		A
Majority				A

Basta con que un general envíe un mensaje para que todos lo sepan

Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

Ejemplo 1: caída en “segunda vuelta”



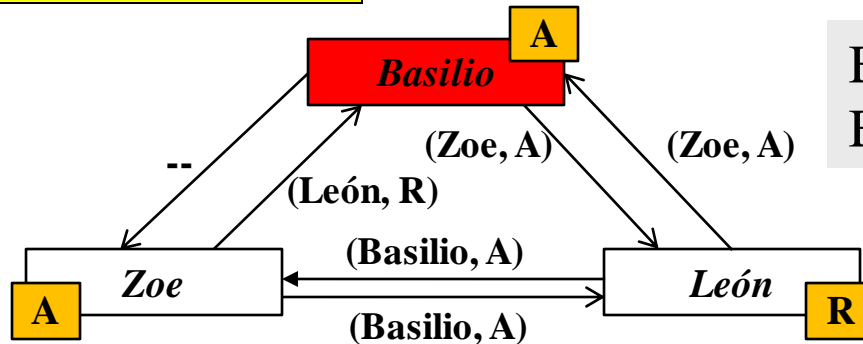
Basilio envía 1ª vuelta
Basilio envía parte 2ª

Zoe				
General	Plan	Reported by		Majority
		Basilio	León	
Basilio				
León				
Zoe				
Majority				

León				
General	Plan	Reported by		Majority
		Basilio	Zoe	
Basilio				
León				
Zoe				
Majority				

Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

Ejemplo 1: caída en “segunda vuelta”



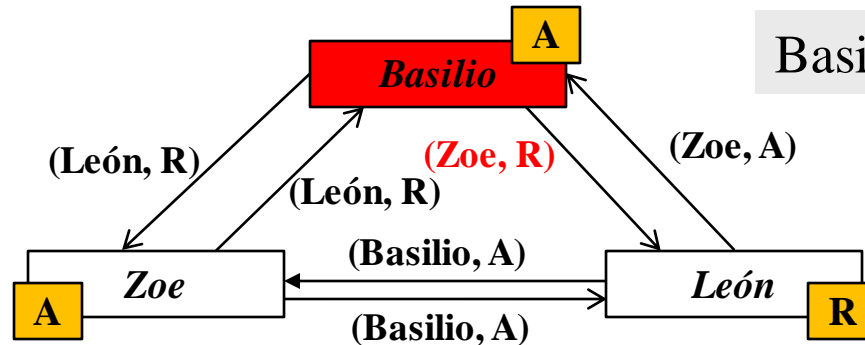
Basilio envía 1ª vuelta
Basilio envía parte 2ª

Zoe				
General	Plan	Reported by		Majority
		Basilio	León	
Basilio	A		A	A
León	R	-		R
Zoe	A			A
Majority				A

León				
General	Plan	Reported by		Majority
		Basilio	Zoe	
Basilio	A		A	A
León	R			R
Zoe	A	A		A
Majority				A

Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

Ejemplo 2: Fallo bizantino en “segunda vuelta”

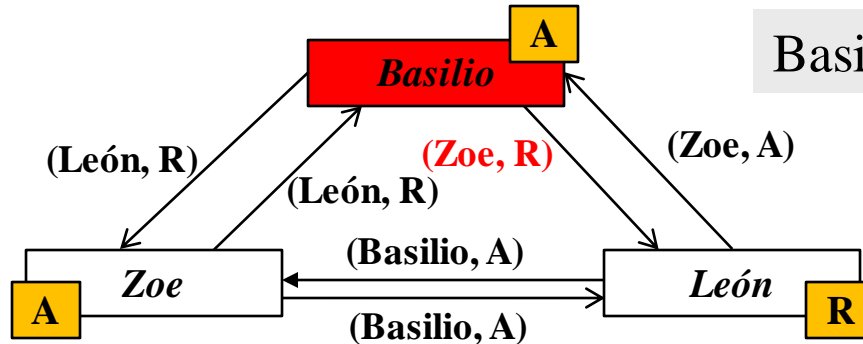


Zoe				
General	Plan	Reported by		Majority
		Basilio	León	
Basilio	A			
León	R			
Zoe	A			
Majority				

