Intermittent networks for data transfer in the Internet of Things

Javier Marenco[1], Paula Zabala[2], Rodrigo Santos[3]

[1] Escuela de Negocios, Universidad Torcuato Di Tella
Av Figueroa Alcorta 7350 (1428) Buenos Aires, Argentina
javier.marenco@utdt.edu.ar
[2] DC-FCEN UBA, ICC UBA-CONCIET
Ciudad Universitaria, Buenos Aires, Argentina
pzabala@dc.uba.ar
[3] DIEC, ICIC
Universidad Nacional del Sur - CONICET, Bahía Blanca, Argentina,
ierms@uns.edu.ar

Abstract. The Internet of Things is based on a hierarchical structure. At the lowest level, sensors transfer information to special nodes that connect to the cloud for processing through mesh networks, which follow the store-and-forward paradigm. Since sensors operate on batteries, careful energy management is required. To achieve this, nodes are turned on and off, generating a network with intermittent characteristics. This work proposes a solution based on a flow model to determine the optimal path, using precision agriculture as an application case.

Keywords: Internet of Things, precision agriculture, integer lineal programming, heuristics

Redes intermitentes para la transferencia de datos en Internet de las Cosas

Javier Marenco[1], Paula Zabala[2], Rodrigo Santos[3]

[1] Escuela de Negocios, Universidad Torcuato Di Tella
Av Figueroa Alcorta 7350 (1428) Buenos Aires, Argentina
javier.marenco@utdt.edu.ar
[2] DC-FCEN UBA, ICC UBA-CONCIET
Ciudad Universitaria, Buenos Aires, Argentina
pzabala@dc.uba.ar
[3] DIEC, ICIC
Universidad Nacional del Sur - CONICET, Bahía Blanca, Argentina,
ierms@uns.edu.ar

Abstract. La Internet de las Cosas se basa en una estructura jerárquica. En el nivel más bajo, los sensores transfieren la información hacia nodos especiales que se conectan con la nube para su procesamiento mediante redes con topología mesh, en las cuales se sigue el paradigma de store-and-forward. Dado que los sensores operan con baterías, se debe realizar un manejo cuidadoso de la energía. Para esto, los nodos se prenden y apagan generando una red con características intermitentes. En este trabajo se propone una solución basada en un modelo de flujo para determinar el camino óptimo, teniendo como caso de aplicación la la agricultura de precisión.

Keywords: Internet de las Cosas, Agricultura de precisión, Programación Lineal Entera, Heurísticas

1 Introducción

El uso de redes de sensores inalámbricos (WSN) para la recopilación de datos en tiempo real y el procesamiento de información han mejorado la producción agrícola y ganadera. La incorporación de estas tecnologías se conoce como agricultura de precisión. Los datos son proporcionados por un conjunto de sensores desplegados en el campo que miden diversos parámetros, como las condiciones climáticas, la composición del suelo y parámetros como la humedad, el nitrógeno, el fósforo, el potasio y el pH, entre otros. La ganadería requiere determinar los movimientos de los animales, la disponibilidad de agua, la presencia de depredadores, plagas e incluso la posibilidad de escuchar los sonidos de los rumiantes [Agrawal et al., 2023, Abu et al., 2022].

Las WSN y la Internet de la Cosas (IoT) deben operar con ciertas restricciones para evitar agotar las baterías o saturar el espectro electromagnético. Existen numerosas tecnologías para implementar WSN, tales como ZigBee, 6TISCH,

LoRa/LoRAWAN, WiFi, NB-IOT y aquellas que utilizan conexiones de telefonía móvil como GPRS, 3G, 4G y, en el futuro, 5G.

Normalmente, los nodos funcionan con baterías, lo que limita su tiempo de transmisión y recepción de mensajes. Dado que la energía es una restricción importante, las redes de este tipo suelen activarse y desactivarse periódicamente para actualizar el estado de las variables monitorizadas. Esto produce una red intermitente y los mensajes pueden retrasarse mientras esperan ser transmitidos.

