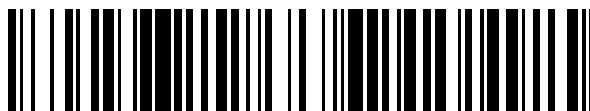


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 770 753**

51 Int. Cl.:

H04W 40/02 (2009.01)
H04W 40/12 (2009.01)
H04W 28/02 (2009.01)
H04L 1/18 (2006.01)
H04L 1/00 (2006.01)
H04L 1/16 (2006.01)
H04L 12/751 (2013.01)
H04B 13/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.10.2016** **PCT/IB2016/056165**

87 Fecha y número de publicación internacional: **20.04.2017** **WO17064661**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.10.2016** **E 16801572 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.11.2019** **EP 3289799**

54 Título: **Método para gestionar de forma adaptativa y conjunta la política de enrutamiento y la política de retransmisión de un nodo en una red subacuática**

30 Prioridad:

16.10.2015 IT UB20155144

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
03.07.2020

73 Titular/es:

WSENSE S.R.L. (100.0%)
Via XX Settembre, 98/E
00187 Rome, IT

72 Inventor/es:

PETRIOLI, CHIARA;
LO PRESTI, FRANCESCO;
DI VALERIO, VALERIO;
SPACCINI, DANIELE y
PICARI, LUIGI

74 Agente/Representante:

SALVÀ FERRER, Joan

ES 2 770 753 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método para gestionar de forma adaptativa y conjunta la política de enrutamiento y la política de retransmisión de un nodo en una red subacuática

Campo de la invención

[0001] La presente invención se refiere al sector de las comunicaciones en redes de sensores subacuáticas, y más específicamente a un procedimiento para la determinación dinámica de la lógica para la retransmisión de los paquetes por los nodos de una red con el fin de optimizar el rendimiento de la propia red.

[0002] El uso de UWSN (redes de sensores inalámbricos subacuáticas (Underwater Wireless Sensor Networks)) ofrece una amplia gama de aplicaciones tales como, entre otras cosas, monitorización ambiental, monitorización de infraestructuras críticas y de plataformas en alta mar, vigilancia de puertos y costas, etc.

[0003] Una red de sensores subacuática (Figura 1) está constituida por un conjunto de nodos, posicionados adecuadamente para cubrir el área de interés y ubicados a varias profundidades, algunos de los cuales pueden ser vehículos autónomos móviles. Cada nodo está equipado con sensores y uno o más aparatos de comunicación. Los nodos recopilan datos del entorno circundante, que, después de una etapa de procesamiento local, se envían a uno o más nodos recolectores de datos o nodos sumidero que almacenan/manejan/transportan los datos en otro lugar basándose en el tipo de aplicación. El intercambio de datos también puede referirse al envío de comandos o información sobre el estado de los dispositivos.

[0004] La creación de una red de comunicación entre nodos requiere la solución de los diversos problemas que caracterizan la comunicación en un entorno subacuático. En primer lugar, dados los límites impuestos por el entorno subacuático al uso de ondas electromagnéticas (que se atenúan notablemente en el agua), la comunicación hasta el día de hoy se ha obtenido típicamente a través de ondas acústicas, lo que implica marcados retrasos de propagación (de él orden de segundos) y una banda de transmisión limitada (unos pocos kilobits por segundo). Además, como lo demuestran ampliamente las múltiples campañas experimentales, existe una considerable heterogeneidad, variabilidad de la calidad y asimetría de los canales de comunicación entre los nodos, con características de transmisión que dependen notablemente de diversas condiciones tales como profundidad, temperatura, salinidad, perfil del lecho marino, condición del viento en la superficie, el ruido producido, por ejemplo, al pasar embarcaciones, etc., condiciones que además están sujetas a variaciones que con frecuencia son imprevisibles en el tiempo, incluso durante periodos cortos.

[0005] En este contexto, teniendo en cuenta sobre todo los aspectos críticos de las aplicaciones de las redes de sensores subacuáticas, uno de los principales desafíos es una comunicación fiable, es decir, la capacidad de garantizar que los paquetes generados por los diversos nodos serán entregados a los nodos sumidero (y esto en un tiempo razonable).

[0006] Una primera solución para aumentar la fiabilidad de las comunicaciones es la técnica de inundación, que aprovecha la naturaleza de difusión inherente a la comunicación acústica: cada paquete se dirige a todos los nodos, y cada nodo que recibe un paquete lo devuelve de nuevo en modo de difusión. Sin embargo, si, por un lado, esta solución maximiza la probabilidad de que los paquetes lleguen al nodo sumidero, el coste, en términos de consumo de energía, aumenta en el tráfico de red con el riesgo correspondiente de colapso de la red a medida que aumenta el número de colisiones, con una marcada reducción del rendimiento y el consiguiente aumento incontrolado de los retardos, lo que hace que esta solución sea insatisfactoria o rara vez practicable.

[0007] Para mantener las ventajas y la simplicidad de las técnicas de inundación, evitando las desventajas de las mismas descritas anteriormente, diversos enfoques adoptan soluciones de inundación limitadas, donde cada nodo envía cada paquete a un conjunto restringido de otros nodos: si cada nodo envía su propio tráfico a solo un nodo, tenemos una sola ruta, es decir, un enrutamiento de ruta única clásico sin redundancia; si uno o más nodos envían su propio tráfico a varios nodos de la red, hay varias rutas de red, y por lo tanto redundancia, y el enrutamiento es un enrutamiento de múltiples rutas.

[0008] En la bibliografía, recientemente se han propuesto las soluciones de enrutamiento adaptativo [BaPe14] [HuFe10] [PIWa14] que introducen modelos analíticos básicos para problemas de enrutamiento dinámico y cuasiestático en redes de comunicación de datos. Los modelos están destinados a manejar las cantidades de interés en forma algorítmica y, como tales, solo requieren un número mínimo de supuestos. Los procedimientos de control y estimación se utilizan para construir algoritmos para la solución del problema de enrutamiento. Sin embargo, estas soluciones presentan límites en términos de rendimiento y prevén un uso mucho más limitado de la adaptabilidad.

[0009] Otra solución para aumentar la fiabilidad de la comunicación consiste en utilizar técnicas de retransmisión. Para cada paquete transmitido, el nodo transmisor pasa a un estado de espera donde espera el acuse de recibo del mismo por parte de los nodos destinatarios. En las redes de sensores subacuáticas, dada la falta de

5 Módulo de enrutamiento

banda de red, existe un uso generalizado de acuses de recibo implícitos: al aprovechar los medios de comunicación de difusión, se considera que un paquete se ha enviado con éxito si un nodo detecta que al menos uno de los nodos a los que se había enviado el paquete lo retransmite. Si, en cambio, no se detecta una copia del paquete, se supone que ninguno de los nodos lo ha recibido, y el paquete se retransmite después de un periodo de retroceso.

5 [0010] Un paquete se retransmite un cierto número de veces, después de lo cual se rechaza. En este caso, el número máximo de retransmisiones desempeña un papel importante: un valor muy alto de retransmisiones aumenta la probabilidad de entrega, pero al mismo tiempo aumenta la latencia de la red, el consumo de energía y, a su vez, aumenta el tráfico de la red.

10 [0011] La patente US2012/192026 A1 no propone una estrategia de enrutamiento, sino solo una técnica de retransmisión de los paquetes. La patente US2004/071082, por otro lado, se refiere a un protocolo de enrutamiento que es exclusivamente de tipo ruta única, y no ofrece ningún dinamismo a medida que el número de retransmisiones de un paquete varía. De nuevo, el documento WO 2015/012970 describe la transmisión de datos desde cada nodo subacuático de una red a otros nodos subacuáticos según un esquema de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA).