León				
General	Plan	Reported by		Majority
		Basilio	Zoe	
Basilio	A			
León	R			
Zoe	A			
Majority				

Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

Ejemplo 2: Fallo bizantino en “segunda vuelta”



Zoe				
General	Plan	Reported by		Majority
		Basilio	León	
Basilio	A		A	A
León	R	R		R
Zoe	A			A
Majority				A

León				
General	Plan	Reported by		Majority
		Basilio	Zoe	
Basilio	A		A	A
León	R			R
Zoe	A	R		R
Majority				R

¡Inconsistencia en las decisiones de los generales leales!

Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

Ejemplo 3: Fallos bizantinos

- Escenario para 4 generales:
 - Basilio (A), Juan (A) y León (R) son leales
 - Zoe es el traidor
- Estructura de datos de Basilio con los mensajes recibidos por los generales leales:

Basilio					
General	Plan	Reported by			Majority
		Juan	León	Zoe	
Basilio	A				A
Juan	A		A	?	A
León	R	R		?	R
Zoe	?	?	?		?
Majority					?

Puede conocerse con certeza la decisión de cada general leal, independientemente de lo que diga el general traidor

Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

R a Basilio y Leo
A a Juan

- Supongamos que Zoe envía en “primera vuelta” mensajes contradictorios:
 - Los mensajes intercambiados entre los generales leales en “segunda vuelta” son correctos

Basilio					
General	Plan	Reported by			Majority
		Juan	León	Zoe	
Basilio	A				A
Juan	A		A	?	A
León	R	R		?	R
Zoe	R	A	R		R
Majority					R

El traidor puede influir en la decisión final de los generales leales, pero entre estos existirá consenso (R).

Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

- ¿Cuál sería la decisión final si todos los generales leales hubieran inicialmente elegido el mismo plan (A)?

Basilio					
General	Plan	Reported by			Majority
		Juan	León	Zoe	
Basilio	A				A
Juan	A		A	?	A
León	A	A		?	A
Zoe	?	?	?		?
Majority					?

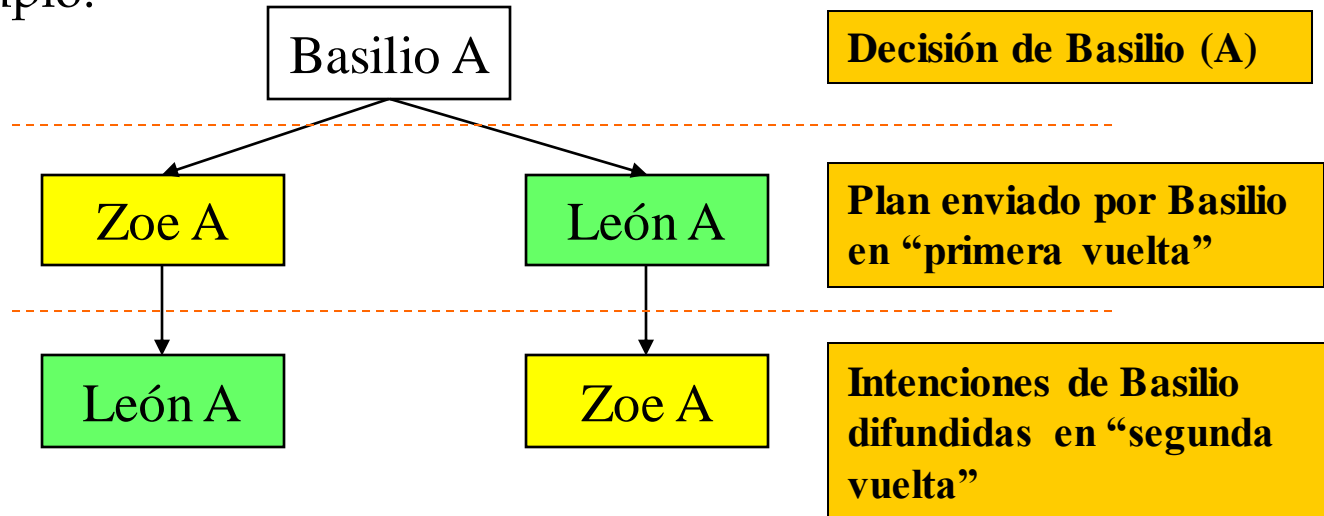
Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

