

Maximizing Network Lifetime in Wireless Sensor Networks with Adjustable Sensing Ranges Through Column Generation

Fabián Castaño*, Nubia Velasco[†], André Rossi[‡] and Marc Sevaux[§]

*Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana, fabian.castano@upb.edu.co

[†]Facultad de Administración, Universidad de los Andes, Colombia, nvelasco@uniandes.edu.co

[‡]LERIA, Université de Angers, France, andre.rossi@univ-angers.fr

[§]Lab-STICC, Université de Bretagne-Sud, France, marc.sevaux@univ-ubs.fr

Abstract— This paper addresses the problem of maximizing network lifetime in a special class of wireless sensor networks composed by devices able to adjust the sensing range and, consequently, the energy consumption rate. Wireless sensor networks used to monitor targets located at discrete fixed positions and transmit the information collected via multi-hop communication to a single base station are considered. To address the problem, it is proposed a large scale linear programming model defined over an exponential number of variables. To avoid enumerate all columns, it is adopted a column generation approach that divides the problem into two. First, a Pricing Subproblem which is used to determine the sensing range adopted for each sensor at a given configuration so as to determine their energy consumption rates and to contribute to extend network lifetime. Second, a Master Problem used to identify the time interval during which a given set of configurations of the network should be used aiming at maximizing network lifetime. To solve the pricing subproblem it is proposed a new IP model which is efficiently solved through a Branch & Cut approach. The proposed approach is tested over a large set of experiments carried out for instances with up to 300 sensors and 180 targets. Preliminary results confirm the efficacy of the proposed approach and highlight several opportunities to extend current work to networks with similar characteristics.

Keywords—Wireless sensor networks; Adjustable sensing ranges; Energy efficient; Column generation; Lifetime

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2016.1.1.295>

ISBN: 978-0-9822896-9-3

ISSN: 2414-6390

14th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Engineering Innovations for Global Sustainability”, 20-22 July 2016, San José, Costa Rica.

ISBN: 978-0-9822896-9-3

ISSN: 2414-6390

DOI: <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2016.1.1.295>

Maximización de la Vida Útil en Redes de Sensores Inalámbricos con Rangos de Sensibilidad Ajustables mediante Generación de Columnas

Fabián Castaño*, Nubia Velasco[¶], André Rossi[‡] and Marc Sevaux[§]

* Facultad de Ingeniería industrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia
Email: fabian.castano@upb.edu.co

[¶] Facultad de Administración, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
Email: nvelasco@uniandes.edu.co

[‡] LERIA, Université de Angers, Angers, Francia
Email: andre.rossi@univ-angers.fr

[§] LabSTICC, Université de Bretagne-Sud, Lorient, Francia
Email: marc.sevaux@univ-ubs.fr

Resumen—En este trabajo se explora el problema de maximizar la vida útil de una red de sensores inalámbricos contando con sensores capaces de ajustar sus rangos de sensibilidad, modificando así su consumo energético. Este tipo de redes son usadas para monitorear objetos localizados en posiciones fijas. Además, se consideran restricciones sobre la conectividad de la red, en la cual los sensores que captan alguna señal deben ser capaces de transmitir la información a un usuario final mediante comunicaciones inalámbricas *multi-hop*. Se propone un esquema híbrido de solución basado en generación de columnas que aprovecha la representación casi natural del problema mediante un modelo lineal construido sobre un número exponencial de variables. El método propuesto divide el problema entre un problema auxiliar y un problema maestro. El primero se encarga de determinar los rangos de sensibilidad asignados a cada sensor en subgrupos satisfaciendo requerimientos de conectividad. Por su lado, el problema maestro determina el tiempo total que un subgrupo dado de sensores, representado además en las columnas del modelo lineal, debe operar con el fin de maximizar la vida de la red. Para resolver el problema auxiliar, se propone un nuevo modelo de programación entero basado en un conjunto exponencial de cortes que, correctamente implementado, permite identificar nuevas columnas rápidamente mediante la aplicación de un enfoque *Branch & Cut*. El enfoque propuesto es evaluado en un conjunto de instancias de tamaño mediano con hasta 300 sensores y 180 objetivos. Los resultados preliminares indican la eficacia del método propuesto y sugieren también nuevas posibilidades para su aplicación a redes de sensores con tecnologías similares.

I. INTRODUCCIÓN

Las redes de sensores inalámbricos (WSN por sus siglas en inglés) están conformadas por un conjunto

de dispositivos electrónicos, llamados sensores, que incorporan tecnologías para el monitoreo y registro de señales acústicas, visuales, térmicas, entre otras, y para retransmitir los datos al usuario final (o estación base) mediante señales electromagnéticas inalámbricas.

En recientes años se ha experimentado un notorio crecimiento en el número de aplicaciones de las WSN. Algunas de sus principales aplicaciones se encuentran en entornos industriales, monitoreo medioambiental, detección de fuegos forestales y seguimiento de especies animales en su habitat [1]–[7].

Algunas aplicaciones requieren que las WSN operen de manera autónoma, por ejemplo cuando están ubicadas en zonas hostiles. Si los sensores no se encuentran provistos de unidades de almacenamiento de información o su capacidad de almacenamiento es muy limitada, si se encuentran ubicados en zonas distantes o la información es requerida en línea, justo cuando está disponible, la conectividad representa un asunto importante que debe ser considerado. Este requerimiento se satisface cuando un sensor activo, que es usado para monitorear señales y (re)transmitirlas, es capaz de encontrar un camino, compuesto por otros sensores activos, que permite enviar la información al usuario final (o estación base).

Las WSN pueden ser desplegadas de forma aleatoria, desde un avión, helicóptero o un drón, de tal forma que conforman redes no estructuradas en las cuales ni la ubicación de los sensores ni la topología de la red pueden ser definidas de antemano. Éste último aspecto supone desafíos no convencionales y motiva la necesidad de determinar formas de usar de manera eficiente los

recursos presentes en los sensores, en especial la limitada energía disponible.

La capacidad de la batería ha sido y continua siendo uno de los aspectos más relevantes al momento de llevar al campo de acción los sensores inalámbricos en aplicaciones de monitoreo. Este problema empeora cuando los sensores están ubicados en zonas remotas o inaccesibles y la energía debe ser administrada *in situ*, después de que los sensores sean desplegados. En estos casos, estrategias como la programación y asignación de tareas a los sensores, la estructuración de rutas de transmisión eficientes, entre otras, pueden ser adaptadas de tal forma que la energía de los sensores puede explotarse eficientemente y las WSN puedan usarse para monitorear las señales interesantes por tiempos más largos.

Dependiendo del tipo de sensor considerado, los dispositivos puede estar en capacidad de modificar su estado una vez activos, asumir diferentes papeles en la red e inclusive modificar la tasa a la cual consumen energía, en respuesta a la tarea que estos llevan a cabo. En este artículo se consideran sensores que poseen la capacidad de modificar sus radios de sensibilidad, y así la potencia suministrada a sus módulos de detección, disminuyendo de esta forma el consumo de energía [8], [9]. La Figura 1 esquematiza dos posible modos de operación para un sensor capaz de asumir multiples rangos de sensibilidad. Cuando el sensor opera en el modo de consumo energía más bajo, el área que puede cubrir se limita a la circunferencia definida alrededor del sensor dentro del radio r_a permitiéndole monitorear únicamente el objetivo κ_1 , sí el sensor asume el modo de consumo de energía más alto (r_b) su área de cobertura es mayor y el sensor puede monitorear tanto el objetivo κ_1 como el κ_2 . Sin importar el radio de sensibilidad que el sensor asuma, un sensor activo puede establecer comunicación únicamente con otros sensores que se encuentren dentro de su radio de comunicación (señalado por una línea punteada en la Figura 1).

Con el fin de mejorar la eficiencia en el uso de la energía de una WSN, es posible determinar un plan para la utilización de los sensores en el cual se fijen no sólo los intervalos de tiempo durante los cuales estos operarán, sino también los rangos de detección que estos asumirán durante dichos intervalos. De esta forma, es posible aplicar estrategias de optimización que permitan extender al máximo posible el tiempo durante el cual la red puede cumplir sus labores de monitoreo y transmitir sus detecciones a la estación base.

El método de generación de columnas (CG) ha demostrado ser una estrategia interesante para dar solución a los problemas de optimización del uso de la energía en WSN [10], [11]. Grandes contribuciones han sido desarrolladas recientemente en este campo, demostrando la flexibilidad que este enfoque ofrece para lidiar con la diversidad de

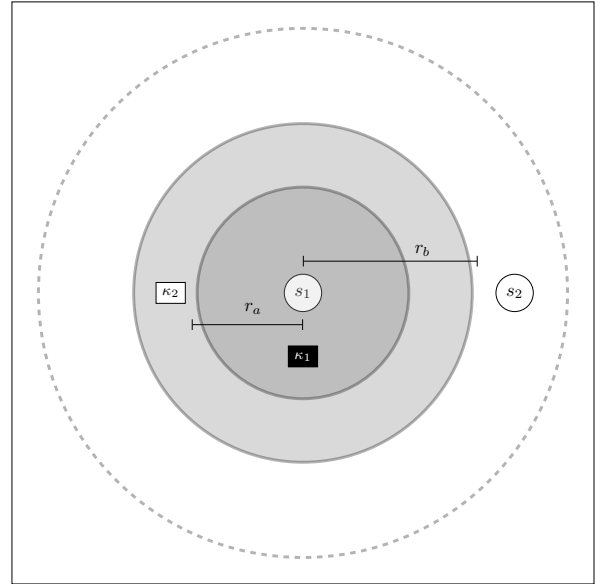


Figura 1: Un modelo sencillo para representar los diferentes rangos de cubrimiento en 2 dimensiones

características de la operación que son observados en este tipo de redes [11]–[14]. Algunos resultados indican, sin embargo, que el modelo del subproblema y en ocasiones el método de solución, usado para identificar nuevas columnas puede requerir modificaciones severas.