Las redes intermitentes pueden modelarse como un grafo temporal en el que el conjunto de nodos y aristas no siempre está activo, sino que cambia con el tiempo: $G(V(t), E(t))$, donde $V(t)$ es el conjunto de vértices y $E(t)$ es el conjunto de aristas en el tiempo t.

El ruteo en redes inalámbricas mesh es un tema abierto [Nurlan et al., 2019, Longman et al., 2022]. Los problemas más relevantes se relacionan con el alcance de transmisión, el problema de las estaciones ocultas, las colisiones y la propagación por trayectos múltiples, entre otros. Cuando la red no está continuamente activa, las transmisiones se limitan a una ventana temporal en la que tanto el transmisor como el receptor están activos.

2 Características y condiciones de las WSN

Normalmente, los estándares de red (ZigBee, 6Tisch, LoRaWAN, Sigfox) cuentan con mecanismos para propagar mensajes hacia una puerta de enlace. Estos estándares siempre incluyen un proceso de descubrimiento entre los nodos para determinar las posibles rutas. Estos mecanismos son adecuados cuando los nodos se activan y desactivan aleatoriamente o se mueven dentro de un área sin una ruta conocida. Sin embargo, en agricultura de precisión, los nodos son fijos, por lo que la ruta se puede calcular antes y así saltear la fase de acoplamiento de los nodos vecinos y el cálculo de la ruta de manera distribuida por cada uno de ellos. Se implementa un controlador de red (NC) que determina las rutas de los mensajes. El NC proporciona a los nodos de la red una tabla de reenvío o un conjunto de reglas que deben seguir para propagar los mensajes. El cálculo de la ruta de los mensajes se realiza fuera de línea por el NC y se programa en los nodos. Asumimos que la configuración de la red es válida durante un período de tiempo suficientemente amplio como para considerarla estable.

Presentamos en este trabajo una estrategia de ruteo en redes inalámbricas intermitentes. Se consideran las siguientes propiedades y supuestos: i) Un nodo puede transmitir y recibir simultáneamente; ii) Los nodos pueden transmitir simultáneamente a diferentes nodos sin generar colisiones por la asignación ortogonal de canales; iii) Un nodo no puede recibir dos mensajes simultáneamente; iv) El tiempo se discretiza en ranuras y contempla el tiempo necesario para transmitir un mensaje (encabezado más carga útil); v) Dado que se utiliza el mecanismo de almacenamiento y reenvío, cada nodo dispone de una capacidad limitada de almacenamiento; vi) Dos nodos pueden intercambiar información en modo halfdúplex.

Se planteó un modelo de programación lineal entera para este problema, pero rápidamente requiere una gran cantidad de memoria y un tiempo muy importante de cómputo, requerimientos que hacen inviable su aplicación. Por razones de espacio, en este trabajo en desarrollo no se describe este modelo.

3 Modelo de flujo

En esta sección, presentamos una reducción del problema considerado en este trabajo a un ejemplo del problema de flujo de mínimo costo en redes [Ahuja et al., 1993]. El flujo en esta red representa los mensajes que se transmiten y almacenan entre los nodos y dentro de los intervalos de tiempo. Para cada nodo $i \in V$ y cada intervalo de tiempo $s \in S$, definimos los nodos v_{is}^-, v_{is} y v_{is}^+. También introducimos un nodo sumidero t, de modo que la red se define sobre el conjunto de nodos $N = \{v_{is}^-, v_{is}, v_{is}^+\}_{i \in V, s \in S} \cup \{t\}$. Supongamos que $S = \{1, \ldots, \bar{s}\}$. Ahora definimos los arcos en la red. Para cada $i \in V$ y cada $s \in S \backslash \{\bar{s}\}$, introducimos el arco $(v_{is}, v_{i,s+1})$ con capacidad cap_i y costo nulo. El flujo a lo largo de este arco representa el almacenamiento de mensajes en el nodo i desde la ranura s hasta la ranura siguiente. Para cada $i \in V$ y cada $s \in S$, agregamos el arco $(v_{is}^-, v_{i,s+1})$ con capacidad 1 y costo nulo. El flujo a lo largo de este arco representa la recepción de un mensaje en el nodo i de la ranura s, y la capacidad unitaria implica que se puede recibir como máximo un mensaje en este nodo en esta ranura de tiempo. Para cada $i \in V$ y cada $s \in S$, introducimos el arco $(v_{is}, v_{i,s+1}^+)$ con capacidad 1 y costo nulo. El flujo a lo largo de este arco representa la transmisión de un mensaje en el nodo i en la ranura s, y la capacidad unitaria implica que, como máximo, se puede transmitir un mensaje en este nodo en esta ranura de tiempo. Para cada $s \in S$ y cada arco $(i, j) \in X$ activo en la ranura s, consideramos el arco $(v_{is}^+, v_{j,s+1}^-)$ con capacidad 1 y costo 1. Este arco representa la transmisión de un mensaje del nodo i al nodo j en la ranura s. Finalmente, para cada puerta de enlace $i \in GW$ y cada $s \in S$, agregamos el arco (v_{is}, t) con capacidad infinita y costo nulo, que representa la recepción de mensajes en el servidor.