- ¿Y si el traidor manda mensajes contradictorios, pero la mayoría de estos mensajes es “atacar” (A)?

Basilio					
General	Plan	Reported by			Majority
		Juan	León	Zoe	
Basilio	A				A
Juan	A		A	?	A
León	R	R		?	R
Zoe	A	A	R		?
Majority					?

Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

- Corrección del algoritmo basada en *Knowledge Trees (KT)*
 - Un KT representa la información en el sistema sobre el general en su nodo raíz
- Ejemplo:



Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

- Sean 3 generales (uno de ellos traidor, Basilio), el algoritmo de los generales bizantinos será correcto ante fallos por caída si:
 - para cualquier escenario, los generales leales siempre llegan a la misma conclusión sobre los planes del traidor

Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

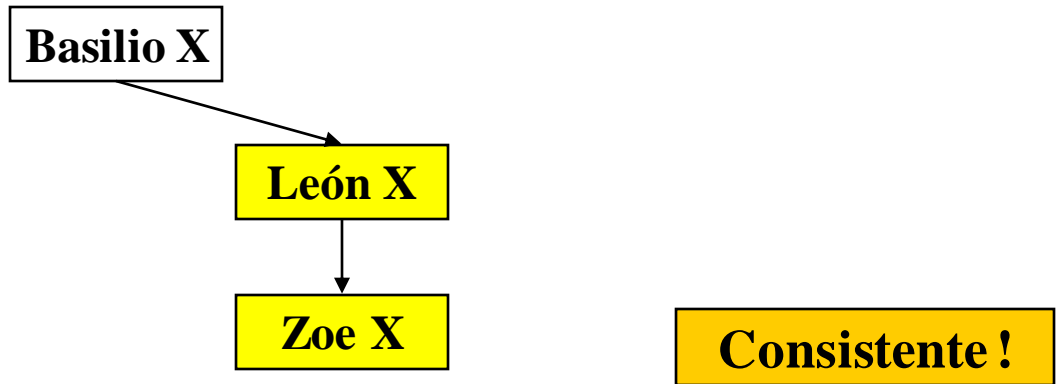
- Sean 3 generales (uno de ellos traidor, Basilio), el algoritmo de los generales bizantinos será correcto ante fallos por caída si:
 - para cualquier escenario, los generales leales siempre llegan a la misma conclusión sobre los planes del traidor
- Caso 1: Basilio no manda ningún mensaje.



Consistente !

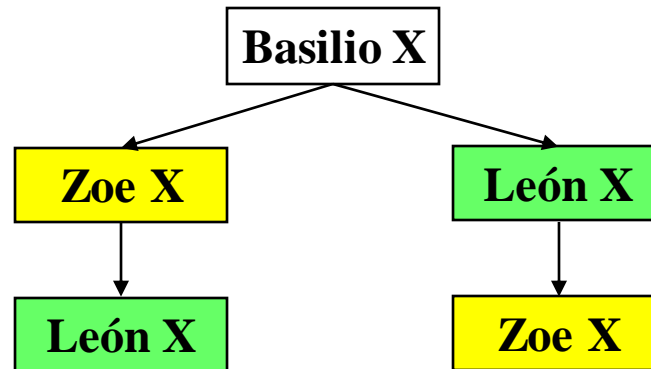
Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

- Sean 3 generales (uno de ellos traidor, Basilio), el algoritmo de los generales bizantinos será correcto ante fallos por caída si:
 - para cualquier escenario, los generales leales siempre llegan a la misma conclusión sobre los planes del traidor
- **Caso 2:** Basilio envía un único mensaje en “primera vuelta” a un único general leal (por ejemplo, a León).



Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

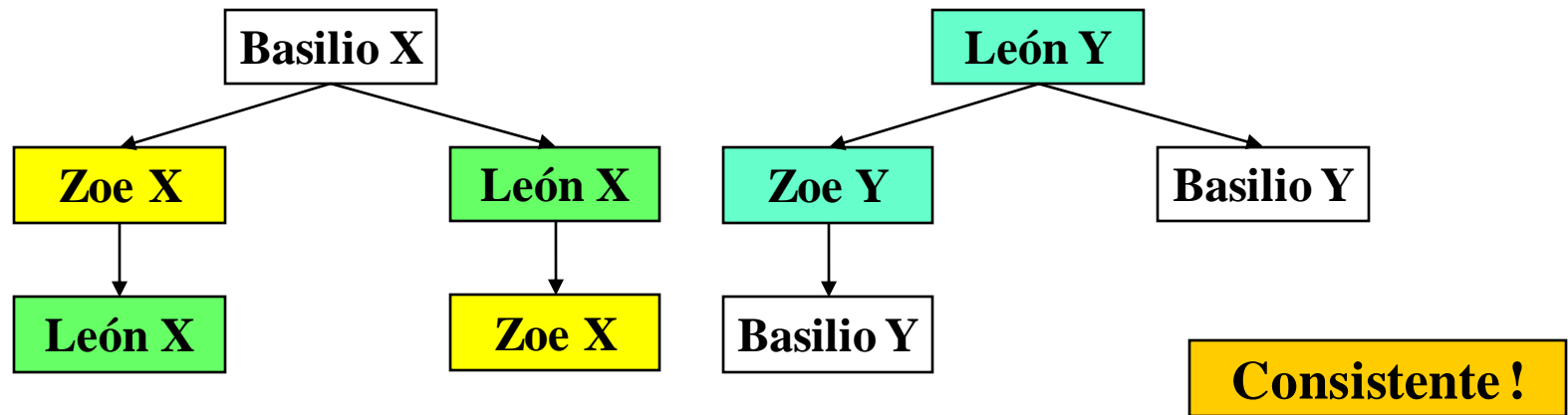
- Sean 3 generales (uno de ellos traidor, Basilio), el algoritmo de los generales bizantinos será correcto ante fallos por caída si:
 - para cualquier escenario, los generales leales siempre llegan a la misma conclusión sobre los planes del traidor
- **Caso 3:** Basilio envía correctamente los mensajes de “primera vuelta”, pero cae antes de enviar los de “segunda vuelta”



Consistente !

Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

- Sean 3 generales (uno de ellos traidor, Basilio), el algoritmo de los generales bizantinos será correcto ante fallos por caída si:
 - para cualquier escenario, los generales leales siempre llegan a la misma conclusión sobre los planes del traidor
- **Caso 4:** Basilio envía correctamente los mensajes de “primera vuelta”, pero no el segundo a Zoe ¿qué conoce Zoe de León?