[0012] La idea de la invención subyacente de la presente invención consiste en combinar la política de elección de los nodos de retransmisión (función de enrutamiento) con la política de retransmisión para optimizar el rendimiento desde el punto de vista de la fiabilidad de las transmisiones, de la latencia de la red, y del consumo de energía. La elección se realiza de forma dinámica y adaptativa, aplicando un algoritmo ejecutado por cada nodo (y por lo tanto distribuido), que permite a los nodos aprender y seleccionar dinámicamente el mejor número y conjunto de vecinos a los que transmitir cada paquete y el número máximo de veces que se retransmite cada paquete.

[0013] La optimización se realiza localmente por cada nodo basándose en la información local intercambiada y permite la definición del modo operativo del nodo. Los diferentes nodos pueden comportarse de diferentes maneras (es decir, parte de la red puede seguir un protocolo de ruta única, mientras que otra área de la red usa un protocolo de ruta múltiple, o incluso un protocolo de inundación). Por lo tanto, la propuesta según la presente invención difiere de la técnica anterior porque la presente estrategia de retransmisión no prevé un intercambio explícito de retroalimentación entre los nodos de la red.

[0014] En efecto, la presente invención permite la definición de un procedimiento que introduce la lógica local de un "meta-protocolo" de entrecruzamiento, permitiendo que la red funcione a tiempo según diferentes protocolos, y diferentes partes de la red funcionen según diferentes lógicas de protocolo, siendo esta una característica esencial para optimizar el rendimiento, y estando totalmente ausente en las soluciones de la técnica anterior.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

Resumen

40 [0015] *En el campo de las redes de sensores subacuáticas, la presente invención consiste en combinar la política de elección de los nodos de retransmisión (es decir, de los nodos a los que transmitir el paquete para enrutarlo hacia el nodo sumidero) con la política de retransmisión para obtener el mejor rendimiento desde el punto de vista de la fiabilidad de las transmisiones, la latencia de la red, y el consumo de energía (y/o una combinación de los mismos). En particular:*

45 - se propone un procedimiento para la determinación dinámica del modo de transmisión y de los nodos a los que se reenviarán los paquetes según el número de retransmisiones de ese paquete ya realizadas;
 - el procedimiento está completamente descentralizado: cada nodo determina de manera autónoma el conjunto de nodos para el reenvío según el número de transmisiones ya realizadas;
 50 - el procedimiento es idéntico para todos los nodos;
 - el procedimiento es dinámico: a medida que varían las condiciones de la red, utilizando un algoritmo de autoaprendizaje (que a su vez está descentralizado), cada nodo puede modificar su propia política en términos de número e identidad de los nodos elegidos como destinatarios y/o el número de retransmisiones a intentar para un paquete dado.

55 [0016] Aunque el procedimiento es distribuido e idéntico para cada nodo, se basa en el aprendizaje de las condiciones de la red basándose en el intercambio de información local entre nodos vecinos (donde "nodos vecinos" significan nodos que tienen la capacidad de recibir correctamente las transmisiones realizadas entre sí), lo que lleva a la red a optimizar su rendimiento general, aprovechando la posibilidad de permitir que los nodos del sistema funcionen de manera diferente (diferente número de retransmisiones elegidas para cada transmisión, diferente número de retransmisiones utilizadas por los nodos).

[0017] Otras características de la invención surgirán claramente de la siguiente descripción con referencia a las placas de dibujos adjuntas, en las que:

La Figura 1 es una ilustración esquemática de una red subacuática estándar;

la Figura 2 es un esquema de la pila de protocolos OSI;

la Figura 3 muestra el flujo de ejecución de la subcapa LLC;

la Figura 4 muestra en detalle el módulo para el aprendizaje y la elección de los nodos del siguiente salto;

5 la Figura 5 muestra la PDR (es decir, la relación de entrega de paquetes, que es la relación entre la cantidad de paquetes recibidos correctamente por el nodo sumidero y la cantidad de paquetes generados por los nodos) en función del tráfico de red, configurando, en comparación, el protocolo CARMA según la invención con los protocolos conocidos QELAR y EFlood;

10 la Figura 6 muestra los diferentes gráficos de la energía consumida por la red para la entrega correcta de un bit de datos al nodo sumidero, en función de la carga de la red, en los tres protocolos de referencia de la Figura 5;

la Figura 7 compara la latencia media definida como el tiempo entre la generación de los paquetes y el tiempo de su entrega correcta al nodo sumidero en los tres protocolos diferentes de las Figuras 5 y 6; y

la Figura 8 muestra la energía utilizada por los nodos de la red para la entrega exitosa de un bit de información en el caso de tráfico bajo y alto.

15 **[0018]** La invención se define por las reivindicaciones adjuntas. Las realizaciones que no están completamente dentro del alcance de las reivindicaciones se tratarán como ejemplos útiles para comprender la invención.

Descripción detallada de la invención

20 **[0019]** Con referencia a las figuras, se considera una red de sensores subacuática como la de la Figura 1, compuesta por una pluralidad de nodos posicionados apropiadamente para cubrir el área de interés. Independientemente de si el nodo es fijo o está representado por un vehículo móvil, cada nodo está equipado con sensores y uno o más aparatos de comunicación. Los nodos recopilan datos del entorno circundante, que, después
25 del procesamiento local, se envían a uno o más nodos sumidero, que almacenan/manejan/transportan los datos en otro lugar según el tipo de aplicación.

[0020] La presente invención es una solución de capa cruzada que integra la capa de red (enrutamiento) con la subcapa LLC (control de enlace lógico (Logical Link Control)) de la capa de enlace de datos.

30 **[0021]** El procedimiento propuesto consiste en determinar de forma autónoma, nodo por nodo, para cada paquete que se va a transmitir/retransmitir (lógica LLC), a qué subconjunto de nodos se va a transmitir (lógica de enrutamiento) y el número máximo de retransmisiones a realizar.

35 **[0022]** Para este propósito, para cada nodo, se proporciona un módulo, que rige la política de transmisión y retransmisión de la capa LLC (subcapa superior de la capa de enlace de datos del modelo ISO-OSI), así como un módulo de enrutamiento, que, utilizando un algoritmo de autoaprendizaje basado en Q-learning, determina, para cada paquete, también según el número de veces que ya se ha transmitido, el conjunto óptimo de los nodos a los que se reenviará este paquete, como se describirá en detalle a continuación.

Subcapa LLC (control de enlace lógico)

40 **[0023]** La subcapa LLC rige la lógica de retransmisión de un nodo que se ilustra en la Figura 2. Cuando un nodo tiene que enviar un paquete (o reenviar un paquete, en el caso de retransmisión), interactúa con el módulo de enrutamiento (flechas A y B) para identificar los nodos a los que se enviará el paquete. Para este fin, la subcapa LLC envía al módulo de enrutamiento el número de veces que el paquete ya se ha transmitido (sin éxito) y recibe de este último el conjunto de nodos a los que se debe enviar el paquete (un conjunto que en general será también una función del número de retransmisiones de ese paquete).

50 **[0024]** El cálculo del conjunto de nodos podría realizarse periódicamente en lugar de hacerlo periódicamente. Sin embargo, la solución propuesta es preferible dados los tiempos frecuentemente muy largos entre sucesivas retransmisiones.

