30221/39521 - Sistemas Distribuidos
Universidad de Zaragoza, curso 2024/2025

Práctica 3: **Raft 1ª parte**

Resumen

En la práctica 3 y 4, se plantea construir un servicio de almacenamiento clave/valor, en memoria RAM y tolerante a fallos utilizando replicación distribuida basada en Raft, con una solución de máquina de estados replicada mediante un algoritmo de consenso. En el caso de esta práctica 3, se darán los primeros pasos para la operativa del algoritmo de elección de líder requerido, con algún que otro tipo de fallo, y el tratamiento, sin fallos, de la llamada RPC appendEntry (añadir entradas nuevas) en las réplicas. Las referencias son el tema 5 de teoría y el documento adjunto al guión. La especificación de estado de las réplicas y las llamadas RPC de referencia se encuentran disponibles en el anexo de este mismo guión.

Estas prácticas incluyen redactar una memoria, escribir código fuente y elaborar un juego de pruebas. El texto de la memoria y el código deben ser originales. Copiar supone un cero en la nota de prácticas.

Notas sobre esta práctica

- Aplicar "go fmt" al código fuente. Además : fijar en el editor **máxima longitud de línea de 80 columnas, como mucho 15 instrucciones en una función** (salvo situaciones especiales justificadas).

1. Objetivo de la práctica

Los objetivos de la práctica son los siguientes:

- Presentar una implementación del algoritmo de eleccion de líder de Raft que funcione en escenarios iniciales de fallos básicos.

- Implementar el tratamiento de la llamada de RPC *AppendEntry*, suponiendo un funcionamiento sin fallos.

2. El servicio de elección de líder

Como primeros pasos en la solución completa de replicación distribuida, es necesario contruir el algoritmo de elección de líder por votacion explicado en clase de teoría y en el documento que se entrega asociado a este guión. En esta práctica se implementará, **únicamente**, la elección por votación mayoritaría (al menos la mitad más uno de las réplicas). **La restricción, adicional, de nº de mandato y nº de índice para seleccionar al mejor líder (sección 5.4.1 del documento asociado) será implementado en la práctica 4**.

2.1. Funcionamiento

Para la implementación, como comportamiento de alto nivel, seguir la especificación de la máquina de estados de la página 30 del tema 5 que especifica el comportamiento básico de cada nodo con respecto al algoritmo de elección de líder que deberá estar ejecutandose de forma continua. Por otra parte, la especificación más concreta de las llamadas RPC básicas y el estado de cada réplica se encuentra en la figura 2 disponible al final de este guión. En particular, el funcionamiento global de la elección del líder está diseminada en diferentes partes de esa figura.

Añadir el estado, definido en la figura 2, en el struct NodoRaft definido en el fichero *raft.go*. También se necesitará otro struct que represente la información de cada entrada del registro de operaciones (logs) de Raft.Completar los structs *RequestVoteArgs*, para los argumentos de la llamada RPC RequestVote y *RequestVoteReply* para la respuesta de esa llamada.

Crear una gorutina concurrente que se responsabilice de la gestión del líder, y ponga en marcha un proceso de elección si no recibe mensajes de nadie durante un tiempo. De esta forma podrá saber quien es el líder, si ya lo hay, o convertirse el mismo en líder. Implementar el método asociado a la llamada RPC *RequestVote()* para solicitar votos en una elección.

Define los structs asociados a argumento y respuesta de la llamada RPC *AppendEntries()*. Implementar el método asociado a la llamada RPC *AppendEntries()* para que el líder envíe látidos de corazón, de forma periódica, al resto de réplicas, notificando su buen estado operativo.

Aseguraros que los **tiempos de expiración**, asociados a la **recepción de latidos** y utilizados para la detección de fallo del líder, no expiren a la vez en diferentes réplicas (introducir variaciones aleatorias en rango limitado). Si no, los nodos votarán por si mismos y ninguno podrá convertirse en líder. Teneis disponible el paquete *rand* de la librería estandar para generar valores aleatorios en intervalos.