En este artículo se explora el uso de métodos de optimización exactos para maximizar la vida útil en redes de sensores inalámbricos. Con este fin, se propone un enfoque basado en generación de columnas que divide el problema entre dos tipos de decisiones. Asumiendo que es posible conocer todas las posibles formas de estructurar la red asignando tareas o roles a los sensores, y garantizando que se satisface el requerimientos de conectividad, el primer tipo de decisiones consiste en determinar nuevas configuraciones de la red, obtenidas al asignar roles para un conjunto de sensores, que puedan ser adoptadas extendiendo la vida de la red. El segundo grupo de decisiones consiste en asignar el intervalo de tiempo durante el cual tales estructuras operarán de tal forma que se maximice el tiempo total durante el cual la red opera.

El artículo está estructurado en cuatro secciones. La Sección II presenta una revisión sistemática de estrategias previamente propuestas para resolver problemas similares, ofrece una descripción completa del problema y el modelamiento matemático adoptado en este artículo para resolverlo. La estructura del proceso de solución basado en generación de columnas es presentada en la Sección III al igual que los métodos usados para incrementar la eficiencia a la hora de resolver el problema. Los resultados computacionales preliminares y

la discusión son introducidos en la Sección IV.

II. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y TRABAJO RELACIONADO

Desde la aparición de las WSN, muchas estrategias han sido propuestas con el fin de optimizar el uso de su energía y maximizar su vida útil (*i.e.* el tiempo durante el cual pueden satisfacer los requerimientos de cubrimiento y conectividad). En el caso en el cual más sensores de los necesarios son desplegados, dos estrategias basadas en la activación selectiva de subgrupos de sensores predominan: *i*) Selección de subconjuntos disyuntos [15], [16] *ii*) Selección de subconjuntos no disyuntos [17]–[20]. En el primer caso se asume que una vez un subconjunto de sensores es seleccionado este continúa su operación hasta que la batería de los sensores que forman parte de él es agotada y los sensores pierden utilidad. En el caso de los subconjuntos no disyuntos un sensor puede aparecer en diferentes subconjuntos y, al final, la programación de las activaciones para cada subgrupo debe respetar la capacidad de la batería de cada uno de los sensores que lo conforman.

Este artículo considera la adopción de un enfoque usando subconjuntos no disyuntos de sensores. De esta forma, se propone determinar una programación de la operación para los subgrupos de sensores que maximice el tiempo durante el cual la WSN puede satisfacer los requerimientos de cubrimiento y conectividad demandados por la aplicación. Con este propósito, se propone adaptar el enfoque de solución general basado en generación de columnas propuesto en Castaño *et al.* [14], a uno que tiene el potencial de representar una gama amplia de características de la operación de los sensores. Al igual que en las aplicaciones clásicas de CG el problema es dividido en dos: *i*) En primer lugar se considera un problema maestro (PM), que es usado para determinar la asignación de los tiempos de operación de subconjuntos de sensores capaces de garantizar las restricciones requeridas y *ii*) un problema auxiliar (PA) usado para identificar subconjuntos adicionales que, además de garantizar la factibilidad, tienen potencial para ser usados con el fin de extender la vida de la red. Con este último fin, se propone un modelo general de solución para el PA que puede ser fácilmente aplicado en la solución de problemas clásicos de optimización del uso de la energía y maximización de la vida útil en redes de sensores inalámbricos.

Consideremos para empezar que se cuenta con un conjunto de sensores $\mathcal{S} = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_m\}$ capaces de modificar sus tasas de consumo de energía al reducir sus radios de sensibilidad y consecuentemente, las áreas que cubren. Los sensores son usados para monitorear el conjunto de objetivos $\mathcal{K} = \{\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \dots, \kappa_n\}$ y transmitir la información colectada hasta la estación base β_0 usando

señales inalámbricas que pasan a través de un camino compuesto exclusivamente por sensores activos. Por supuesto, con el fin de garantizar que la transmisión puede establecerse entre dos sensores s_u y s_v , la distancia entre estos no puede sobrepasar el radio de comunicación R_c .

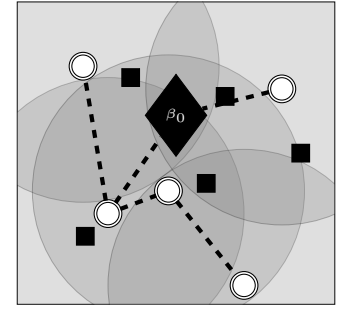
Cada sensor es capaz de asumir un número (no necesariamente finito) de rangos de sensibilidad modificado su tasa de consumo de energía. El conjunto $\mathcal{R} \in \{r_1, r_2, r_3, \dots, r_l\}$ denota los posibles modos de operación o rangos de sensibilidad de cada sensor, donde r_1 es un modo de bajo consumo de energía en el que el sensor no es usado ni para proveer cubrimiento ni para (re)transmitir las señales recibidas. Es posible usar el parámetro binario $a_{r\kappa_v}^{s_u}$ para indicar si el sensor s_u ajustado en el rango de sensibilidad $r \in \mathcal{R}$ puede usarse para monitorear el objetivo κ_v ($a_{r\kappa_v}^{s_u} = 1$). Otro parámetro $e_{rj}^{s_u}$ designa la tasa de consumo de energía del sensor s_u cuando este asume el rol $r \in \mathcal{R}$ en una asignación $j \in \Omega$, donde Ω corresponde al conjunto de todas las asignaciones factibles de roles a los sensores, es decir, asignaciones que satisfacen los requerimientos de cobertura y conectividad. La Figura 2 presenta tres posibles asignaciones de roles a los sensores. Las Figuras 2a y 2b muestran asignaciones factibles, que satisfacen los requerimientos de cobertura y conectividad. Por su parte, la Figura 2c muestra una asignación infactible que, aunque satisface el criterio de conectividad, no satisface el criterio de cobertura.

II-A. Capacidad de la batería y vida útil de la red

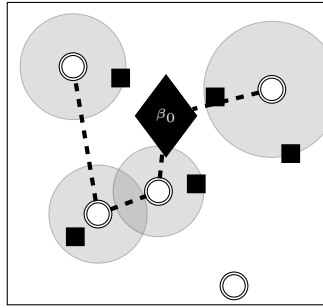
Gu *et al.* [18] proveen un modelo sencillo e interesante que permite representar la vida útil de una red de sensores inalámbricos y que es independiente de las características técnicas de los sensores considerados. Asumiendo, sin pérdida de generalidad, que los sensores están provistos de una batería con una carga inicial b_{s_u} y que estos poseen la información sobre los objetivos que están cubriendo. Denotemos, además, por $U_{\kappa_i} \subseteq \mathcal{S}$ al subconjunto de sensores que pueden monitorear el objetivo κ_k . La función indicadora $x_{s_u}(t)$ toma el valor 1 cuando el sensor s_u se encuentra monitoreando el objetivo κ_k en el instante t . De forma similar, la función $e_{s_u}(t)$ indica la energía total consumida por el sensor s_u en el instante t . Si es necesario garantizar que cada objetivo sea monitoreado a lo largo de la vida de la red, es posible, usando nuestras previas definiciones, imponer el siguiente conjunto de restricciones:

$$\sum_{s_u \in U_{\kappa_k}} x_{s_u r}(t) \geq 1 \quad \forall \kappa_k \in \mathcal{K} \quad (1)$$

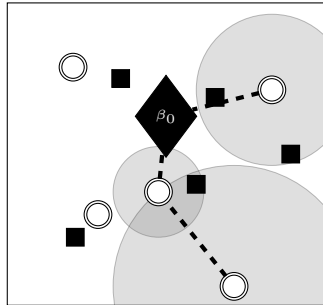
Ahora, considerando que la vida útil de los sensores está limitada por la capacidad de su batería, es posible



(a) Red con sensores activos a la tasa de consumo de energía máxima



(b) Red con sensores activos a una tasa de consumo de energía ajustada a las necesidades



(c) Asignación infactible de roles a los sensores

Figura 2: Diferentes asignaciones de roles a los sensores en WSN

adicionar una restricción sobre el máximo tiempo que cada sensor s_u es usado durante la vida total de la red (T). Dicha restricción puede ser representada considerando el consumo acumulado de energía como se muestra en la Ecuación (2).

$$\int_0^T x_{s_u}(t) e_{s_u}(t) dt \leq b_{s_u} \quad (2)$$

Cualquier programación de la activación de los sensores debe garantizar que ambas restricciones se respetan, sin importar cuál sea el objetivo (ya sea maximizar la vida de la red u otro). Además, características extra como resiliencia, cubrimiento redundante o parcial, entre

otros, pueden ser adicionados al anterior modelo ya sea modificando las ecuaciones previas o agregando nuevas que se ajusten a las características de la red.

II-B. Modelo matemático

Como se mencionó previamente, con el fin de extender la vida de la red, un enfoque que ha probado ser útil consiste en dividir la red en subgrupos de sensores, en los cuales cada sensor tiene un rol asignado, y programar su operación eficientemente [17]–[22]. De esta forma, únicamente los sensores con un rol asignado son considerados activos y son usados para monitorear y/o (re)transmitir información. Finalmente, la vida de la red puede ser maximizada si el tiempo asignado a los subgrupos toma en cuenta las limitaciones de batería y se considera de forma global la información disponible para generar asignaciones óptimas que logre alcanzar dicho objetivo.

Si t_j representa el tiempo total asignado a los sensores en un grupo $C_j \in \Omega$ y C_j representa una asignación factible de roles a los sensores, es posible proveer un modelo lineal, basado en las Ecuaciones (1) y (2), para computar el tiempo que se debe asignar a cada subgrupo con el objetivo de maximizar la vida de la red a través de la identificación de los pares (C_j, t_j) .

$$\text{Maximizar: } \sum_{j|C_j \in \Omega} t_j \quad (3)$$

$$\sum_{j|C_j \in \Omega} \sum_{r \in \mathcal{R}} (e_{s_u r}^j) t_j \leq b_{s_u} \quad \forall s_u \in \mathcal{S} \quad (4)$$

$$t_j \geq 0 \quad \forall j|C_j \in \Omega \quad (5)$$

El objetivo consiste en maximizar el tiempo total que la red opera. Considerando que cada subgrupo C_j opera independientemente de los demás, dicho objetivo se consigue maximizando la suma de los tiempos que se asigna a cada uno de los subgrupos (Ecuación 3). Las restricciones (4) son usadas para garantizar que el tiempo asignado a cada subgrupo, que tiene implícita la asignación de roles, no sobrepasa la capacidad de la batería de cada uno de los sensores. Por supuesto, las variables relacionadas con el tiempo asignado a cada grupo son continuas y lineales (Ecuación 5).