55 **[0025]** Después de que se ha enviado un paquete y se ha iniciado un temporizador, el nodo pasa a un estado de espera donde espera un acuse de recibo implícito usando la técnica de escucha: se considera que el paquete se ha enviado con éxito si al menos uno de los nodos a los que se había enviado el paquete lo retransmite; si, en cambio, no se detecta la transmisión de una copia del paquete, se supone que ninguno de los nodos ha recibido el paquete. En el primer caso, se transmite el siguiente paquete. En el último caso, el paquete se retransmite después de un periodo de espera denominado retroceso.

60 **[0026]** [Cada paquete es transmitido por cada nodo como máximo un número K de veces, después de lo cual el paquete es rechazado. El parámetro K se establece dinámicamente según la estimación de la intensidad del tráfico de red como se describe en lo sucesivo en el presente documento.

[0027] El módulo de enrutamiento rige la lógica de enrutamiento, determinando, para cada paquete, también según el número de veces que ya se ha transmitido, el conjunto óptimo de los nodos a los que se debe (re)enviar.

5 **[0028]** La solución propuesta se basa en una técnica de aprendizaje de refuerzo matemático general conocida como Q-learning [SuBa98]. El procedimiento Q-learning se basa en las funciones Q (valores Q), que representan la estimación del coste asociado a cada posible acción para cada posible estado del sistema. Iterativamente, el algoritmo actualiza las diversas estimaciones y, en base a ellas, indica como acción a ejecutar la acción de coste mínimo.

10 **[0029]** El algoritmo específico utilizado por el módulo de enrutamiento se describe en lo sucesivo en el presente documento continuación y se representa en la Figura 4. En cada nodo, el estado de un paquete s se representa por el número de veces que se ha transmitido (si s = 0, el paquete aún no se ha transmitido, si s = 1, el paquete ya se ha transmitido una vez, etc.), mientras que las posibles acciones a son los distintos subconjuntos de nodos a los que se puede enviar el paquete (si a = {j} el paquete se envía solo al nodo j, si a = {j₁, j₂} el paquete se envía a j₁ y j₂, por lo
15 que = {j₁, j₂, ..., j_n}, el paquete se envía a los nodos j₁, j₂, ..., j_n, etc.).

[0030] Para cada par estado/acción (s,a), es decir, el par formado por el número de retransmisiones y el conjunto de posibles destinatarios, el módulo de enrutamiento de cada nodo i estima la función Q Q_i(s,a), es decir, el coste asociado a la ejecución de la acción a cuando está en el estado s, es decir, el coste de enviar un paquete que
20 ya se ha transmitido s veces a los nodos en el conjunto a (líneas 2-7).

```

1 function Learning( state k)
2   # Updating of estimates
3   for s=0,...,K-1
4     for all a ∈ Ai(s)
5       Qi(s, a) = ĉi(s, a) + γ ∑s' ∈ {0,...,K-1, drop, etc.} P̂i,s,s'a · mina' ∈ Ai(s') Qi(s', a')
6     end for
7   end for
8   # Choice of subsequent nodes
9   a = arg mina ∈ Ai(k)} Qi(k, a)
10  return a
11 end function

```

Pseudocódigo del algoritmo de aprendizaje

25 **[0031]** Una vez que se han actualizado las diversas estimaciones, la elección de los nodos destinatarios recae en el conjunto a al que se asocia el mejor coste (línea 9).

[0032] Las probabilidades P̂_{i,s,s}^a para el cálculo de los valores Q(s, a) (línea 5) se obtienen a partir de las
30 probabilidades P_{i,j} de un paquete enviado por el nodo i recibéndose correctamente el nodo i por el nodo j, como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned}
 \hat{P}_{i,s,s+1}^a &= \prod_{j \in a} (1 - P_{i,j} P_{j,i}) \\
 \hat{P}_{i,s,rov}^a &= 1 - \prod_{j \in a} (1 - P_{i,j} P_{j,i}) \\
 \hat{P}_{i,s,drop}^a &= 1 - \prod_{j \in a} (1 - P_{i,j} P_{j,i})
 \end{aligned}$$

35

[0033] El núcleo del funcionamiento de la técnica de aprendizaje es la especificación de la función de coste

asociada a los diversos pares estado/acción, que en efecto, determina la lógica de selección del conjunto de las retransmisiones.

[0034] En la solución propuesta aquí, la función de coste $c_i(s, a)$ asociada a cada acción se define a 5 continuación

$$c_i(s, a) = \begin{cases} w_e e_i(s, a) + n_i(s, a) & s < K - 1 \\ w_e e_i(s, a) + w_l l_i(s, a) + n_i(s, a) & s = K - 1 \end{cases}$$

donde $e_i(s, a)$ es igual al coste de transmisión de un paquete al conjunto de nodos que corresponde a la acción, $n_i(s, a)$ es el coste de los nodos aguas abajo para entregar el paquete al destino (calculado basándose en la información 10 intercambiada con los vecinos), $l_i(s, a)$ es el coste asociado a la posible pérdida del paquete cuando se rechaza después de que se ha alcanzado el número máximo de retransmisiones, w_e y w_l , donde $w_e + w_l = 1$, son ponderaciones, seleccionadas basándose en los requisitos de aplicación.

[0035] La expresión para el coste de los nodos aguas abajo es 15

$$n_i(s, a) = \sum_{j \in a} c_{j,i,j}^P$$

donde c_j es igual al coste para que el nodo j transmita el paquete al destino, es decir,

$$c_j = \min_{a \in A_1(0)} Q_i(0, a) \quad 20$$

difundiéndose este valor periódicamente por los nodos, mientras que la expresión para $l_i(s, a)$ es

$$l_i(s, a) = L \prod_{j \in a} (1 - P_{i,j}) \quad 25$$

donde L es una penalización asociada a la pérdida del paquete cuando se rechaza después de que se ha alcanzado el número máximo de retransmisiones, y el producto es la probabilidad de que el paquete se haya perdido.

Detalles

Estimación de la calidad del enlace

[0036] Cada nodo controla el número n_{ij} de los paquetes recibidos correctamente de los nodos vecinos. Este cálculo se realiza en todos los paquetes, independientemente de si el nodo es destinatario o no del paquete único. 35 Una vez que el nodo j ha recibido correctamente un paquete enviado por el nodo i , determina a partir del número de serie del paquete el número de paquetes n_i enviados por el nodo y estima a partir del mismo la calidad del enlace como:

$$\hat{P}_{i,j} = \frac{n_{i,j}}{n_i} \quad 40$$

donde la calidad del enlace P_{ij} representa la probabilidad de que un paquete enviado por el nodo i sea recibido correctamente por el nodo j . Para tener estimaciones que tengan en cuenta el marcado dinamismo del canal subacuático, los valores n_i y n_{ij} se calculan con respecto a una ventana de tiempo móvil de dimensiones apropiadas.

Ajuste dinámico del número máximo de retransmisiones K

[0037] El K es un parámetro fundamental del protocolo. Un valor bajo contribuye a limitar el tráfico de red, pero puede conducir a una baja probabilidad de éxito de las transmisiones. En cambio, un valor alto de K aumenta la probabilidad de que se reciba un paquete, pero a costa de un aumento en el tráfico de red: un valor adecuado de K 50 con poco tráfico puede conducir fácilmente a condiciones de sobrecarga de la red en condiciones de tráfico sostenido, lo que lleva a la caída de la red. En la solución propuesta, el parámetro K se establece dinámicamente de tal manera que el número medio de transmisiones G , realizadas durante una ventana de tiempo cuya longitud es igual al tiempo necesario para enviar un paquete, es igual a 0,5 (la idea es aproximar el comportamiento de la capa 2 de la red como una red ALOHA de difusión no distribuida para la cual se sabe que el pico de capacidad de transmisión de la red se

obtiene en $G = 0,5$).