La **frecuencia de látidos** no debe ser superior a 20 veces por segundo. Y el periodo de una sola elección, en el que se decide un nuevo líder trás detectar el fallo del anterior, no debe ser superior a 0,5 segundos. Se recuerda que puede requerirse varias elecciones para llegar a una decisión, por no conseguir mayorías. Luego hay que añadir un **tiempo de expiración** para una **elección**, en caso de no conseguir mayoría. Y debe ser suficientemente corto, **relativo** al **periodo de latido**, para conseguir varias elecciones en el periodo total de selección, de un nuevo lider para un mandato específico, de 2,5 segundos. Transcurrido este periodo total, de elecciones de un solo mandato, forzais un error fatal. Si hace falta utilizar intervalos aleatorios.

Apoyaros en el paquete *timer* de la líbrería estandar, tal como comentamos en clase.

EL RPC de Go solo envía structs con todos los campos exportados, es decir que empiezan en mayúsculas. Los campos de las substructuras internas (campos de la estructura de entrada del registro de operaciones de Raft) deben comenzar también con mayusculas. Si no, no funcionan las llamadas RPC. **Además, los métodos a invocar mediante RPC, deben ser registrados en el servidor RPC, a partir de su tipo asociado.**

3. Llamada RPC AppendEntry sin fallos

Implementar la llamada *AppendEntry* completa siguiendo las indicaciones de la figura 2 para conseguir enviarse y comprometer, con mayoría de réplicas, operaciones cliente en entradas de registro, **sin aplicar las entradas comprometidas a la maquina de estados** (eso se hará en práctica 4). Y probar dicha operativa, **únicamente, durante funcionamiento sin fallos en el conjunto del sistema, incluido el líder**.

4. Organización de código

Se aconseja el desarrollo del código y las pruebas en un ordenador Unix (Linux, BSDs, Mac, subsistema Linux de Windows). No se da soporte a desarrollo en Windows.

Implementar la funcionalidad de Raft en el fichero "raft/internal/raft/raft.go", donde

ya disponeis de un esqueleto.

El conjunto del código reside en el *modulo raft*, bajo el cual encontrais diferentes paquetes y funcionalidades, en subdirectorios. Subdirectorio "*raft/cmd*" es utilizado para ubicar código ejecutable (func main). El subdirectorio "*raft/internal*" se utiliza para paquetes de uso interno al modulo. En el subdirectorio "*raft/pkg*" se ubican paquetes a exportar, que pueden ser utilizados por código externo al modulo. Y el subdirectorio "*raft/vendor*" contiene los paquetes importados por el código de este modulo para no necesitar acceder a ellos, sistemáticamente, a través de Internet, y es obtenido ejecutando "**go mod vendor**" en el directorio raíz del modulo.

La implementación del servicio Raft de consenso debe ofrecer el siguiente interfaz de llamadas y tipo dato:

```
// Crear nuevo nodo Raft
nr:= NuevoNodo(nodos, yo, canalAplicar)

// Cliente de Raft solicita someter nueva operación para acuerdo
//    por consenso en entrada de registro
nr.SometerOperacion(operacion interface{}) (indice, mandato, esLider, idLider)

// Obtención de estado de nodo Raft: quien es, mandato en curso
//    y si cree ser el lider
nr.ObtenerEstado() (yo, mandato, esLider, idLider)

// Metodo Para() utilizado cuando no se necesita mas al nodo
func (nr *NodoRaft) Para()

// cada vez que una nueva operacion es comprometida en una entrada
//   de registro, cada nodo Raft debe enviar un mensaje AplicaOperacion
//   a la máquina de estados
type AplicaOperacion
```

Teneis disponible la función "*CallTimeout*", de llamada a método remoto rpc con tiempo de expiración, en el fichero "*raft/internal/comun/rpctimeout*".

Teneis un código básico de servidor rpc genérico (con tcp, no http) en fichero "cmd/srvraft/main.go" para que lo adapteis al funcionamiento de servidor Raft con registro de las llamadas rpc *AppendEntries*, *RequestVote* y *SometerOperacion*, planteadas en el fichero "*internal/raft.go*".