II-C. Un método basado en Generación de Columnas

El modelo representado por las Ecuaciones (3-5) es lineal, bastante simple, y lo suficientemente flexible para ser adaptado a una gran cantidad de situaciones diferentes en cuanto a las especificaciones técnicas de los sensores considerados. En contraste, el modelo asume

que el conjunto Ω de asignaciones factibles de roles a los sensores se conoce, una situación que, en la práctica, luce improbable o impracticable. De hecho, puede demostrarse que dicho conjunto crece de forma exponencial con el incremento del número de sensores y del número de roles que dichos dispositivos puedan asumir. Así, puede ser inviable, además de innecesario (salvo en algunos casos), tratar de enumerar todos y cada uno de los subgrupos que forman parte de Ω .

Un enfoque, ahora clásico, para dar respuesta a dicha problemática, consiste en la adopción del método de generación de columnas para solucionar el problema de maximización de la vida útil en redes de sensores inalámbricos. Cuando este es el caso, es posible enumerar subgrupos de sensores que pueden ser representadas mediante las asignaciones de energía de acuerdo con sus roles y constituir columnas en el modelo constituido por las Ecuaciones (3 – 5) con miras a la construcción de dicho problema maestro. El modelo planteado recae en un conjunto inicial de subgrupos $\Omega' \in \Omega$ que posteriormente puede ser enriquecido al encontrar nuevas columnas que puedan contribuir a extender la vida de la red. Al igual que en cualquier implementación del método de generación de columnas, el criterio usado para generar nuevas columnas C_j es el de los costos reducidos. En el caso que tales columnas existan, estas se adicionan al conjunto $\Omega' \leftarrow \Omega \cup C_j$ y un nuevo problema maestro (Ecuaciones 3 – 5) se obtiene. En el caso que pueda demostrarse que no exista una nueva columna con costos reducidos positivos, es posible garantizar que el proceso alcanzó la solución óptima y es posible detener el proceso de generación de columnas. Una representación sencilla del método de generación de columnas se presenta en la Figura 3.

Si alguna solución de partida esta disponible, se constituye un subconjunto inicial desde el cual es posible plantear un PM inicial y dar paso al proceso de generación de columnas. En el caso en el que no existan soluciones iniciales disponibles, es posible inicializar el conjunto Ω con una única columna representado la asignación máxima de energía a cada uno de los sensores en las WSN.

II-D. Método Branch & Cut para generar nuevas columnas

Por desgracia, el proceso de identificar nuevos subgrupos de sensores, rentables para extender la vida de la red, corresponde a un problema de difícil solución. En algunas de sus versiones más simples, este problema puede verse como el problema del árbol de Steiner con pesos en los nodos, un problema clásico categorizado en la literatura como NP-Hard [23]. Así las cosas, con el fin de dar respuesta a esta situación y mantener el método operando de forma eficiente, es necesario

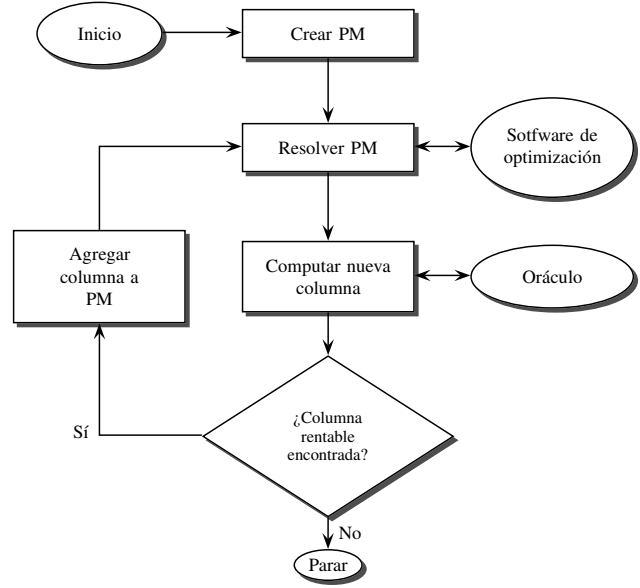


Figura 3: Método de generación de columnas

proveer métodos que permitan determinar rápidamente nuevas columnas (que puedan contribuir a mejorar la función objetivo).

El proceso iterativo que se lleva a cabo en la ejecución del método de generación de columnas, consistirá entonces en identificar nuevas columnas C_j (correspondientes a su vez a asignaciones de roles a los sensores) para las cuales se pueda determinar un intervalo de tiempo t_j para su operación óptima. La identificación de dichas columnas se hace bajo el criterio de los costos reducidos que permite determinar si una solución es óptima o existe una nueva columna que, incluida en el modelo, podría contribuir a la mejora de la función objetivo del PM. Sea $x_{s_u r}^j$ una variable binaria que toma el valor 1 si el sensor s_u asume el rol r en la asignación $C_j \in \Omega$. La variable, también binaria, $y_{s_u}^j$ indica que el sensor s_u está activo, en un rol diferente a r_1 , y es usado para el monitoreo de objetivos y la transmisión de la información a la estación base o a otros sensores ubicados dentro de su rango de comunicación. El siguiente modelo (PA) es usado para determinar una asignación de roles a los sensores que maximice la función de costos reducidos y pueda ser usada para constituir una nueva columna que pueda generar incrementos de la función objetivo.

$$\text{Maximizar } j : 1 - \sum_{s_u \in \mathcal{S}} \sum_{r \in \mathcal{R}} e_{s_u r}^j x_{s_u r}^j w_{s_u}^j \quad (6)$$

Sujeto a:

$$\sum_{s_u \in \mathcal{S}} \sum_{r \in \mathcal{R}} a_{s_u k r} x_{s_u r} \geq 1 \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{r \in \mathcal{R} \setminus r_1} x_{s_u r}^j = y_{s_u}^j \quad \forall s_u \in \mathcal{S} \quad (8)$$

$$\sum_{s_u \in c} y_{s_u}^j \leq |c| \quad \sum_{s_v \in \mathcal{S} \setminus c | \exists a(s_u, s_v), s_u \in c} y_{s_v}^j \quad \forall c \in CC | sink \notin c \quad (9)$$

$$x_{s_u r}^j \in \{0, 1\} \quad \forall s_u \in \mathcal{S}, r \in \mathcal{R} \quad (10)$$

$$y_{s_u}^j \in \{0, 1\} \quad \forall s_u \in \mathcal{S} \quad (11)$$

El modelo representado por las Ecuaciones (6-11) establece la asignación de roles a los sensores que maximiza los costos reducidos (Ecuación 6). La Ecuación (7) obliga las soluciones a satisfacer el requerimiento de cobertura para cada sensor. Mediante la Ecuación (8) se establece una relación entre los roles que juegan los sensores en la red y las variables y_{s_u} usadas como apoyo para obligar al modelo a respetar los requerimientos de conectividad. Finalmente, la conectividad es obligada mediante un conjunto de tamaño exponencial de restricciones (9) que obliga a cualquier componente conexas, que no contenga la estación base, a establecer una conexión con algún otro sensor que permita transferir la información a la estación base o usuario final.

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con el fin de poner a prueba el rendimiento del método se ha generado un conjunto de 180 instancias aleatoriamente construidas que permite evaluar el esfuerzo computacional requerido para computar la vida máxima de una red de sensores inalámbricos operando bajo las características dadas. Las instancias fueron generadas con un número de sensores en $|\mathcal{S}| = \{100, 200, 300\}$, y un número de objetivos $|\mathcal{K}|$ que varía entre 0.15, 0.3 y 0.6 veces el número de sensores en la red. Se asume que los sensores se encuentran aleatoriamente distribuidos en un área de 100×100 con una única estación base ubicada en el centro. Para cada combinación del número de sensores y objetivos, se varió el número posible de roles (radios de sensibilidad) entre 1 y 4 y se generaron 5 instancias para dicha combinación de parámetros. Se asume un modelo de consumo de energía que incrementa de forma lineal con la distancia y para el cual el máximo consumo corresponde a una unidad de energía por unidad de tiempo. Finalmente, se asume que los sensores son idénticos y poseen una carga inicial en su batería $b_{s_v} = 1$. En todos los casos se asume que el máximo radio de sensibilidad es 20 y el radio fijo de comunicación es $R_c = 30$.

Los métodos acá propuestos fueron desarrollados en c++ usando GUROBI V 6.0 como motor de optimización. Los experimentos se llevaron a cabo en un equipo provisto de un procesador Intel I5 acompañado de 4GB de memoria RAM. En todos los casos las restricciones de

Cuadro I: Resultados computacionales y Discusión

$ \mathcal{R} $	$ \mathcal{S} $	$ \mathcal{K} $	Objetivo	Tiempo (s)	# Iteraciones	# Óptimos
1	100	15	4.60	0.40	57.20	5
		30	4.00	0.00	38.20	5
		60	3.20	0.20	26.20	5
	200	30	9.80	1.80	178.60	5
		60	8.40	1.60	127.60	5
		120	6.40	1.00	60.40	5
	300	45	13.80	5.00	277.80	5
		90	11.40	3.80	208.40	5
		180	12.80	6.80	224.00	5
2	100	15	7.03	0.40	71.00	5
		30	5.29	0.20	41.80	5
		60	4.58	0.40	41.20	5
	200	30	16.01	3.80	243.40	5
		60	11.30	1.60	94.20	5
		120	10.05	3.20	126.20	5
	300	45	23.11	9.80	396.20	5
		90	17.65	5.20	181.00	5
		180	21.42	137.80	840.80	5
3	100	15	8.14	0.80	90.00	5
		30	5.84	0.40	46.80	5
		60	4.71	0.20	34.40	5
	200	30	19.44	8.00	353.60	5
		60	14.03	2.80	145.80	5
		120	10.96	21.00	289.00	5
	300	45	28.66	13.20	452.40	5
		90	22.19	10.20	271.80	5
		180	25.01	811.00	1472.00	4
4	100	15	9.85	1.00	110.40	5
		30	6.31	0.60	59.00	5
		60	5.81	1.00	81.80	5
	200	30	22.31	17.40	532.60	5
		60	16.28	8.40	250.00	5
		120	11.88	38.00	375.60	5
	300	45	33.25	24.40	614.40	5
		90	24.58	19.20	374.00	5
		180	27.28	859.40	1662.80	4

corte fueron adicionadas durante el proceso de *Branch-and-Bound* implementado por el software de optimización y se impuso un tiempo limite de ejecución de 3600 segundos, después del cual la mejor solución obtenida se retorna.