Usando la siguiente aproximación para la carga máxima de red

$$G = t_{col} \square K$$

5 donde t_{col} es el tiempo de colisión, es decir, la suma del tiempo de transmisión de un paquete y el tiempo máximo de propagación de la red (un valor que puede estimarse basándose en el tamaño de la propia red), y λ representa el tráfico en la red, un valor que cada nodo puede estimar dinámicamente basándose en el tráfico observado localmente, para el número máximo de retransmisiones se obtiene la siguiente fórmula:

$$K = \left\lceil \frac{0.5}{t_{col} \lambda} \right\rceil$$

10 donde la notación $\lceil x \rceil$ designa el número entero más pequeño mayor que x .

EXTENSIÓN PARA LA SELECCIÓN DINÁMICA DEL DISPOSITIVO DE COMUNICACIÓN

15 **[0038]** Por ahora es de conocimiento común que la eficiencia de una red de comunicación subacuática puede aumentarse utilizando dispositivos de comunicación heterogéneos simultáneamente, que pueden diferir en cuanto a velocidad de bits, frecuencia operativa, rango de transmisión, fiabilidad en la comunicación, etc. Esto permite una mayor adaptabilidad a las condiciones cambiantes del entorno subacuático y a diferentes tipos de redes. En este contexto, la presente invención puede extenderse fácilmente para seleccionar, de forma autónoma, nodo por nodo, además del subconjunto de los nodos a los que enviar el paquete, también el aparato de comunicación específico que se utilizará entre los múltiples que pueden estar disponibles. Para ello, es necesario cambiar el modelo analizado anteriormente de la siguiente manera.

25 **[0039]** Las acciones posibles a especifican no solo los diferentes subconjuntos de nodos a los que se puede enviar el paquete, sino también el aparato de comunicación que se utilizará entre los múltiples que pueden estar disponibles (si $a = \{m_1, [j]\}$ el paquete se envía solo al nodo j usando el aparato m_1 , si $a = \{m_2, [j_1, j_2]\}$ el paquete se envía a j_1 y j_2 usando el aparato m_2 , si $a = \{m_1, [j_1, j_2, \dots, j_n]\}$ el paquete se envía a los nodos $j_1, j_2, \dots, j_n$ usando el aparato m_1 , etc.).

30 **[0040]** El coste de transmisión de un paquete $e_i^m(s, a)$ tiene en cuenta también el dispositivo de comunicación específico m elegido para transmitir el paquete, dado que también están asociados a diferentes dispositivos, por ejemplo, diferentes niveles de consumo de energía o capacidad de transmisión.

35 **[0041]** La probabilidad de que un paquete enviado por el nodo i sea recibido correctamente por el nodo j se define como $P_{i,j}^m$, ya que depende del dispositivo particular m utilizado. Se calcula de la siguiente manera: el nodo j , una vez que ha recibido correctamente un paquete enviado por el nodo i utilizando el aparato m , determina, a partir del número de serie del paquete, el número de paquetes n_i^m enviado por el nodo utilizando dicho aparato y utiliza como estimación de la calidad del enlace correspondiente a m la relación

40
$$\hat{P}_{i,j}^m = \frac{n_{i,j}^m}{n_i^m}$$

donde $n_{i,j}^m$ es el número de paquetes enviados por el nodo i con el dispositivo m y recibidos correctamente por j .

RESULTADOS EXPERIMENTALES

45 **[0042]** Para destacar las ventajas de la invención, se ilustran en lo sucesivo en el presente documento los resultados experimentales obtenidos mediante simulación. El rendimiento de CARMA se comparó con el rendimiento de QELAR [HuFe10], un protocolo basado en el aprendizaje por refuerzo que busca obtener un consumo de energía homogéneo entre los nodos, pero que no considera la trayectoria múltiple, y EFlood [BaPe14], una versión mejorada del protocolo de inundación, diseñado explícitamente para reducir colisiones y aumentar la robustez del protocolo. El entorno subacuático simulado corresponde a una parte del fiordo noruego frente a las costas de Trondheim. Toda la información necesaria para la simulación del ambiente subacuático se obtuvo de la Base de datos oceánicos mundiales (http://www.nodc.noaa.gov/0C5IWOA05lpr_woa05.html), la Carta general batimétrica de los océanos (GEBCO)

(<http://www.gebco.net>), y la base de datos del Centro de datos geofísicos nacional Deck41 (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/geology/deck41.html>).

[0043] En los experimentos, se consideró una red estática de 40 nodos (39 nodos más el nodo sumidero) posicionados aleatoriamente sobre una región de 4 km × 1 km y a diferentes profundidades, que variaban entre 10 y 240 m. El tráfico de red se generó según un proceso de Poisson de paquetes de parámetros λ por segundo, donde λ asumió valores en el conjunto {0,01, 0,02, 0,04, 0,0666, 0,1}. Además, se consideraron tres tamaños de paquetes diferentes, concretamente, 50 B, 500 B y 1000 B.

10 **[0044]** El rendimiento de los protocolos se evaluó utilizando las siguientes métricas de rendimiento:

- relación de entrega de paquetes (PDR), concretamente, la relación de paquetes entregados al nodo sumidero, definida como la fracción entre los paquetes recibidos correctamente por el nodo sumidero y todos los paquetes generados por los nodos;
- 15 • latencia de extremo a extremo, definida como el tiempo que transcurre entre la generación del paquete y su recepción correcta en el nodo sumidero; y
- energía por bit, definida como la energía consumida en la red para la entrega de un bit de datos al nodo sumidero.

Resultados de las simulaciones

20 **[0045]** Las Figuras 5, 6 y 7 muestran el rendimiento de los tres protocolos en el escenario de simulación descrito. Los resultados se refieren a un tamaño del paquete de 1000 B, que corresponde al mejor rendimiento para los tres protocolos considerados (el rendimiento para los otros tamaños de paquete se resume en la Tabla 1). Para obtener una comparación en las mismas condiciones entre los protocolos, los parámetros característicos de QELAR y de EFlood se ajustaron a los valores óptimos sugeridos por los respectivos autores.

Métrica	50 Bytes						500 Bytes					
	λ 0,02			λ 0,1			λ 0,02			λ 0,1		
	CARMA	QELAR	EFlood	CARMA	QELAR	EFlood	CARMA	QELAR	EFlood	CARMA	QELAR	EFlood
Relación de entrega de paquetes (%)	99	64	85	58	40	49	99	98	73	77	20	32
Latencia de extremo a extremo (s)	3,77	198,8	39,21	14,85	1360,0	423,8	656	9,58	21,23	14,68	64,0	27,68
Energía por bit U/b)	0,029	0,129	0,145	0,032	0,187	0,109	0,016	0,016	0,109	0,021	0,128	0,089
Sobrecarga por bit	2,48	6,44	0,23	3,67	10,15	0,18	0,17	0,055	0,160	0,29	1,12	0,132

Tabla 1 - Resultados de simulación para diferentes tráficos de red y tamaños de paquete.