Si os interesa, teneis disponible código de despliegue de programas remotos con ssh

en multiples máquinas en el fichero "*raft/internal/despliegue/sshClientWithPUBLICKEYAuthAndRemoteExec.go*". Se utiliza en la validación del test 1 (puesta en funcionamiento de nodos Raft), utilizando ssh con autentifiación por clave pública.

Podeis, también, desarrollar otro paquete simple en "*raft/pkg/cltraft/cltraft.go*" para enviar operaciones, como cliente, a los nodos Raft (a ser posible al lider) a través de llamadas rpc que definais y que espere su compromiso. En principio, una buena parte del código de test funciona como funcionaliddades de cliente del servicio Raft.

Teneis disponible código incompleto de test de integracion para las 4 pruebas de validacion en el fichero "*raft/internal/testintegracionraft1/testintegracionraft1.go*". Funciona ya con el primer test (mediante "*go test -v ./...*"), utilizando el ejecutable "*main.go*" disponible y el código de despliegue "*sshClientWithPUBLICKEYAuthAndRemoteExec.go*". Además, los test de integración presuponen una ubicación determinada del camino de acceso al directorio del modulo de la práctica (línea 34, fichero "" *testintegracionraft1.go*"). Modificarlo para indicar vuestro propio camino de acceso.

Los nombres de directorios, en el camino de acceso a vuestro código Golang, deben seguir el nombrado Unix, es decir, no deben contener el carácter espacio ni otros caracteres que dificulten el acceso a los ficheros fuente para la ejecución de procesos remotos.

4.1. Validación

La mayor parte del desarrollo, se puede trabajar en la máquina local, pero para la validación y valuación final, debe ejecutarse cada servidor en una máquina física diferente, de las que teneis asignadas en el cluster. Comprobar, previamente y con tiempo suficiente, que no hay problemas en ejecución distribuida.

Se plantean las siguientes pruebas a superar y desarrollar test especificos para cada una de ellas :

1. Arranque y parado de un nodo remoto

2. Se ha elegido a un primer líder correcto.

3. Un líder nuevo toma el relevo de uno caido.

4. Se consigue comprometer 3 operaciones seguidas en 3 entradas, con un líder estable y sin fallos en el sistema.

Teneis ejemplos de tests incompletos en el fichero "*internal/raft/integracionraft1.go*".

La tercera y cuarta prueba, en el código de tests previo, deben ser completadas.

Para ejecutar todos los tests del modulo podeis ejecutar "*go test ./...*" en el directorio raiz del modulo. Hay disponibles tambien métodos para ejecutar tests especificos. El comando "go test -v ./..." os permite tener más salida de información de depuración en la ejecución de tests completos de un modulo. VSCodium (VSCode) permite la ejecución interactiva de tests mediante la extensión el lenguaje Golang.

5. Evaluación

La realización de las prácticas es por parejas, pero los dos componentes de la pareja *deberán entregarla de forma individual*. En general, estos son los criterios de evaluación:

- Deben entregarse todos los programas, se valorará de forma negativa que falte algún programa / alguna funcionalidad.
- Los programas no tendrán problemas de compilación, se valorará de forma muy negativa que no compile algún programa.
- Todos los programas deben funcionar correctamente como se especifica en el problema través de la ejecución de la bateria de pruebas.
- Todos los programas tienen que seguir la guía de estilo de codificación de go fmt.
- Se valorará negativamente una inadecuada estructuración de la memoria, así como la inclusión de errores gramáticales u ortográficos.
- La memoria debería incluir diagramas de secuencia para explicar los **protocolos de intercambio de mensajes y los eventos de fallo**.
- **Cada nodo Raft**(servidor) **y el nodo de tests debe ejecutarse en una máquina física diferente del cluster de raspberries, en la prueba de evaluación**.

La superación de las pruebas 1 y 2 supone la obtención de una B en la parte correspondiente a test. Para obtener una calificación de A, se deberá superar la prueba 1, 2 y 3. La superación de los test 1, 2, 3 y 4 supone tener una calificación de A+. Para llevar a cabo esta implementación, podeis basaros en el código disponible en el esqueleto.