El Cuadro I resume los resultados encontrados en los experimentos llevados a cabo. Las columnas $|\mathcal{R}|$, $|\mathcal{S}|$, $|\mathcal{K}|$ indican el número de roles, el número total de sensores y el total de objetivos, respectivamente, para cada grupo de instancias evaluado. Cada línea representa los resultados promedio obtenidos para el grupo de 5 instancias, en términos de la vida útil de la red, con la columna llamada **Objetivo**, del tiempo computacional (columna **Tiempo**) y del número total de iteraciones (columna **# Iteraciones**) ejecutadas por el método hasta que este finaliza el proceso de optimización o alcanza el tiempo límite. Finalmente, la columna llamada **# Óptimos** indica el total de soluciones óptimas que fueron alcanzadas por el método (sobre el grupo de 5 instancias).

De acuerdo con los resultados, es posible decir que los incrementos en el número de sensores disponibles conllevan a incrementos en el tiempo total que la red puede satisfacer los requerimientos de cobertura y conectividad. En la mayoría de los casos se observa un incremento en la vida útil de la red que es notorio aún cuando el número de objetivos ha incrementado en la misma proporción que el número de sensores.

Este comportamiento podría ser explicado también por el hecho que el incremento en el número de sensores desplegado sobre un área con las mismas dimensiones aumenta la conectividad de la red como consecuencia del incremento del número de conexiones que pueden ser establecidas entre sensores y entre sensores y objetivos. Por supuesto, como se esperaría, el incremento en el número de objetivos, manteniendo constante el número de sensores genera disminuciones en la duración total que puede proveer la red, considerando que, al menos en promedio, algunos objetivos pobremente cubiertos pueden limitar la duración máxima alcanzable con los sensores de la WSN.

En cuanto al rendimiento del método propuesto, se puede observar que este logró obtener la solución óptima para 178 de las 180 instancias estudiadas. El método tuvo problemas sólo en dos instancias, que compartían en común el tener el máximo tamaño considerado sobre el conjunto de instancias de prueba usadas para evaluar el método. Se observa que en la mayoría de los casos la solución se obtiene sin mayor problema dentro del tiempo límite impuesto. Adicionalmente, los resultados indican que existe una relación entre el número de rangos que pueden asumir los sensores y los incrementos del tiempo computacional. Por otro lado se apreció que para las instancias en las cuales se tienen ya sea 3 o 4 diferentes radios de sensibilidad el tiempo computacional incrementa notablemente al respecto de sus contrapartes de 1 y 2 rangos de sensibilidad. Esto, podría explicarse al considerar que los incrementos en el número de roles incrementan a su paso el tamaño del PA que, estando definido sobre variables de tipo binario, puede aumentar notoriamente el esfuerzo computacional requerido para su solución.

Las evaluaciones del método no permiten obtener claras conclusiones respecto a las variaciones en el número de iteraciones requeridas para resolver el problema. En contraste, sí es posible observar que esté muestra una tendencia a incrementar a la par que lo hace el número de rangos de sensibilidad. Una posible explicación para este fenómeno podría derivarse del hecho que, junto con el incremento del número de roles, se da un incremento en el número total de columnas que podrían usarse para extender la vida de la red y el proceso de encontrar nuevas columnas en cada iteración podría requerir de una exploración de un espacio de soluciones cada vez más grande que, a su vez, puede conllevar a un mayor esfuerzo computacional.

IV. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

En este artículo se explora el problema de maximización de la vida útil en redes de sensores inalámbricos con sensores de rango de sensibilidad ajustable. Con este fin, se propone la adopción de un método híbrido que

se basa en un esquema generación de columnas que, mediante la implementación de un enfoque Branch & Cut, genera, de forma eficiente, nuevas columnas que permiten maximizar la vida de la red. .

De acuerdo con los resultados, el método propuesto constituye una estrategia eficiente para computar la vida duración máxima alcanzable en redes de sensores inalámbricas provista de sensores con rangos de sensibilidad ajustables. Los modelos propuestos poseen la suficiente flexibilidad para ser adaptados a situaciones diferentes de las presentadas en este artículo. Adicionalmente, el método puede generalizarse para cubrir casos más simples como aquellos que no consideran ni el rango de sensibilidad ajustable (asumiendo un único rol) ni las restricciones de conectividad, asumiendo que el radio de comunicación $R_c = \infty$.

Existen muchas variaciones posibles que podrían ser introducidas en el método propuesto con el fin de extender su uso a otros contextos, bastante similares, e incluso a situaciones más complejas. Como trabajo futuro, se propone explorar el rendimiento del método en problemas de redes de sensores inalámbricos direccionales, como el explorado en Rossi *et al.* [24] extendiéndolo además a situaciones en las cuales la restricción de conectividad está presente. Este modelo podría ser usado para el caso en el que varios tipos de sensores están disponibles o en el cual los sensores puedan asumir diferentes funciones, activando diferentes módulos de monitoreo, a lo largo de la vida útil de la red. Las investigaciones futuras podrán ser orientadas a determinar el rendimiento del modelo propuesto en los contextos ya mencionados y la combinación con métodos (meta)heurísticos que puedan potencializar su operación, permitiéndole obtener soluciones de una forma más eficiente.

REFERENCIAS

- [1] E. S. Biagioni and K. Bridges, "The application of remote sensor technology to assist the recovery of rare and endangered species," *International Journal of High Performance Computing Applications*, vol. 16, no. 3, pp. 315–324, 2002.
- [2] T. Bokareva, W. Hu, S. Kanhere, B. Ristic, N. Gordon, T. Bessell, M. Rutten, and S. Jha, "Wireless sensor networks for battlefield surveillance," in *Proceedings of the land warfare conference*, 2006.
- [3] D. Chen, Z. Liu, L. Wang, M. Dou, J. Chen, and H. Li, "Natural disaster monitoring with wireless sensor networks: A case study of data-intensive applications upon low-cost scalable systems," *Mobile Networks and Applications*, vol. 18, no. 5, pp. 651–663, 2013.
- [4] W. Dargie and C. Poellabauer, *Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice*, ser. Wireless Communications and Mobile Computing, Sep. 2010.
- [5] E. Gaura, L. Girod, J. Brusey, M. Allen, and G. Challen, Eds., *Wireless sensor network: Deployments and Design Framework*. Springer, 2010.

- [6] S. Kim, S. Pakzad, D. Culler, J. Demmel, G. Fenves, S. Glaser, and M. Turon, "Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks," in *Information Processing in Sensor Networks, 2007. IPSN 2007. 6th International Symposium on*. IEEE, 2007, pp. 254–263.
- [7] G. Werner-Allen, K. Lorincz, M. Ruiz, O. Marcillo, J. Johnson, J. Lees, and M. Welsh, "Deploying a wireless sensor network on an active volcano," *Internet Computing, IEEE*, vol. 10, no. 2, pp. 18–25, March 2006.
- [8] R. Cerulli, R. D. Donato, and A. Raiconi, "Exact and heuristic methods to maximize network lifetime in wireless sensor networks with adjustable sensing ranges," *European Journal of Operational Research*, vol. 220, no. 1, pp. 58 – 66, 2012.
- [9] H. Mohamadi, S. Salleh, and M. N. Razali, "Heuristic methods to maximize network lifetime in directional sensor networks with adjustable sensing ranges," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 46, pp. 26–35, 2014.
- [10] Y. Gu, Y. Ji, and B. Zhao, "Maximize Lifetime of Heterogeneous Wireless Sensor Networks with Joint Coverage and Connectivity Requirement," in *EmbeddedCom09: The Eighth International Conference on Embedded Computing*, Dalian, China, 2009, pp. 226–231.
- [11] F. Castaño, A. Rossi, M. Sevaux, and N. Velasco, "A column generation approach to extend lifetime in wireless sensor networks with coverage and connectivity constraints," *Computers & Operations Research*, p. Available online, 2014.
- [12] F. Carrabs, R. Cerulli, A. Raiconi *et al.*, "A hybrid exact approach for maximizing lifetime in sensor networks with complete and partial coverage constraints," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 58, pp. 12–22, 2015.
- [13] R. Cerulli, M. Gentili, and A. Raiconi, "Maximizing lifetime and handling reliability in wireless sensor networks," *Networks*, vol. 64, no. 4, pp. 321–338, 2014.
- [14] F. Castaño, E. Bourreau, N. Velasco, A. Rossi, and M. Sevaux, "Exact approaches for lifetime maximization in connectivity constrained wireless multi-role sensor networks," *European Journal of Operational Research*, vol. 241, no. 1, pp. 28–38, 2015.
- [15] S. Slijepcevic and M. Potkonjak, "Power efficient organization of wireless sensor networks," in *Communications, 2001. ICC 2001. IEEE International Conference on*, vol. 2. IEEE, 2002, pp. 472–476.
- [16] J. Jia, J. Chen, G. Chang, and Y. Wen, "Efficient Cover Set Selection in Wireless Sensor Networks," *Acta Automatica Sinica*, vol. 34, no. 9, pp. 1157–1162, 2008.
- [17] M. Gentili and A. Raiconi, " α -coverage to extend network lifetime on wireless sensor networks," *Optimization Letters*, vol. 7, no. 1, pp. 157–172, 2013.
- [18] Y. Gu, B.-H. Zhao, Y.-S. Ji, and J. Li, "Theoretical treatment of target coverage in wireless sensor networks," *Journal of Computer Science and Technology*, vol. 26, pp. 117–129, 2011.
- [19] M. Lu, J. Wu, M. Cardei, and M. Li, "Energy-Efficient Connected Coverage of Discrete Targets in Wireless Sensor Networks," in *Networking and Mobile Computing*, ser. Lecture Notes in Computer Science, vol. 3619, Zhangjiajie, China, 2005, pp. 43–52.
- [20] A. Singh, A. Rossi, and M. Sevaux, "Matheuristic approaches for q-coverage problem versions in wireless sensor networks," *Engineering Optimization*, vol. 45, no. 5, pp. 609–626, 2013.
- [21] M. Cardei, M. Thai, Y. Li, and W. Wu, "Energy-efficient target coverage in wireless sensor networks," in *INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE*, vol. 3. IEEE, 2005, pp. 1976–1984.
- [22] M. Cardei, J. Wu, and M. Lu, "Improving network lifetime using sensors with adjustable sensing ranges," *International Journal of Sensor Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 41–49, 2006.
- [23] S. Guha and S. Khuller, "Improved methods for approximating node weighted steiner trees and connected dominating sets," *Information and computation*, vol. 150, no. 1, pp. 57–74, 1999.
- [24] A. Rossi, A. Singh, and M. Sevaux, "Lifetime maximization in wireless directional sensor network," *European Journal of Operational Research*, vol. 231, no. 1, pp. 229–241, 2013.