[0046] Relación de entrega de paquetes. La PDR que se midió para cada protocolo aparece en la Figura 5. Los resultados son consistentes con las expectativas. En particular, la PDR disminuye a medida que aumenta el tráfico de red, ya que aumentan las colisiones entre los paquetes y la probabilidad de encontrar el canal ocupado. En cualquier caso, CARMA muestra el mejor rendimiento: su PDR desciende del 100 % al 85 % solo cuando el tráfico de red es muy alto.

35 **[0047]** El rendimiento de CARMA depende básicamente de tres factores: 1) el protocolo minimiza el número total de transmisiones necesarias para transmitir un paquete desde la fuente al sumidero, y en consecuencia, es capaz de identificar las rutas con la mayor probabilidad de entregar el paquete al destino; 2) el reenvío de los paquetes en ruta múltiple a medida que aumentan las retransmisiones, aumenta la robustez del protocolo; 3) el número máximo de retransmisiones K se calcula dinámicamente basándose en el tráfico, reduciendo así el número de retransmisiones cuando el tráfico es mayor y, en consecuencia, reduciendo las colisiones entre los paquetes. Entre todos los protocolos, EFlood muestra el peor rendimiento debido a la gran cantidad de transmisiones, que, sobre todo a medida que aumenta la carga, da como resultado una gran cantidad de colisiones. Por otro lado, QELAR muestra un buen rendimiento siempre que el tráfico en la red sea bajo, pero su PDR decae rápidamente cuando aumenta el tráfico. Esto se debe a que no tiene un control dinámico sobre el número de retransmisiones y porque estima con menos precisión que CARMA la calidad de los enlaces de comunicación. Con cargas altas, la dificultad de escuchar los paquetes, que es el mecanismo principal utilizado por QELAR para estimar la calidad del enlace, da como resultado una estimación lejos de ser precisa y, en consecuencia, decisiones de enrutamiento no óptimas.

[0048] Energía por bit. La Figura 6 muestra el consumo de energía para la entrega de un bit de datos al sumidero. EFlood es el protocolo que más consume para la entrega de un bit, sobre todo en condiciones de poco tráfico. Debe recordarse que EFlood es un protocolo basado en inundaciones y, por lo tanto, por su propia naturaleza, se caracteriza por una gran cantidad de transmisiones y el alto consumo de energía correspondiente.

CARMA y QELAR muestran un buen rendimiento a bajas intensidades de tráfico, siendo capaz CARMA de reducir considerablemente el consumo en el caso de paquetes de menor tamaño (Tabla 1). Sin embargo, a medida que aumenta el nivel de tráfico, el rendimiento del QELAR decae como resultado del mayor número de retransmisiones y

del menor número de bits de datos entregados correctamente al sumidero.

[0049] La Figura 8 muestra cómo la energía por bit varía entre los nodos de la red, considerando dos escenarios correspondientes a un nivel de carga bajo y alto. La eficiencia energética es muy uniforme en CARMA, mientras que presenta una mayor variabilidad en los otros dos protocolos.

[0050] Latencia de extremo a extremo. La Figura 7 muestra la latencia media para la entrega de los paquetes al nodo sumidero. Como puede esperarse, a medida que aumenta el nivel de tráfico, también aumenta el tiempo necesario para la entrega de un paquete. CARMA entrega los paquetes en el menor tiempo posible en todos los escenarios considerados. Al reducir la cantidad de retransmisiones necesarias para la entrega de un paquete, CARMA actúa eficazmente sobre la latencia. EFlood presenta, en cambio, latencias más largas, que dependen del retraso introducido para desincronizar los nodos de transmisión, pero que siguen siendo similares independientemente del tráfico de la red. En EFlood, cada paquete se transmite exactamente una sola vez por cada nodo (no hay retransmisiones), lo que limita la latencia pero a expensas de una PDR inferior. QELAR presenta una latencia comparable a la de CARMA a niveles de tráfico bajos, excepto que después aumenta significativamente a medida que aumenta el nivel de tráfico. Esto se debe a que el protocolo QELAR se caracteriza por una alta velocidad de retransmisión (más del 150 % de la velocidad cuando el tráfico es bajo) junto con la dificultad de recibir los acuses de recibo implícitos, lo que pone en peligro la capacidad de enrutar los paquetes correctamente.

[0051] Una realización preferida del procedimiento que forma el objeto de la invención se ha descrito en el presente documento. Sin embargo, es evidente que el experto en el sector puede realizar numerosas modificaciones y variaciones, sin apartarse así de la esfera de protección de la invención como se define en las reivindicaciones adjuntas.

25 REFERENCIAS

[0052]

[SuBa98] R. S. Sutton and A. G. Barto, *Reinforcement Learning: An Introduction*. Cambridge Univ. Press, 1998.

[BaPe14] S. Basagni, C. Petrioli, R. Petrocchia and D. Spaccini. "CARP: A Channel-aware Routing Protocol for Underwater Acoustic Wireless Networks", in press, *Elsevier Ad Hoc Networks and Physical Communication*. 2014.

[HuFe10] T. Hu and Y. Fei, "QELAR: A Machine Learning Based Adaptive Routing Protocol for Energy Efficient and Lifetime Extended Underwater Sensor Networks", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 9, N. 6, pp.796-808, June 2010.

[PIWa14] R. Plate, C. Wakayama, "Utilizing kinematics and selective sweeping in reinforcement learning based routing algorithms for underwater networks", in press, *Elsevier Ad Hoc Networks and Physical Communication*. 2014.