5.1. Rúbrica

Con el objetivo de que, tanto los profesores como los estudiantes de esta asignatura por igual, puedan tener unos criterios de evaluación objetivos y justos, se propone la siguiente rúbrica en el Cuadro 1. Los valores de las celdas son los valores mínimos que hay que alcanzar para conseguir la calificación correspondiente y tienen el siguiente significado:

- A+ (excelente). En el caso de software, conoce y utiliza de forma autónoma y correcta las herramientas, instrumentos y aplicativos software necesarios para el desarrollo de la práctica. Plantea *correctamente* el problema a partir del enunciado propuesto e identifica las opciones para su resolución. Aplica el método de resolución adecuado e identifica la corrección de la solución, *sin errores*. En el caso de la memoria, se valorará una estructura y una presentación adecuadas, la corrección del lenguaje así como el contenido explica de forma precisa los conceptos involucrados en la práctica. En el caso del código, este se ajusta exactamente a las guías de estilo propuestas.

- A (bueno). En el caso de software, conoce y utiliza de forma autónoma y correcta las herramientas, instrumentos y aplicativos software necesarios para el desarrollo de la práctica. Plantea *correctamente* el problema a partir del enunciado propuesto e identifica las opciones para su resolución. Aplica el método de resolución adecuado e identifica la corrección de la solución, *con ciertos errores* no graves. Por ejemplo, algunos pequeños casos (marginales) no se contemplan o no funionan correctamente. En el caso del código, este se ajusta *casi* exactamente a las guías de estilo propuestas.

- B (suficiente). En el caso de software, conoce y utiliza de forma autónoma y correcta las herramientas, instrumentos y aplicativos software necesarios para el desarrollo de la práctica. No plantea correctamente el problema a partir del enunciado propuesto y/o no identifica las opciones para su resolución. No aplica el método de resolución adecuado y / o identifica la corrección de la solución, pero *con errores*. En el caso de la memoria, bien la estructura y / o la presentación son mejorables, el lenguaje presenta deficiencias y / o el contenido no explica de forma precisa los conceptos importantes involucrados en la práctica. En el caso del código, este se ajusta a las guías de estilo propuestas, pero es mejorable.

- B- (suficiente, con deficiencias). En el caso de software, conoce y utiliza de forma autónoma y correcta las herramientas, instrumentos y aplicativos software necesarios para el desarrollo de la práctica. No plantea correctamente el problema a partir del enunciado propuesto y/o no identifica las opciones para su resolución. No se aplica el método de resolución adecuado y/o se identifica la corrección de la solución, pero *con errores* de cierta gravedad y/o sin proporcionar una solución completa. En el caso de la memoria, bien la estructura y / o la presentación son

manifiestamente mejorables, el lenguaje presenta *serias* deficiencias y / o el contenido no explica de forma precisa los conceptos importantes involucrados en la práctica. En el caso del código, hay que mejorarlo para que se ajuste a las guías de estilo propuestas.

- C (deficiente). El software no compila o presenta errores graves. La memoria no presenta una estructura coherente y/o el lenguaje utilizado es pobre y/o contiene errores gramaticales y/o ortográficos. En el caso del código, este no se ajusta exactamente a las guías de estilo propuestas.