Maximización de la Vida Útil en Redes de Sensores Inalámbricos con Rangos de Sensibilidad Ajustables mediante Generación de Columnas

Fabián Castaño*, Nubia Velasco[¶], André Rossi[‡] and Marc Sevaux[§]

* Facultad de Ingeniería industrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia
Email: fabian.castano@upb.edu.co

[¶] Facultad de Administración, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
Email: nvelasco@uniandes.edu.co

[‡] LERIA, Université de Angers, Angers, Francia
Email: andre.rossi@univ-angers.fr

[§] LabSTICC, Université de Bretagne-Sud, Lorient, Francia
Email: marc.sevaux@univ-ubs.fr

Resumen—En este trabajo se explora el problema de maximizar la vida útil de una red de sensores inalámbricos contando con sensores capaces de ajustar sus rangos de sensibilidad, modificando así su consumo energético. Este tipo de redes son usadas para monitorear objetos localizados en posiciones fijas. Además, se consideran restricciones sobre la conectividad de la red, en la cual los sensores que captan alguna señal deben ser capaces de transmitir la información a un usuario final mediante comunicaciones inalámbricas *multi-hop*. Se propone un esquema híbrido de solución basado en generación de columnas que aprovecha la representación casi natural del problema mediante un modelo lineal construido sobre un número exponencial de variables. El método propuesto divide el problema entre un problema auxiliar y un problema maestro. El primero se encarga de determinar los rangos de sensibilidad asignados a cada sensor en subgrupos satisfaciendo requerimientos de conectividad. Por su lado, el problema maestro determina el tiempo total que un subgrupo dado de sensores, representado además en las columnas del modelo lineal, debe operar con el fin de maximizar la vida de la red. Para resolver el problema auxiliar, se propone un nuevo modelo de programación entero basado en un conjunto exponencial de cortes que, correctamente implementado, permite identificar nuevas columnas rápidamente mediante la aplicación de un enfoque *Branch & Cut*. El enfoque propuesto es evaluado en un conjunto de instancias de tamaño mediano con hasta 300 sensores y 180 objetivos. Los resultados preliminares indican la eficacia del método propuesto y sugieren también nuevas posibilidades para su aplicación a redes de sensores con tecnologías similares.

de dispositivos electrónicos, llamados sensores, que incorporan tecnologías para el monitoreo y registro de señales acústicas, visuales, térmicas, entre otras, y para retransmitir los datos al usuario final (o estación base) mediante señales electromagnéticas inalámbricas.

En recientes años se ha experimentado un notorio crecimiento en el número de aplicaciones de las WSN. Algunas de sus principales aplicaciones se encuentran en entornos industriales, monitoreo medioambiental, detección de fuegos forestales y seguimiento de especies animales en su habitat [1]–[7].

Algunas aplicaciones requieren que las WSN operen de manera autónoma, por ejemplo cuando están ubicadas en zonas hostiles. Si los sensores no se encuentran provistos de unidades de almacenamiento de información o su capacidad de almacenamiento es muy limitada, si se encuentran ubicados en zonas distantes o la información es requerida en línea, justo cuando está disponible, la conectividad representa un asunto importante que debe ser considerado. Este requerimiento se satisface cuando un sensor activo, que es usado para monitorear señales y (re)transmitirlas, es capaz de encontrar un camino, compuesto por otros sensores activos, que permite enviar la información al usuario final (o estación base).

Las WSN pueden ser desplegadas de forma aleatoria, desde un avión, helicóptero o un drón, de tal forma que conforman redes no estructuradas en las cuales ni la ubicación de los sensores ni la topología de la red pueden ser definidas de antemano. Éste último aspecto supone desafíos no convencionales y motiva la necesidad de determinar formas de usar de manera eficiente los

I. INTRODUCCIÓN

Las redes de sensores inalámbricos (WSN por sus siglas en inglés) están conformadas por un conjunto

recursos presentes en los sensores, en especial la limitada energía disponible.

La capacidad de la batería ha sido y continua siendo uno de los aspectos más relevantes al momento de llevar al campo de acción los sensores inalámbricos en aplicaciones de monitoreo. Este problema empeora cuando los sensores están ubicados en zonas remotas o inaccesibles y la energía debe ser administrada *in situ*, después de que los sensores sean desplegados. En estos casos, estrategias como la programación y asignación de tareas a los sensores, la estructuración de rutas de transmisión eficientes, entre otras, pueden ser adaptadas de tal forma que la energía de los sensores puede explotarse eficientemente y las WSN puedan usarse para monitorear las señales interesantes por tiempos más largos.

Dependiendo del tipo de sensor considerado, los dispositivos puede estar en capacidad de modificar su estado una vez activos, asumir diferentes papeles en la red e inclusive modificar la tasa a la cual consumen energía, en respuesta a la tarea que estos llevan a cabo. En este artículo se consideran sensores que poseen la capacidad de modificar sus radios de sensibilidad, y así la potencia suministrada a sus módulos de detección, disminuyendo de esta forma el consumo de energía [8], [9]. La Figura 1 esquematiza dos posible modos de operación para un sensor capaz de asumir multiples rangos de sensibilidad. Cuando el sensor opera en el modo de consumo energía más bajo, el área que puede cubrir se limita a la circunferencia definida alrededor del sensor dentro del radio r_a permitiéndole monitorear únicamente el objetivo κ_1 , sí el sensor asume el modo de consumo de energía más alto (r_b) su área de cobertura es mayor y el sensor puede monitorear tanto el objetivo κ_1 como el κ_2 . Sin importar el radio de sensibilidad que el sensor asuma, un sensor activo puede establecer comunicación únicamente con otros sensores que se encuentren dentro de su radio de comunicación (señalado por una línea punteada en la Figura 1).

Con el fin de mejorar la eficiencia en el uso de la energía de una WSN, es posible determinar un plan para la utilización de los sensores en el cual se fijen no sólo los intervalos de tiempo durante los cuales estos operarán, sino también los rangos de detección que estos asumirán durante dichos intervalos. De esta forma, es posible aplicar estrategias de optimización que permitan extender al máximo posible el tiempo durante el cual la red puede cumplir sus labores de monitoreo y transmitir sus detecciones a la estación base.

El método de generación de columnas (CG) ha demostrado ser una estrategia interesante para dar solución a los problemas de optimización del uso de la energía en WSN [10], [11]. Grandes contribuciones han sido desarrolladas recientemente en este campo, demostrando la flexibilidad que este enfoque ofrece para lidiar con la diversidad de

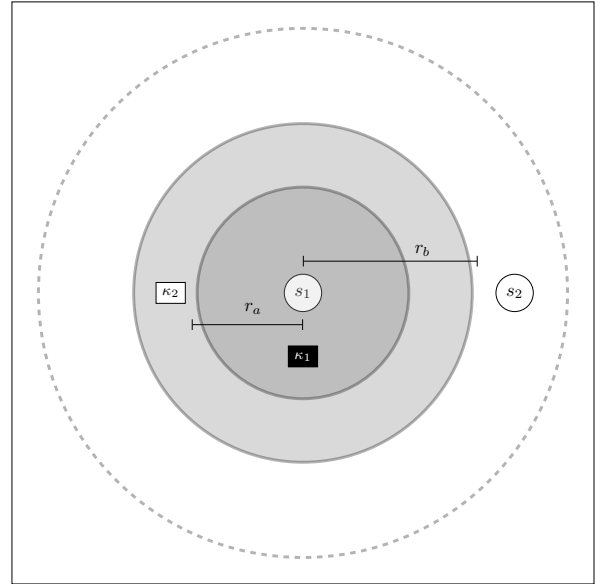


Figura 1: Un modelo sencillo para representar los diferentes rangos de cubrimiento en 2 dimensiones

características de la operación que son observados en este tipo de redes [11]–[14]. Algunos resultados indican, sin embargo, que el modelo del subproblema y en ocasiones el método de solución, usado para identificar nuevas columnas puede requerir modificaciones severas.

En este artículo se explora el uso de métodos de optimización exactos para maximizar la vida útil en redes de sensores inalámbricos. Con este fin, se propone un enfoque basado en generación de columnas que divide el problema entre dos tipos de decisiones. Asumiendo que es posible conocer todas las posibles formas de estructurar la red asignando tareas o roles a los sensores, y garantizando que se satisface el requerimientos de conectividad, el primer tipo de decisiones consiste en determinar nuevas configuraciones de la red, obtenidas al asignar roles para un conjunto de sensores, que puedan ser adoptadas extendiendo la vida de la red. El segundo grupo de decisiones consiste en asignar el intervalo de tiempo durante el cual tales estructuras operarán de tal forma que se maximice el tiempo total durante el cual la red opera.

El artículo está estructurado en cuatro secciones. La Sección II presenta una revisión sistemática de estrategias previamente propuestas para resolver problemas similares, ofrece una descripción completa del problema y el modelamiento matemático adoptado en este artículo para resolverlo. La estructura del proceso de solución basado en generación de columnas es presentada en la Sección III al igual que los métodos usados para incrementar la eficiencia a la hora de resolver el problema. Los resultados computacionales preliminares y

la discusión son introducidos en la Sección IV.

II. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y TRABAJO RELACIONADO

Desde la aparición de las WSN, muchas estrategias han sido propuestas con el fin de optimizar el uso de su energía y maximizar su vida útil (*i.e.* el tiempo durante el cual pueden satisfacer los requerimientos de cubrimiento y conectividad). En el caso en el cual más sensores de los necesarios son desplegados, dos estrategias basadas en la activación selectiva de subgrupos de sensores predominan: *i)* Selección de subconjuntos disyuntos [15], [16] *ii)* Selección de subconjuntos no disyuntos [17]–[20]. En el primer caso se asume que una vez un subconjunto de sensores es seleccionado este continúa su operación hasta que la batería de los sensores que forman parte de él es agotada y los sensores pierden utilidad. En el caso de los subconjuntos no disyuntos un sensor puede aparecer en diferentes subconjuntos y, al final, la programación de las activaciones para cada subgrupo debe respetar la capacidad de la batería de cada uno de los sensores que lo conforman.

Este artículo considera la adopción de un enfoque usando subconjuntos no disyuntos de sensores. De esta forma, se propone determinar una programación de la operación para los subgrupos de sensores que maximice el tiempo durante el cual la WSN puede satisfacer los requerimientos de cubrimiento y conectividad demandados por la aplicación. Con este propósito, se propone adaptar el enfoque de solución general basado en generación de columnas propuesto en Castaño *et al.* [14], a uno que tiene el potencial de representar una gama amplia de características de la operación de los sensores. Al igual que en las aplicaciones clásicas de CG el problema es dividido en dos: *i)* En primer lugar se considera un problema maestro (PM), que es usado para determinar la asignación de los tiempos de operación de subconjuntos de sensores capaces de garantizar las restricciones requeridas y *ii)* un problema auxiliar (PA) usado para identificar subconjuntos adicionales que, además de garantizar la factibilidad, tienen potencial para ser usados con el fin de extender la vida de la red. Con este último fin, se propone un modelo general de solución para el PA que puede ser fácilmente aplicado en la solución de problemas clásicos de optimización del uso de la energía y maximización de la vida útil en redes de sensores inalámbricos.

Consideremos para empezar que se cuenta con un conjunto de sensores $\mathcal{S} = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_m\}$ capaces de modificar sus tasas de consumo de energía al reducir sus radios de sensibilidad y consecuentemente, las áreas que cubren. Los sensores son usados para monitorear el conjunto de objetivos $\mathcal{K} = \{\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \dots, \kappa_n\}$ y transmitir la información colectada hasta la estación base β_0 usando

señales inalámbricas que pasan a través de un camino compuesto exclusivamente por sensores activos. Por supuesto, con el fin de garantizar que la transmisión puede establecerse entre dos sensores s_u y s_v , la distancia entre estos no puede sobrepasar el radio de comunicación R_c .

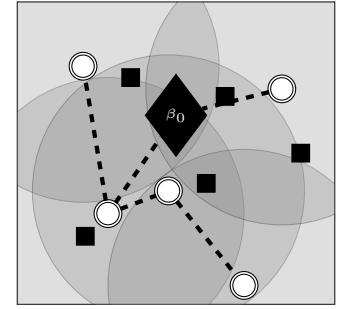
Cada sensor es capaz de asumir un número (no necesariamente finito) de rangos de sensibilidad modificado su tasa de consumo de energía. El conjunto $\mathcal{R} \in \{r_1, r_2, r_3, \dots, r_l\}$ denota los posibles modos de operación o rangos de sensibilidad de cada sensor, donde r_1 es un modo de bajo consumo de energía en el que el sensor no es usado ni para proveer cubrimiento ni para (re)transmitir las señales recibidas. Es posible usar el parámetro binario $a_{r\kappa_v}^{s_u}$ para indicar si el sensor s_u ajustado en el rango de sensibilidad $r \in \mathcal{R}$ puede usarse para monitorear el objetivo κ_v ($a_{r\kappa_v}^{s_u} = 1$). Otro parámetro $e_{rj}^{s_u}$ designa la tasa de consumo de energía del sensor s_u cuando este asume el rol $r \in \mathcal{R}$ en una asignación $j \in \Omega$, donde Ω corresponde al conjunto de todas las asignaciones factibles de roles a los sensores, es decir, asignaciones que satisfacen los requerimientos de cobertura y conectividad. La Figura 2 presenta tres posibles asignaciones de roles a los sensores. Las Figuras 2a y 2b muestran asignaciones factibles, que satisfacen los requerimientos de cobertura y conectividad. Por su parte, la Figura 2c muestra una asignación infactible que, aunque satisface el criterio de conectividad, no satisface el criterio de cobertura.

II-A. Capacidad de la batería y vida útil de la red

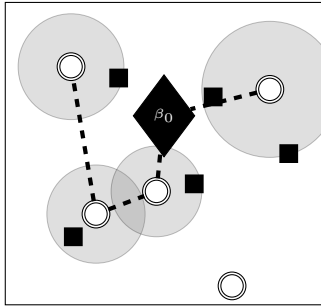
Gu *et al.* [18] proveen un modelo sencillo e interesante que permite representar la vida útil de una red de sensores inalámbricos y que es independiente de las características técnicas de los sensores considerados. Asumiendo, sin pérdida de generalidad, que los sensores están provistos de una batería con una carga inicial b_{s_u} y que estos poseen la información sobre los objetivos que están cubriendo. Denotemos, además, por $U_{\kappa_i} \subseteq \mathcal{S}$ al subconjunto de sensores que pueden monitorear el objetivo κ_i . La función indicadora $x_{s_u}(t)$ toma el valor 1 cuando el sensor s_u se encuentra monitoreando el objetivo κ_k en el instante t . De forma similar, la función $e_{s_u}(t)$ indica la energía total consumida por el sensor s_u en el instante t . Si es necesario garantizar que cada objetivo sea monitoreado a lo largo de la vida de la red, es posible, usando nuestras previas definiciones, imponer el siguiente conjunto de restricciones:

$$\sum_{s_u \in U_{\kappa_k}} x_{s_u r}(t) \geq 1 \quad \forall \kappa_k \in \mathcal{K} \quad (1)$$

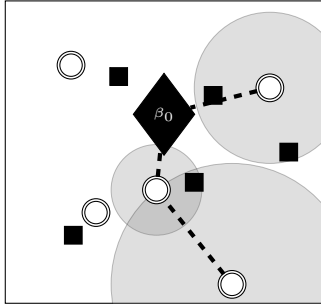
Ahora, considerando que la vida útil de los sensores está limitada por la capacidad de su batería, es posible



(a) Red con sensores activos a la tasa de consumo de energía máxima



(b) Red con sensores activos a una tasa de consumo de energía ajustada a las necesidades



(c) Asignación infactible de roles a los sensores

Figura 2: Diferentes asignaciones de roles a los sensores en WSN

adicionar una restricción sobre el máximo tiempo que cada sensor s_u es usado durante la vida total de la red (T). Dicha restricción puede ser representada considerando el consumo acumulado de energía como se muestra en la Ecuación (2).

$$\int_0^T x_{s_u}(t) e_{s_u}(t) dt \leq b_{s_u} \quad (2)$$

Cualquier programación de la activación de los sensores debe garantizar que ambas restricciones se respetan, sin importar cuál sea el objetivo (ya sea maximizar la vida de la red u otro). Además, características extra como resiliencia, cubrimiento redundante o parcial, entre

otros, pueden ser adicionados al anterior modelo ya sea modificando las ecuaciones previas o agregando nuevas que se ajusten a las características de la red.

II-B. Modelo matemático

Como se mencionó previamente, con el fin de extender la vida de la red, un enfoque que ha probado ser útil consiste en dividir la red en subgrupos de sensores, en los cuales cada sensor tiene un rol asignado, y programar su operación eficientemente [17]–[22]. De esta forma, únicamente los sensores con un rol asignado son considerados activos y son usados para monitorear y/o (re)transmitir información. Finalmente, la vida de la red puede ser maximizada si el tiempo asignado a los subgrupos toma en cuenta las limitaciones de batería y se considera de forma global la información disponible para generar asignaciones óptimas que logre alcanzar dicho objetivo.

Si t_j representa el tiempo total asignado a los sensores en un grupo $C_j \in \Omega$ y C_j representa una asignación factible de roles a los sensores, es posible proveer un modelo lineal, basado en las Ecuaciones (1) y (2), para computar el tiempo que se debe asignar a cada subgrupo con el objetivo de maximizar la vida de la red a través de la identificación de los pares (C_j, t_j) .

$$\text{Maximizar: } \sum_{j|C_j \in \Omega} t_j \quad (3)$$

$$\sum_{j|C_j \in \Omega} \sum_{r \in \mathcal{R}} (e_{s_u r}^j) t_j \leq b_{s_u} \quad \forall s_u \in \mathcal{S} \quad (4)$$

$$t_j \geq 0 \quad \forall j|C_j \in \Omega \quad (5)$$

El objetivo consiste en maximizar el tiempo total que la red opera. Considerando que cada subgrupo C_j opera independientemente de los demás, dicho objetivo se consigue maximizando la suma de los tiempos que se asigna a cada uno de los subgrupos (Ecuación 3). Las restricciones (4) son usadas para garantizar que el tiempo asignado a cada subgrupo, que tiene implícita la asignación de roles, no sobrepasa la capacidad de la batería de cada uno de los sensores. Por supuesto, las variables relacionadas con el tiempo asignado a cada grupo son continuas y lineales (Ecuación 5).

II-C. Un método basado en Generación de Columnas

El modelo representado por las Ecuaciones (3-5) es lineal, bastante simple, y lo suficientemente flexible para ser adaptado a una gran cantidad de situaciones diferentes en cuanto a las especificaciones técnicas de los sensores considerados. En contraste, el modelo asume

que el conjunto Ω de asignaciones factibles de roles a los sensores se conoce, una situación que, en la práctica, luce improbable o impracticable. De hecho, puede demostrarse que dicho conjunto crece de forma exponencial con el incremento del número de sensores y del número de roles que dichos dispositivos puedan asumir. Así, puede ser inviable, además de innecesario (salvo en algunos casos), tratar de enumerar todos y cada uno de los subgrupos que forman parte de Ω .