[US2026] US 2012/192026 A1 (CHEN REN-JR [TW] ET AL) 26 July 2012

[US1082] US 2004/071082 A1 (BASU ANINDYA [US] ET AL) 15 April 2004

REIVINDICACIONES

1. *Un procedimiento para seleccionar, en una red de sensores de comunicación subacuática compuesta por una pluralidad de nodos, estando cada nodo equipado con sensores y uno o más aparatos de comunicación, en*
5 *cada transmisión/retransmisión de un paquete, un conjunto de los nodos a los que se enviará dicho paquete, donde cada nodo está equipado con un módulo que rige la política de transmisión/retransmisión de una capa de control de enlace lógico LLC y un módulo de enrutamiento, y en el que,*
para cada nodo, un módulo de control de enlace lógico funciona según las etapas permitidas:
- 10 *cuando un nodo tiene que enviar, o reenviar en el caso de una retransmisión, un paquete, dicha capa LLC interactúa con el módulo de enrutamiento del nodo para identificar los nodos a los que se enviará el paquete: para este propósito, la capa LLC envía a la capa de red el número de veces que el paquete ya se ha transmitido sin éxito y recibe de la última el conjunto de nodos a los que se enviará el paquete, un conjunto que va en función del*
15 *número de retransmisiones del paquete;*
después de que el nodo haya enviado un paquete y activado un temporizador, espera un acuse de recibo implícito utilizando la técnica de escucha por la cual se considera que el paquete se ha enviado con éxito si al menos uno de los nodos a los que lo envió lo retransmite, el nodo pasa entonces a la transmisión del siguiente paquete; si, en cambio, no se detecta una copia del paquete, se supone que ninguno de los nodos lo ha recibido, y el paquete se retransmite después de un periodo de retroceso;
20 *siendo cada paquete transmitido como máximo un número K de veces, después de lo cual se rechaza el paquete, siendo dicho parámetro K establecido dinámicamente en función de la carga estimada;*
mientras,
el módulo de enrutamiento, utilizando un algoritmo de autoaprendizaje, determina, para cada paquete, de forma autónoma, teniendo en cuenta el número de veces que este paquete ya se ha transmitido sin éxito, el conjunto de
25 *nodos a los que se reenviará este paquete.*
2. *El procedimiento según la reivindicación anterior, **caracterizado porque**, a medida que varían las condiciones de la red, utilizando dicho algoritmo descentralizado de autoaprendizaje, cada nodo puede modificar su propia política en términos de número e identidad de los nodos elegidos como destinatarios y/o número de*
30 *retransmisiones que se intentarán para un paquete.*
3. *El procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** dicho algoritmo es idéntico para todos los nodos y se basa en Q-learning.*
- 35 4. *El procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque**, en dicho algoritmo de autoaprendizaje, en cada nodo i, el estado de un paquete s se representa por el número de veces que el paquete se ha transmitido, donde s = 0 si el paquete aún no se ha transmitido, s = 1 si el paquete ya se ha transmitido una vez, etc., mientras que las posibles acciones a son los diferentes subconjuntos de nodos a los que se puede enviar el paquete:*
40 *a = {j}: el paquete se envía solo al nodo j,*
a = {j₁, j₂} el paquete se envía a los nodos j₁ y j₂,
a = {j₁, j₂, ..., j_n} el paquete se envía a los nodos j₁, j₂, ..., j_n, etc.;
- 45 **y porque**
para cada estado, el algoritmo de autoaprendizaje controla el conjunto de variables Q_i(s, a) para cada valor de s y a, representando Q_i(s, a) la estimación local del módulo de enrutamiento con respecto al coste asociado a la ejecución de la acción a cuando el nodo i está en el estado s, es decir, el coste total asociado al envío a los nodos en el conjunto a de un paquete que ya se ha transmitido s veces.
50
5. *El procedimiento según la reivindicación anterior, **caracterizado porque** el algoritmo prevé que, cada vez que el nodo tiene que enviar un paquete, realiza las dos etapas siguientes: en la primera etapa, actualiza las estimaciones Q_i(s, a); y en la segunda etapa, elige, basándose en los valores de estas estimaciones, el conjunto de nodos a los que enviar el paquete.*
55
6. *El procedimiento según la reivindicación anterior, **caracterizado porque**, en la etapa de actualización, calcula el nuevo valor de Q_i(s, a) como la suma de: el coste total asociado a la transmisión actual a los nodos en el conjunto a de un paquete que ya ha sido transmitido s veces; y el coste promedio, descontado por un factor gamma comprendido entre 0 y 1, del coste de las posibles retransmisiones adicionales de ese paquete,*
60 *donde*
el coste total asociado a la transmisión actual a los nodos del conjunto a de un paquete que ya ha sido transmitido s veces es igual a la suma de los siguientes tres términos:
i. el coste de transmisión de un paquete al conjunto de nodos asociados a la acción a;
65 *ii. el coste empleado por los nodos del conjunto a para entregar el paquete al destino, siendo dicho coste definido*

como la suma de los costes de transmisión de cada nodo j perteneciente al conjunto a , cada uno ponderado con la probabilidad de que el paquete enviado por el nodo i llegue al nodo j ; y
 iii. el coste asociado a la posible pérdida del paquete cuando este se rechaza después de que se haya alcanzado el número máximo de retransmisiones, definida por el producto de una constante L que representa la penalización asociada a la pérdida del paquete y la probabilidad de que el paquete no se reciba por ninguno de los nodos destinatarios,

donde, en la suma, los términos i y iii están ponderados con ponderaciones no negativas, cuya suma total es igual a 1, basándose en los requisitos de aplicación; y

además, si el número de retransmisiones s es menor que el valor máximo de retransmisiones K , el término iii no se considera en la medida en que el paquete aún no se considera perdido.

7. El procedimiento según la reivindicación anterior, **caracterizado porque**:

Una vez que se han actualizado las diversas estimaciones, la elección de los nodos destinatarios recae en el conjunto a al que se asocia el mejor coste, es decir, el valor más bajo.

8. El procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado porque**:

cada nodo calcula y almacena el número de paquetes recibidos correctamente desde los nodos vecinos, siendo dicho cálculo realizado en todos los paquetes, independientemente de si el nodo es un destinatario o no de los paquetes; y

una vez que el nodo j ha recibido correctamente un paquete enviado por el nodo i , determina, a partir del número de serie del paquete, el número de paquetes n_i enviados por el nodo i y utiliza como estimación de la calidad del enlace la relación entre los paquetes recibidos y los paquetes enviados, calculada con respecto a una ventana de tiempo móvil de dimensiones apropiadas, con el fin de tener estimaciones que tengan en cuenta el marcado dinamismo del canal subacuático.

9. El procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque**:

el número máximo de retransmisiones K es igual al número entero más pequeño mayor que la relación entre el número 0,5 y el producto entre el tiempo de colisión, es decir, la suma del tiempo de transmisión de un paquete y del tiempo máximo de propagación de red, un valor que se puede estimar basándose en el tamaño de la propia red, y el tráfico de red, que es un valor que cada nodo puede estimar dinámicamente basándose en el tráfico observado localmente.

10. El procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** prevé

además determinar de forma autónoma, nodo por nodo, el aparato de comunicación específico a utilizar entre los múltiples que pueden estar disponibles.

11. El procedimiento según la reivindicación 10 y la reivindicación 4, **caracterizado porque** además en

dicho algoritmo de autoaprendizaje, en cada nodo i , el estado de un paquete s se representa por el número de veces que el paquete se ha transmitido, donde $s = 0$ si el paquete aún no se ha transmitido, $s = 1$ si el paquete ya se ha transmitido una vez, etc., mientras que las posibles acciones a especifican el aparato de comunicación a utilizar y los diferentes subconjuntos de nodos a a los que se puede enviar el paquete:

$a = \{m_1, [j]\}$ si el paquete se envía solo al nodo j usando el aparato m_1 ;

$a = \{m_2, [j_1, j_2]\}$ si el paquete se envía a j_1 y j_2 usando el aparato m_2 ,

$a = \{m_1, [j_1, j_2, \dots, j_n]\}$ si el paquete se envía a los nodos $j_1, j_2, \dots, j_n$ usando el aparato m_1 , etc.

12. El procedimiento según la reivindicación 10 y la reivindicación 6, **caracterizado porque** además el coste

total asociado a la transmisión actual, a los nodos del conjunto a , de un paquete que ya ha sido transmitido s veces es igual a la suma de los siguientes tres términos:

i. el coste de transmisión de un paquete usando el aparato de comunicación especificado por la acción a ;

ii. el coste utilizado por los nodos del conjunto a para entregar el paquete al destino, definido como la suma de los costes de transmisión de cada nodo j perteneciente al conjunto a , cada uno ponderado con la probabilidad de que el paquete enviado por el nodo i alcance el nodo j , una probabilidad que depende del aparato de comunicación específico utilizado; y

iii. el coste asociado a la posible pérdida del paquete cuando se rechaza después de que se haya alcanzado el número máximo de retransmisiones, siendo dicha pérdida definida por el producto de una constante L que representa la penalización asociada a la pérdida del paquete y la probabilidad de que el paquete no se reciba por ninguno de los nodos destinatarios.