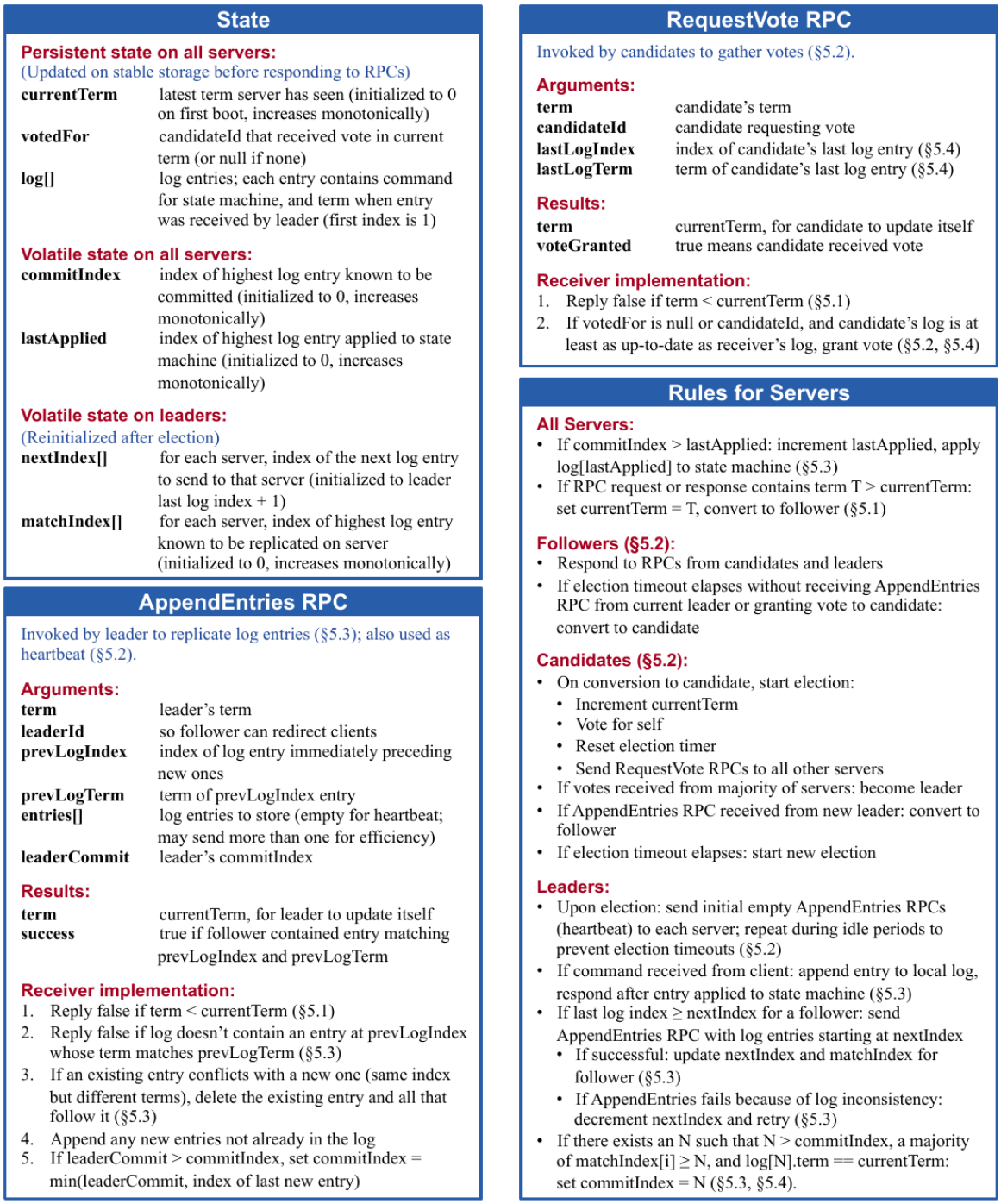
Calificación	Sistema	Tests	Código	Memoria
10	A+	A+ (test 1-4)	A+	A+
9	A+	A+ (test 1-4)	A	A
8	A	A (test 1-3)	A	A
7	A	A (test 1-2)	B	B
6	B	B (test 1-2)	B	B
5	B-	B-(test 1-2)	B-	B-
suspenso	1 C			

Tabla 1: Detalle de la rúbrica: los valores denotan valores mínimos que al menos se deben alcanzar para obtener la calificación correspondiente

6. Entrega y evaluación

Cada alumno debe entregar un solo fichero en formato tar.gz, a través de moodle en la actividad habilitada a tal efecto, **no más tarde del día anterior** a la siguiente sesión de prácticas.

La entrega DEBE contener los diferentes ficheros de código Golang y la memoria (con un máximo de 6 páginas la memoria principal y 10 más para anexos), en formato pdf. El **nombre del fichero tar.gz** debe indicar **apellidos del alumno y nº de práctica**. Aquellos alumnos que no entreguen la práctica no serán calificados. Dentro del programa de evaluación contínua, la evaluación "in situ" de la ejecución de la práctica se realizará durante la 4ª sesión de prácticas correspondiente.