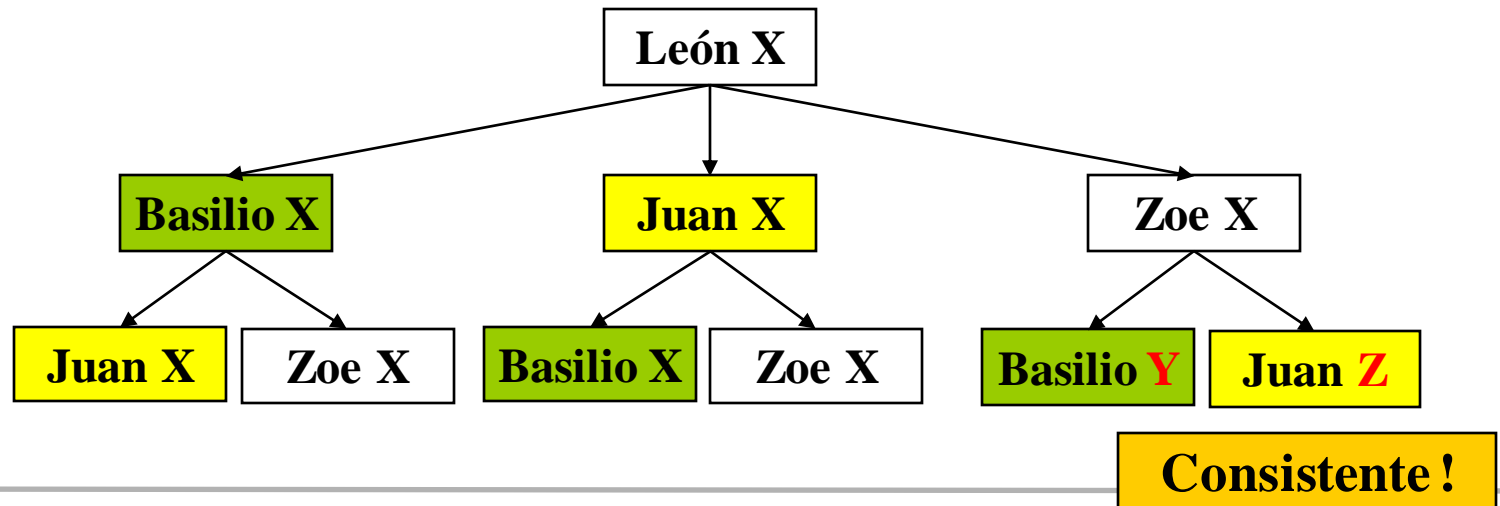


Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

- Sean 4 generales (uno de ellos traidor, Zoe), el algoritmo de los generales bizantinos será correcto ante fallos bizantinos si:
 - para cualquier escenario, los generales leales siempre llegan a la misma conclusión sobre los planes del traidor

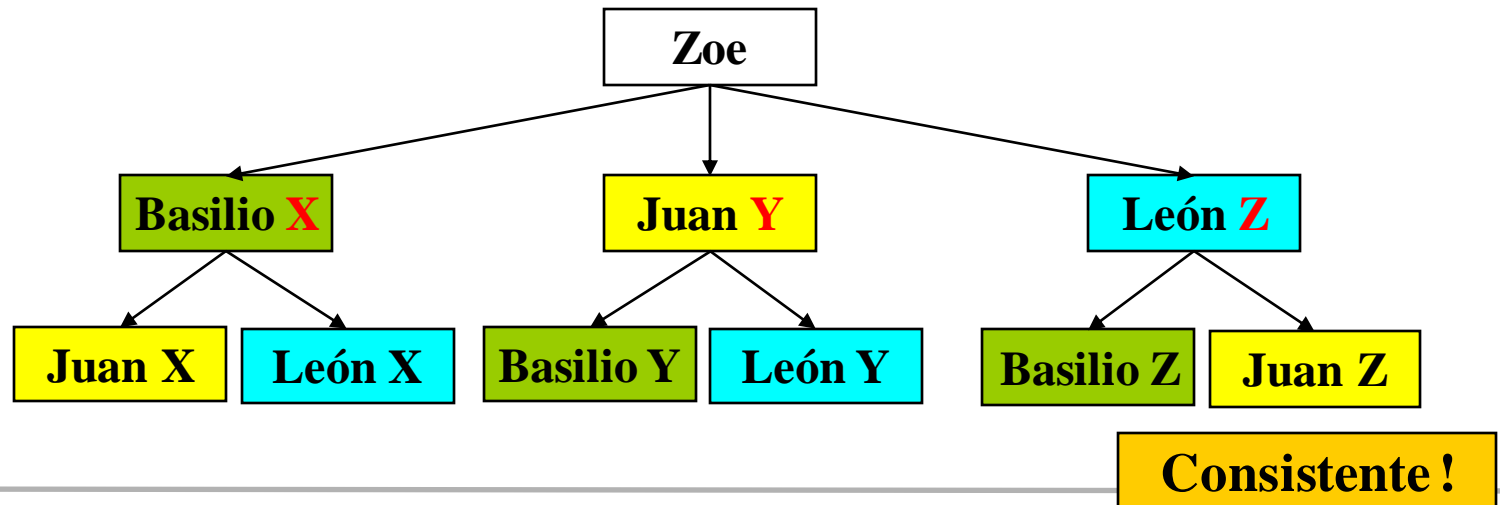
Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