Un enfoque, ahora clásico, para dar respuesta a dicha problemática, consiste en la adopción del método de generación de columnas para solucionar el problema de maximización de la vida útil en redes de sensores inalámbricos. Cuando este es el caso, es posible enumerar subgrupos de sensores que pueden ser representados mediante las asignaciones de energía de acuerdo con sus roles y constituir columnas en el modelo constituido por las Ecuaciones (3 – 5) con miras a la construcción de dicho problema maestro. El modelo planteado recae en un conjunto inicial de subgrupos $\Omega' \in \Omega$ que posteriormente puede ser enriquecido al encontrar nuevas columnas que puedan contribuir a extender la vida de la red. Al igual que en cualquier implementación del método de generación de columnas, el criterio usado para generar nuevas columnas C_j es el de los costos reducidos. En el caso que tales columnas existan, estas se adicionan al conjunto $\Omega' \leftarrow \Omega \cup C_j$ y un nuevo problema maestro (Ecuaciones 3 – 5) se obtiene. En el caso que pueda demostrarse que no exista una nueva columna con costos reducidos positivos, es posible garantizar que el proceso alcanzó la solución óptima y es posible detener el proceso de generación de columnas. Una representación sencilla del método de generación de columnas se presenta en la Figura 3.

Si alguna solución de partida está disponible, se constituye un subconjunto inicial desde el cual es posible plantear un PM inicial y dar paso al proceso de generación de columnas. En el caso en el que no existan soluciones iniciales disponibles, es posible inicializar el conjunto Ω con una única columna representando la asignación máxima de energía a cada uno de los sensores en las WSN.

II-D. Método Branch & Cut para generar nuevas columnas

Por desgracia, el proceso de identificar nuevos subgrupos de sensores, rentables para extender la vida de la red, corresponde a un problema de difícil solución. En algunas de sus versiones más simples, este problema puede verse como el problema del árbol de Steiner con pesos en los nodos, un problema clásico categorizado en la literatura como NP-Hard [23]. Así las cosas, con el fin de dar respuesta a esta situación y mantener el método operando de forma eficiente, es necesario

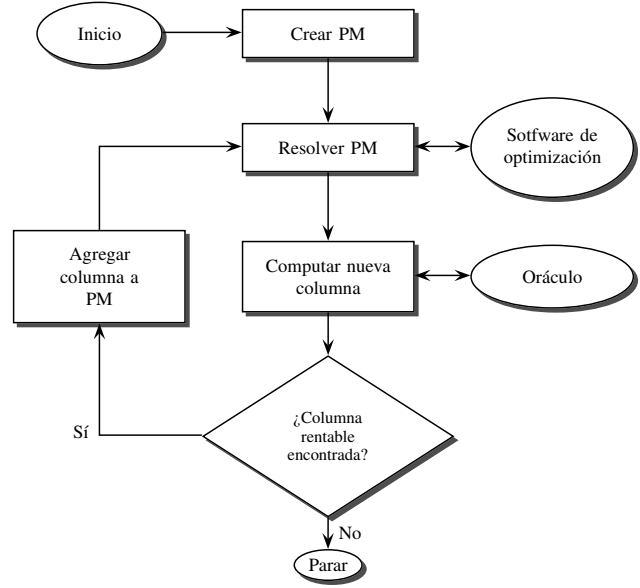


Figura 3: Método de generación de columnas

proveer métodos que permitan determinar rápidamente nuevas columnas (que puedan contribuir a mejorar la función objetivo).

El proceso iterativo que se lleva a cabo en la ejecución del método de generación de columnas, consistirá entonces en identificar nuevas columnas C_j (correspondientes a su vez a asignaciones de roles a los sensores) para las cuales se pueda determinar un intervalo de tiempo t_j para su operación óptima. La identificación de dichas columnas se hace bajo el criterio de los costos reducidos que permite determinar si una solución es óptima o existe una nueva columna que, incluida en el modelo, podría contribuir a la mejora de la función objetivo del PM. Sea $x_{s_u r}^j$ una variable binaria que toma el valor 1 si el sensor s_u asume el rol r en la asignación $C_j \in \Omega$. La variable, también binaria, $y_{s_u}^j$ indica que el sensor s_u está activo, en un rol diferente a r_1 , y es usado para el monitoreo de objetivos y la transmisión de la información a la estación base o a otros sensores ubicados dentro de su rango de comunicación. El siguiente modelo (PA) es usado para determinar una asignación de roles a los sensores que maximice la función de costos reducidos y pueda ser usada para constituir una nueva columna que pueda generar incrementos de la función objetivo.

$$\text{Maximizar } j : 1 - \sum_{s_u \in \mathcal{S}} \sum_{r \in \mathcal{R}} e_{s_u r}^j x_{s_u r}^j w_{s_u}^j \quad (6)$$

Sujeto a:

$$\sum_{s_u \in \mathcal{S}} \sum_{r \in \mathcal{R}} a_{s_u k r} x_{s_u r} \geq 1 \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{r \in \mathcal{R} \setminus r_1} x_{s_u r}^j = y_{s_u}^j \quad \forall s_u \in \mathcal{S} \quad (8)$$

$$\sum_{s_u \in c} y_{s_u}^j \leq |c| \quad \sum_{s_v \in \mathcal{S} \setminus c | \exists a(s_u, s_v), s_u \in c} y_{s_v}^j \quad \forall c \in CC | sink \notin c \quad (9)$$

$$x_{s_u r}^j \in \{0, 1\} \quad \forall s_u \in \mathcal{S}, r \in \mathcal{R} \quad (10)$$

$$y_{s_u}^j \in \{0, 1\} \quad \forall s_u \in \mathcal{S} \quad (11)$$

El modelo representado por las Ecuaciones (6-11) establece la asignación de roles a los sensores que maximiza los costos reducidos (Ecuación 6). La Ecuación (7) obliga las soluciones a satisfacer el requerimiento de cobertura para cada sensor. Mediante la Ecuación (8) se establece una relación entre los roles que juegan los sensores en la red y las variables y_{s_u} usadas como apoyo para obligar al modelo a respetar los requerimientos de conectividad. Finalmente, la conectividad es obligada mediante un conjunto de tamaño exponencial de restricciones (9) que obliga a cualquier componente conexas, que no contenga la estación base, a establecer una conexión con algún otro sensor que permita transferir la información a la estación base o usuario final.

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con el fin de poner a prueba el rendimiento del método se ha generado un conjunto de 180 instancias aleatoriamente construidas que permite evaluar el esfuerzo computacional requerido para computar la vida máxima de una red de sensores inalámbricos operando bajo las características dadas. Las instancias fueron generadas con un número de sensores en $|\mathcal{S}| = \{100, 200, 300\}$, y un número de objetivos $|\mathcal{K}|$ que varía entre 0.15, 0.3 y 0.6 veces el número de sensores en la red. Se asume que los sensores se encuentran aleatoriamente distribuidos en un área de 100×100 con una única estación base ubicada en el centro. Para cada combinación del número de sensores y objetivos, se varió el número posible de roles (radios de sensibilidad) entre 1 y 4 y se generaron 5 instancias para dicha combinación de parámetros. Se asume un modelo de consumo de energía que incrementa de forma lineal con la distancia y para el cual el máximo consumo corresponde a una unidad de energía por unidad de tiempo. Finalmente, se asume que los sensores son idénticos y poseen una carga inicial en su batería $b_{s_v} = 1$. En todos los casos se asume que el máximo radio de sensibilidad es 20 y el radio fijo de comunicación es $R_c = 30$.

Los métodos acá propuestos fueron desarrollados en c++ usando GUROBI V 6.0 como motor de optimización. Los experimentos se llevaron a cabo en un equipo provisto de un procesador Intel I5 acompañado de 4GB de memoria RAM. En todos los casos las restricciones de

Cuadro I: Resultados computacionales y Discusión

$ \mathcal{R} $	$ \mathcal{S} $	$ \mathcal{K} $	Objetivo	Tiempo (s)	# Iteraciones	# Óptimos
1	100	15	4.60	0.40	57.20	5
		30	4.00	0.00	38.20	5
		60	3.20	0.20	26.20	5
	200	30	9.80	1.80	178.60	5
		60	8.40	1.60	127.60	5
		120	6.40	1.00	60.40	5
	300	45	13.80	5.00	277.80	5
		90	11.40	3.80	208.40	5
		180	12.80	6.80	224.00	5
2	100	15	7.03	0.40	71.00	5
		30	5.29	0.20	41.80	5
		60	4.58	0.40	41.20	5
	200	30	16.01	3.80	243.40	5
		60	11.30	1.60	94.20	5
		120	10.05	3.20	126.20	5
	300	45	23.11	9.80	396.20	5
		90	17.65	5.20	181.00	5
		180	21.42	137.80	840.80	5
3	100	15	8.14	0.80	90.00	5
		30	5.84	0.40	46.80	5
		60	4.71	0.20	34.40	5
	200	30	19.44	8.00	353.60	5
		60	14.03	2.80	145.80	5
		120	10.96	21.00	289.00	5
	300	45	28.66	13.20	452.40	5
		90	22.19	10.20	271.80	5
		180	25.01	811.00	1472.00	4
4	100	15	9.85	1.00	110.40	5
		30	6.31	0.60	59.00	5
		60	5.81	1.00	81.80	5
	200	30	22.31	17.40	532.60	5
		60	16.28	8.40	250.00	5
		120	11.88	38.00	375.60	5
	300	45	33.25	24.40	614.40	5
		90	24.58	19.20	374.00	5
		180	27.28	859.40	1662.80	4

corte fueron adicionadas durante el proceso de *Branch-and-Bound* implementado por el software de optimización y se impuso un tiempo limite de ejecución de 3600 segundos, después del cual la mejor solución obtenida se retorna.

El Cuadro I resume los resultados encontrados en los experimentos llevados a cabo. Las columnas $|\mathcal{R}|$, $|\mathcal{S}|$, $|\mathcal{K}|$ indican el número de roles, el número total de sensores y el total de objetivos, respectivamente, para cada grupo de instancias evaluado. Cada línea representa los resultados promedio obtenidos para el grupo de 5 instancias, en términos de la vida útil de la red, con la columna llamada **Objetivo**, del tiempo computacional (columna **Tiempo**) y del número total de iteraciones (columna **# Iteraciones**) ejecutadas por el método hasta que este finaliza el proceso de optimización o alcanza el tiempo límite. Finalmente, la columna llamada **# Óptimos** indica el total de soluciones óptimas que fueron alcanzadas por el método (sobre el grupo de 5 instancias).