Para cada mensaje $k \in K$, definimos el imbalance del nodo v_{k_i,k_t} en 1, lo que especifica que se introduce una unidad de flujo en la red en el nodo de origen k_i en el intervalo de tiempo k_t. Además, definimos el imbalance del nodo t en $-|K|$, lo que representa la recepción de todos los mensajes. Los imbalances de los nodos restantes se fijan en cero. De esta manera, un flujo corresponde a una programación de distribución factible de mensajes desde los nodos de origen al nodo receptor t, y su costo representa el número de transmisiones punto a punto. Dado que todas las capacidades son enteras, siempre existe una solución óptima entera, y el flujo corresponde al número de mensajes que se transmiten/almacenan en cada arco. Por lo tanto, buscar un flujo de costo mínimo equivale a encontrar la solución óptima al problema.

4 Experimentos y resultados

Se implementó el modelo de programación lineal entera utilizando Cplex, y se implementó el modelo de flujo en Java utilizando la biblioteca OR-Tools para la resolución del problema de flujo de costo mínimo. Se definieron instancias simples con grillas de 25, 36, 60 y 100 nodos equidistantes, respectivamente. En la Tabla 1 se pueden ver los tiempos de ejecución de cada método y la cantidad mínima de saltos.

TABLE 1
Comparación de los dos modelos para diferentes instancias.

Nodos	Flujo		CPLEX	
	Solución	Tiempo [s]	Solución	Tiempo [s]
25	41	1.00	41	10.45
36	72	1.07	72	31.67
60	114	1.98	114	431.89
100	148	2.66	148	3404

5 Conclusiones

En esta presentación se planteó el problema de ruteo en redes intermitentes y cómo puede ser resuelto en una primera aproximación por medio de un modelo de flujo de costo mínimo. En trabajos futuros se considerarán más restricciones y se hará una evaluación más completa.

References

[Abu et al., 2022] Abu, N., Bukhari, W., Ong, C., Kassim, A., Izzuddin, T., Sukhaimie, M., Norasikin, M., and Rasid, A. (2022). Internet of things applications in precision agriculture: A review. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 3(3):338–347.

[Agrawal et al., 2023] Agrawal, A. V., Magulur, L. P., Priya, S. G., Kaur, A., Singh, G., and Boopathi, S. (2023). Smart precision agriculture using iot and wsn. In *Handbook of Research on Data Science and Cybersecurity Innovations in Industry 4.0 Technologies*, pages 524–541. IGI Global.

[Ahuja et al., 1993] Ahuja, R. K., Magnanti, T. L., and Orlin, J. B. (1993). *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. Prentice hall.

[Longman et al., 2022] Longman, E., Cetinkaya, O., El-Hajjar, M., and Merrett, G. V. (2022). Mesh networking for intermittently powered devices: Architecture and challenges. *IEEE Network*, 36(3):122–128.

[Nurlan et al., 2019] Nurlan, Z., Zhukabayeva, T., and Othman, M. (2019). Mesh network dynamic routing protocols. In *2019 IEEE 9th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*, pages 364–369. IEEE.