- Sean 4 generales (uno de ellos traidor, Zoe), el algoritmo de los generales bizantinos será correcto ante fallos bizantinos si:
 - para cualquier escenario, los generales leales siempre llegan a la misma conclusión sobre los planes del traidor
- KT de un general leal:



Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

- Sean 4 generales (uno de ellos traidor, Zoe), el algoritmo de los generales bizantinos será correcto ante fallos bizantinos si:
 - para cualquier escenario, los generales leales siempre llegan a la misma conclusión sobre los planes del traidor
- KT del general traidor:



Consenso: Algoritmo de los generales bizantinos

- Por tanto, el algoritmo de los generales bizantinos **evita inconsistencia en la información** en:
 - Cualquier escenario que experimente fallos por caídas
 - Aquellos escenarios que experimenten fallos bizantinos si el número de generales es $\geq 3t+1$, siendo t el número de generales traidores
- No obstante, este algoritmo **requiere un elevado flujo de mensajes**, especialmente conforme aumenta el número de generales

Consenso: Algoritmo del rey

- Basado en la idea de que un número pequeño de traidores no puede influir en las intenciones de la mayoría
 - El intercambio de mensajes es menor
 - Pero requiere que el número de generales sea $(4t+1)$, siendo t el número de generales traidores
- En cada ronda el voto de un general tiene una mayor importancia (status de Rey)
 - La identidad del Rey no es conocida por el resto de los nodos
 - El Rey puede ser un general leal o traidor

Consenso: Algoritmo del rey

```
planType finalPlan, myMajority, kingPlan
planType array[generals] plan
Integer votesMajority, kingID
```

process General

P1: plan[myID] := chooseAttackOrRetreat

5 generales (t = 1)

P2: do **TWO** times

P3: for all other generals G //first and third round

P4: send(G, myID, plan[myID])

P5: for all other generals G

P6: receive(G, plan[G])

P7: myMajority := majority(plan)

P8: votesMajority := number of votes for myMajority

...

Consenso: Algoritmo del rey

P2: do **TWO** times

...

P9: if my turn to be king //second and fourth round

P10: for all other generals G

P11: send(G, myID, myMajority)

P12: plan[myID] := myMajority

else

P13: receive(kingID, kingPlan)

P14: if (**votesMajority** > 3)

P15: plan[myID] := myMajority

else

P16: plan[myID] := kingPlan

P17: finalPlan := plan[myID] // Final decision

mayor que
 $(\text{generales}/2)+t$

Consenso: Algoritmo del rey

- Escenarios de ejemplo con 5 generales (Miguel es el traidor)
 - Planes iniciales: Basilio y Juan (A); Zoe y León (R)
- Interés por la consistencia de las estructuras de datos de los generales leales:
 - **Ejemplo 1:** el primer Rey es un general leal (Zoe)
 - **Ejemplo 2:** el primer Rey es un general traidor (Miguel) y éste envía mensajes contradictorios