State

Persistent state on all servers:
(Updated on stable storage before responding to RPCs)

currentTerm	latest term server has seen (initialized to 0 on first boot, increases monotonically)
votedFor	candidateId that received vote in current term (or null if none)
log[]	log entries; each entry contains command for state machine, and term when entry was received by leader (first index is 1)

Volatile state on all servers:

commitIndex	index of highest log entry known to be committed (initialized to 0, increases monotonically)
lastApplied	index of highest log entry applied to state machine (initialized to 0, increases monotonically)

Volatile state on leaders:
(Reinitialized after election)

nextIndex[]	for each server, index of the next log entry to send to that server (initialized to leader last log index + 1)
matchIndex[]	for each server, index of highest log entry known to be replicated on server (initialized to 0, increases monotonically)

AppendEntries RPC

Invoked by leader to replicate log entries (§5.3); also used as heartbeat (§5.2).

Arguments:

term	leader's term
leaderId	so follower can redirect clients
prevLogIndex	index of log entry immediately preceding new ones
prevLogTerm	term of prevLogIndex entry
entries[]	log entries to store (empty for heartbeat; may send more than one for efficiency)
leaderCommit	leader's commitIndex

Results:

term	currentTerm, for leader to update itself
success	true if follower contained entry matching prevLogIndex and prevLogTerm

Receiver implementation:

1. Reply false if term < currentTerm (§5.1)
2. Reply false if log doesn't contain an entry at prevLogIndex whose term matches prevLogTerm (§5.3)
3. If an existing entry conflicts with a new one (same index but different terms), delete the existing entry and all that follow it (§5.3)
4. Append any new entries not already in the log
5. If leaderCommit > commitIndex, set commitIndex = min(leaderCommit, index of last new entry)

RequestVote RPC

Invoked by candidates to gather votes (§5.2).

Arguments:

term	candidate's term
candidateId	candidate requesting vote
lastLogIndex	index of candidate's last log entry (§5.4)
lastLogTerm	term of candidate's last log entry (§5.4)

Results:

term	currentTerm, for candidate to update itself
voteGranted	true means candidate received vote

Receiver implementation:

1. Reply false if term < currentTerm (§5.1)
2. If votedFor is null or candidateId, and candidate's log is at least as up-to-date as receiver's log, grant vote (§5.2, §5.4)

Rules for Servers

All Servers:

- If commitIndex > lastApplied: increment lastApplied, apply log[lastApplied] to state machine (§5.3)
- If RPC request or response contains term T > currentTerm: set currentTerm = T, convert to follower (§5.1)

Followers (§5.2):

- Respond to RPCs from candidates and leaders
- If election timeout elapses without receiving AppendEntries RPC from current leader or granting vote to candidate: convert to candidate

Candidates (§5.2):

- On conversion to candidate, start election:
  - Increment currentTerm
  - Vote for self
  - Reset election timer
  - Send RequestVote RPCs to all other servers
- If votes received from majority of servers: become leader
- If AppendEntries RPC received from new leader: convert to follower
- If election timeout elapses: start new election

Leaders:

- Upon election: send initial empty AppendEntries RPCs (heartbeat) to each server; repeat during idle periods to prevent election timeouts (§5.2)
- If command received from client: append entry to local log, respond after entry applied to state machine (§5.3)
- If last log index ≥ nextIndex for a follower: send AppendEntries RPC with log entries starting at nextIndex
  - If successful: update nextIndex and matchIndex for follower (§5.3)
  - If AppendEntries fails because of log inconsistency: decrement nextIndex and retry (§5.3)
- If there exists an N such that N > commitIndex, a majority of matchIndex[i] ≥ N, and log[N].term == currentTerm: set commitIndex = N (§5.3, §5.4).

Figure 2: A condensed summary of the Raft consensus algorithm (excluding membership changes and log compaction). The server behavior in the upper-left box is described as a set of rules that trigger independently and repeatedly. Section numbers such as §5.2 indicate where particular features are discussed. A formal specification [31] describes the algorithm more precisely.