De acuerdo con los resultados, es posible decir que los incrementos en el número de sensores disponibles conllevan a incrementos en el tiempo total que la red puede satisfacer los requerimientos de cobertura y conectividad. En la mayoría de los casos se observa un incremento en la vida útil de la red que es notorio aún cuando el número de objetivos ha incrementado en la misma proporción que el número de sensores.

Este comportamiento podría ser explicado también por el hecho que el incremento en el número de sensores desplegado sobre un área con las mismas dimensiones aumenta la conectividad de la red como consecuencia del incremento del número de conexiones que pueden ser establecidas entre sensores y entre sensores y objetivos. Por supuesto, como se esperaría, el incremento en el número de objetivos, manteniendo constante el número de sensores genera disminuciones en la duración total que puede proveer la red, considerando que, al menos en promedio, algunos objetivos pobremente cubiertos pueden limitar la duración máxima alcanzable con los sensores de la WSN.

En cuanto al rendimiento del método propuesto, se puede observar que este logró obtener la solución óptima para 178 de las 180 instancias estudiadas. El método tuvo problemas sólo en dos instancias, que compartían en común el tener el máximo tamaño considerado sobre el conjunto de instancias de prueba usadas para evaluar el método. Se observa que en la mayoría de los casos la solución se obtiene sin mayor problema dentro del tiempo límite impuesto. Adicionalmente, los resultados indican que existe una relación entre el número de rangos que pueden asumir los sensores y los incrementos del tiempo computacional. Por otro lado se apreció que para las instancias en las cuales se tienen ya sea 3 o 4 diferentes radios de sensibilidad el tiempo computacional incrementa notablemente al respecto de sus contrapartes de 1 y 2 rangos de sensibilidad. Esto, podría explicarse al considerar que los incrementos en el número de roles incrementan a su paso el tamaño del PA que, estando definido sobre variables de tipo binario, puede aumentar notoriamente el esfuerzo computacional requerido para su solución.

Las evaluaciones del método no permiten obtener claras conclusiones respecto a las variaciones en el número de iteraciones requeridas para resolver el problema. En contraste, sí es posible observar que éste muestra una tendencia a incrementar a la par que lo hace el número de rangos de sensibilidad. Una posible explicación para este fenómeno podría derivarse del hecho que, junto con el incremento del número de roles, se da un incremento en el número total de columnas que podrían usarse para extender la vida de la red y el proceso de encontrar nuevas columnas en cada iteración podría requerir de una exploración de un espacio de soluciones cada vez más grande que, a su vez, puede conllevar a un mayor esfuerzo computacional.

IV. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

En este artículo se explora el problema de maximización de la vida útil en redes de sensores inalámbricos con sensores de rango de sensibilidad ajustable. Con este fin, se propone la adopción de un método híbrido que

se basa en un esquema generación de columnas que, mediante la implementación de un enfoque Branch & Cut, genera, de forma eficiente, nuevas columnas que permiten maximizar la vida de la red. .

De acuerdo con los resultados, el método propuesto constituye una estrategia eficiente para computar la vida duración máxima alcanzable en redes de sensores inalámbricas provista de sensores con rangos de sensibilidad ajustables. Los modelos propuestos poseen la suficiente flexibilidad para ser adaptados a situaciones diferentes de las presentadas en este artículo. Adicionalmente, el método puede generalizarse para cubrir casos más simples como aquellos que no consideran ni el rango de sensibilidad ajustable (asumiendo un único rol) ni las restricciones de conectividad, asumiendo que el radio de comunicación $R_c = \infty$.

Existen muchas variaciones posibles que podrían ser introducidas en el método propuesto con el fin de extender su uso a otros contextos, bastante similares, e incluso a situaciones más complejas. Como trabajo futuro, se propone explorar el rendimiento del método en problemas de redes de sensores inalámbricos direccionales, como el explorado en Rossi *et al.* [24] extendiéndolo además a situaciones en las cuales la restricción de conectividad está presente. Este modelo podría ser usado para el caso en el que varios tipos de sensores están disponibles o en el cual los sensores puedan asumir diferentes funciones, activando diferentes módulos de monitoreo, a lo largo de la vida útil de la red. Las investigaciones futuras podrán ser orientadas a determinar el rendimiento del modelo propuesto en los contextos ya mencionados y la combinación con métodos (meta)heurísticos que puedan potencializar su operación, permitiéndole obtener soluciones de una forma más eficiente.

REFERENCIAS

- [1] E. S. Biagioni and K. Bridges, "The application of remote sensor technology to assist the recovery of rare and endangered species," *International Journal of High Performance Computing Applications*, vol. 16, no. 3, pp. 315–324, 2002.
- [2] T. Bokareva, W. Hu, S. Kanhere, B. Ristic, N. Gordon, T. Bessell, M. Rutten, and S. Jha, "Wireless sensor networks for battlefield surveillance," in *Proceedings of the land warfare conference*, 2006.
- [3] D. Chen, Z. Liu, L. Wang, M. Dou, J. Chen, and H. Li, "Natural disaster monitoring with wireless sensor networks: A case study of data-intensive applications upon low-cost scalable systems," *Mobile Networks and Applications*, vol. 18, no. 5, pp. 651–663, 2013.
- [4] W. Dargie and C. Poellabauer, *Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice*, ser. Wireless Communications and Mobile Computing, Sep. 2010.
- [5] E. Gaura, L. Girod, J. Brusey, M. Allen, and G. Challen, Eds., *Wireless sensor network: Deployments and Design Framework*. Springer, 2010.

- [6] S. Kim, S. Pakzad, D. Culler, J. Demmel, G. Fenves, S. Glaser, and M. Turon, "Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks," in *Information Processing in Sensor Networks, 2007. IPSN 2007. 6th International Symposium on*. IEEE, 2007, pp. 254–263.
- [7] G. Werner-Allen, K. Lorincz, M. Ruiz, O. Marcillo, J. Johnson, J. Lees, and M. Welsh, "Deploying a wireless sensor network on an active volcano," *Internet Computing, IEEE*, vol. 10, no. 2, pp. 18–25, March 2006.
- [8] R. Cerulli, R. D. Donato, and A. Raiconi, "Exact and heuristic methods to maximize network lifetime in wireless sensor networks with adjustable sensing ranges," *European Journal of Operational Research*, vol. 220, no. 1, pp. 58 – 66, 2012.
- [9] H. Mohamadi, S. Salleh, and M. N. Razali, "Heuristic methods to maximize network lifetime in directional sensor networks with adjustable sensing ranges," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 46, pp. 26–35, 2014.
- [10] Y. Gu, Y. Ji, and B. Zhao, "Maximize Lifetime of Heterogeneous Wireless Sensor Networks with Joint Coverage and Connectivity Requirement," in *EmbeddedCom09: The Eighth International Conference on Embedded Computing*, Dalian, China, 2009, pp. 226–231.
- [11] F. Castaño, A. Rossi, M. Sevaux, and N. Velasco, "A column generation approach to extend lifetime in wireless sensor networks with coverage and connectivity constraints," *Computers & Operations Research*, p. Available online, 2014.
- [12] F. Carrabs, R. Cerulli, A. Raiconi *et al.*, "A hybrid exact approach for maximizing lifetime in sensor networks with complete and partial coverage constraints," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 58, pp. 12–22, 2015.
- [13] R. Cerulli, M. Gentili, and A. Raiconi, "Maximizing lifetime and handling reliability in wireless sensor networks," *Networks*, vol. 64, no. 4, pp. 321–338, 2014.
- [14] F. Castaño, E. Bourreau, N. Velasco, A. Rossi, and M. Sevaux, "Exact approaches for lifetime maximization in connectivity constrained wireless multi-role sensor networks," *European Journal of Operational Research*, vol. 241, no. 1, pp. 28–38, 2015.
- [15] S. Slijepcevic and M. Potkonjak, "Power efficient organization of wireless sensor networks," in *Communications, 2001. ICC 2001. IEEE International Conference on*, vol. 2. IEEE, 2002, pp. 472–476.
- [16] J. Jia, J. Chen, G. Chang, and Y. Wen, "Efficient Cover Set Selection in Wireless Sensor Networks," *Acta Automatica Sinica*, vol. 34, no. 9, pp. 1157–1162, 2008.
- [17] M. Gentili and A. Raiconi, " α -coverage to extend network lifetime on wireless sensor networks," *Optimization Letters*, vol. 7, no. 1, pp. 157–172, 2013.
- [18] Y. Gu, B.-H. Zhao, Y.-S. Ji, and J. Li, "Theoretical treatment of target coverage in wireless sensor networks," *Journal of Computer Science and Technology*, vol. 26, pp. 117–129, 2011.
- [19] M. Lu, J. Wu, M. Cardei, and M. Li, "Energy-Efficient Connected Coverage of Discrete Targets in Wireless Sensor Networks," in *Networking and Mobile Computing*, ser. Lecture Notes in Computer Science, vol. 3619, Zhangjiajie, China, 2005, pp. 43–52.
- [20] A. Singh, A. Rossi, and M. Sevaux, "Matheuristic approaches for q-coverage problem versions in wireless sensor networks," *Engineering Optimization*, vol. 45, no. 5, pp. 609–626, 2013.
- [21] M. Cardei, M. Thai, Y. Li, and W. Wu, "Energy-efficient target coverage in wireless sensor networks," in *INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE*, vol. 3. IEEE, 2005, pp. 1976–1984.
- [22] M. Cardei, J. Wu, and M. Lu, "Improving network lifetime using sensors with adjustable sensing ranges," *International Journal of Sensor Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 41–49, 2006.
- [23] S. Guha and S. Khuller, "Improved methods for approximating node weighted steiner trees and connected dominating sets," *Information and computation*, vol. 150, no. 1, pp. 57–74, 1999.
- [24] A. Rossi, A. Singh, and M. Sevaux, "Lifetime maximization in wireless directional sensor network," *European Journal of Operational Research*, vol. 231, no. 1, pp. 229–241, 2013.