13. El procedimiento según la reivindicación 10, **caracterizado porque**:

cada nodo calcula y almacena el número de paquetes recibidos correctamente desde los nodos vecinos utilizando los diversos aparatos de comunicación, siendo dicho cálculo realizado en todos los paquetes, independientemente

- 5 *de si el nodo es un destinatario de los paquetes o no; y el nodo j , una vez que ha recibido correctamente un paquete enviado por el nodo i usando el aparato m , determina, a partir n_i^m del número de serie del paquete, el número de paquetes n_i^m enviado por el nodo utilizando dicho aparato y utiliza como estimación de la calidad del enlace correspondiente a m la relación entre los paquetes recibidos y los paquetes enviados, que se calcula con respecto a una ventana de tiempo móvil de dimensiones apropiadas, para tener estimaciones que tengan en cuenta el marcado dinamismo del canal subacuático.*

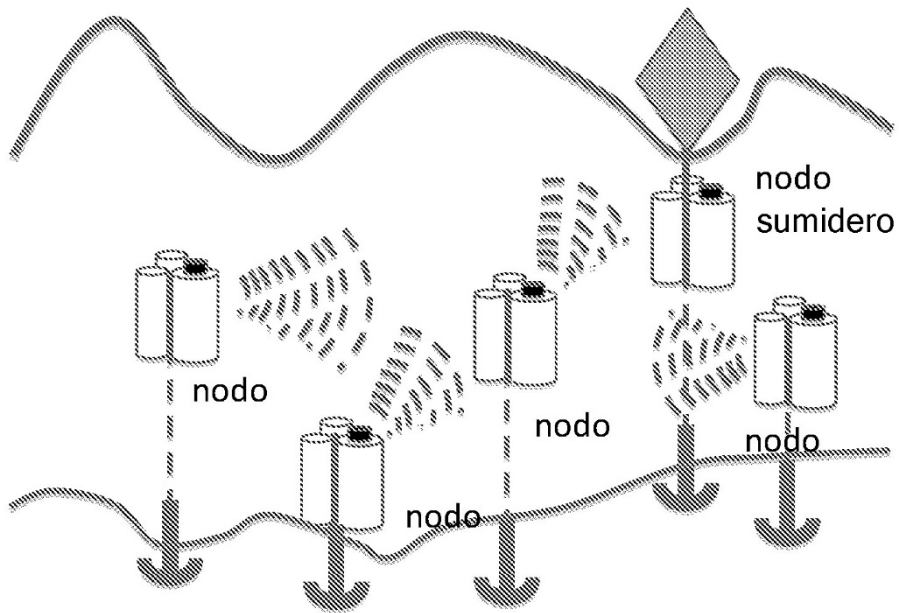


FIG.1

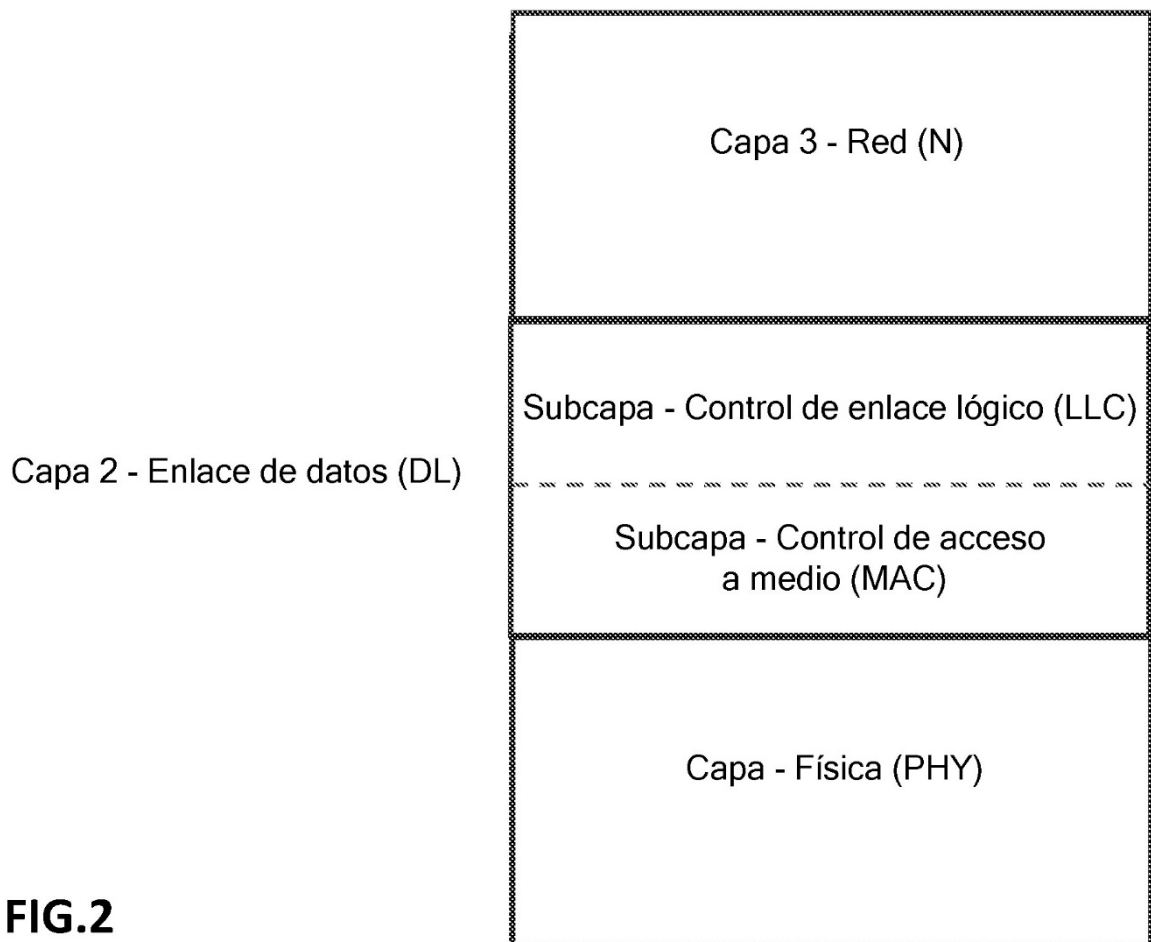


FIG.2

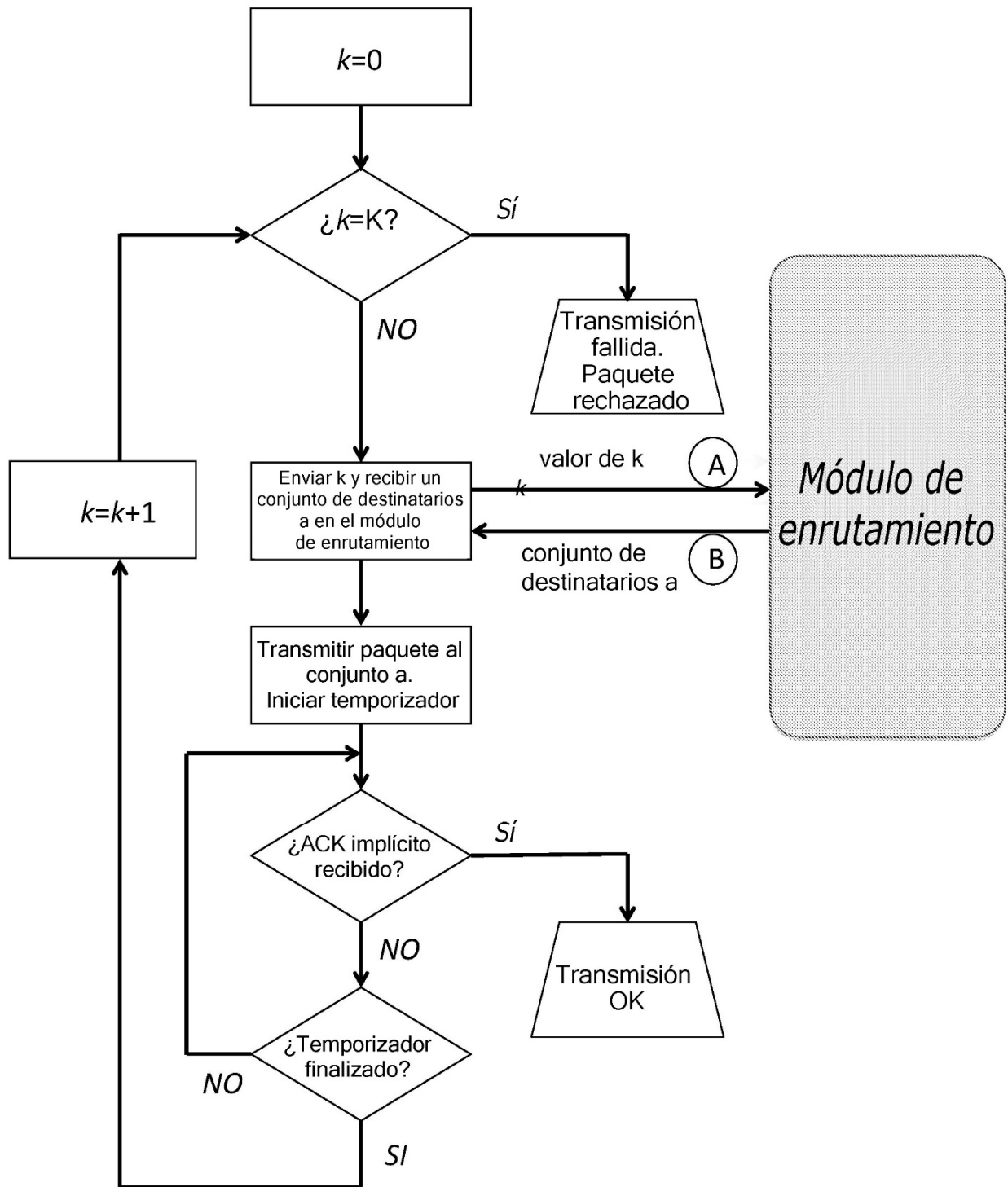


FIG.3

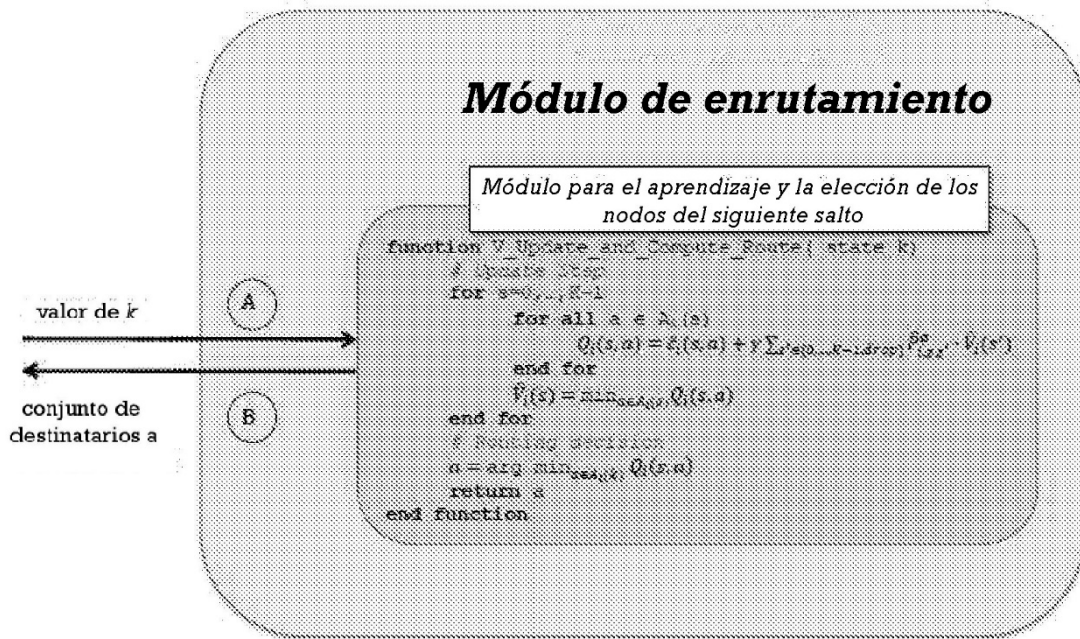


FIG.4

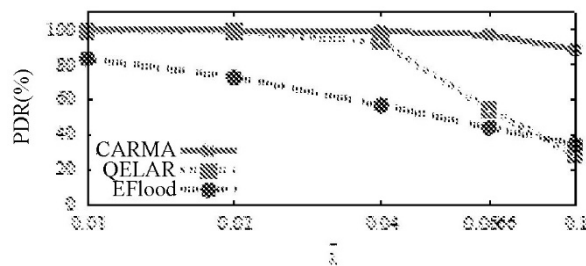


FIG.5

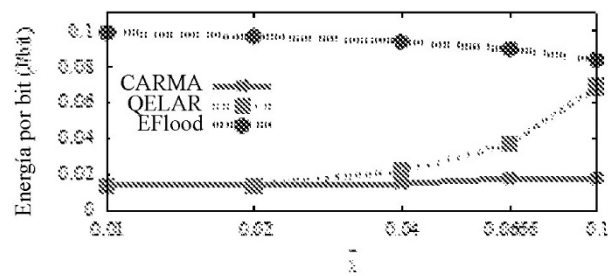


FIG.6

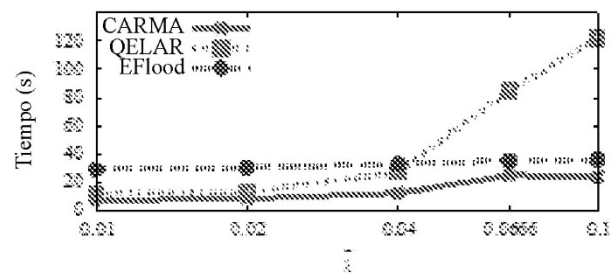


FIG.7

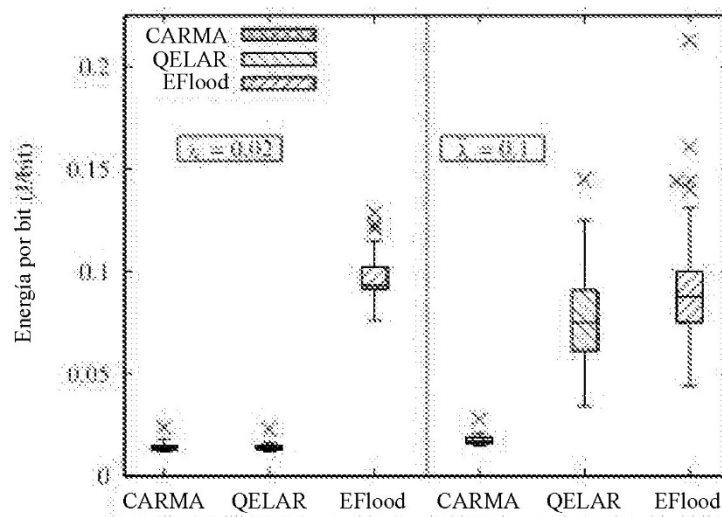


FIG.8