Consenso: Algoritmo del rey

Ejemplo 1

- Escenario con 5 generales (Miguel es el traidor):

Basilio							
Basilio	Juan	León	Miguel	Zoe	myMajority	votesMajority	kingPlan
A	A	R	R	R	R	3	
Juan							
Basilio	Juan	León	Miguel	Zoe	myMajority	votesMajority	kingPlan
A	A	R	A	R	A	3	
León							
Basilio	Juan	León	Miguel	Zoe	myMajority	votesMajority	kingPlan
A	A	R	A	R	A	3	
Zoe							
Basilio	Juan	León	Miguel	Zoe	myMajority	votesMajority	kingPlan
A	A	R	R	R	R	3	

Consenso: Algoritmo del rey

Ejemplo 1

- Zoe es el Rey (R)

Basilio							
Basilio	Juan	León	Miguel	Zoe	myMajority	votesMajority	kingPlan
R							R
Juan							
Basilio	Juan	León	Miguel	Zoe	myMajority	votesMajority	kingPlan
	R						R
León							
Basilio	Juan	León	Miguel	Zoe	myMajority	votesMajority	kingPlan
		R					R
Zoe							
Basilio	Juan	León	Miguel	Zoe	myMajority	votesMajority	kingPlan
				R			

Consenso: Algoritmo del rey

Ejemplo 1

- Tercera ronda de envío de planes:

Basilio							
Basilio	Juan	León	Miguel	Zoe	myMajority	votesMajority	kingPlan
R	R	R	?	R	R	4-5	
Juan							
Basilio	Juan	León	Miguel	Zoe	myMajority	votesMajority	kingPlan
R	R	R	?	R	R	4-5	
León							
Basilio	Juan	León	Miguel	Zoe	myMajority	votesMajority	kingPlan
R	R	R	?	R	R	4-5	
Zoe							
Basilio	Juan	León	Miguel	Zoe	myMajority	votesMajority	kingPlan
R	R	R	?	R	R	4-5	

Consenso: Algoritmo del rey

Ejemplo 2

- Supongamos que el primer Rey es el traidor (Miguel):

Basilio							
Basilio	Juan	León	Miguel	Zoe	myMajority	votesMajority	kingPlan
R							R
Juan							
Basilio	Juan	León	Miguel	Zoe	myMajority	votesMajority	kingPlan
	A						A
León							
Basilio	Juan	León	Miguel	Zoe	myMajority	votesMajority	kingPlan
		A					A
Zoe							
Basilio	Juan	León	Miguel	Zoe	myMajority	votesMajority	kingPlan
				R			R

Consenso: Algoritmo del rey

Ejemplo 2

- Tercera ronda de envío de planes:

Basilio							
Basilio	Juan	León	Miguel	Zoe	myMajority	votesMajority	kingPlan
R	A	A	?	R	?	3	
Juan							
Basilio	Juan	León	Miguel	Zoe	myMajority	votesMajority	kingPlan
R	A	A	?	R	?	3	
León							
Basilio	Juan	León	Miguel	Zoe	myMajority	votesMajority	kingPlan
R	A	A	?	R	?	3	
Zoe							
Basilio	Juan	León	Miguel	Zoe	myMajority	votesMajority	kingPlan
R	A	A	?	R	?	3	

Consenso: Algoritmo del rey

Ejemplo 2

- Cuarta ronda, Zoe es el Rey (A):

Basilio							
Basilio	Juan	León	Miguel	Zoe	myMajority	votesMajority	kingPlan
A							A
Juan							
Basilio	Juan	León	Miguel	Zoe	myMajority	votesMajority	kingPlan
A							A
León							
Basilio	Juan	León	Miguel	Zoe	myMajority	votesMajority	kingPlan
A							A
Zoe							
Basilio	Juan	León	Miguel	Zoe	myMajority	votesMajority	kingPlan
				A			

Decisión final (A)