



Revista EIA
ISSN 1794-1237
e-ISSN 2463-0950
Año XVIII/ Volumen 19/ Edición N.38
Junio-Diciembre de 2022
Reia3834 pp. 1-10

Publicación científica semestral
Universidad EIA, Envigado, Colombia

PARA CITAR ESTE ARTÍCULO / TO REFERENCE THIS ARTICLE /

Serrate-Hincapie, A.; Zapata-Jaramillo C. M.; Espinosa-Bedoya, A. Acosta-Amaya, G. A. Jiménez-Builes, J. A. (2022) Evaluación de métricas para el rendimiento de redes inalámbricas de robots móviles en el marco de la Industria 4.0. Revista EIA, 19(38), Reia3834. pp. 1-10.
<https://doi.org/10.24050/reia.v19i38.1598>

Autor de correspondencia:

Jiménez-Builes, J. A. (Jovani Alberto)
Licenciatura en docencia de computadores, Maestría en ingeniería de sistemas, Doctorado en ingeniería-Sistemas
Correo electrónico:
jajimen1@unal.edu.co

Recibido: 18-02-2022
Aceptado: 18-04-2022
Disponible online: 01-06-2022

Evaluación de métricas para el rendimiento de redes inalámbricas de robots móviles en el marco de la Industria 4.0

ALEJANDRO SERRATE-HINCAPIE¹
CARLOS MARIO ZAPATA-JARAMILLO²
ALBEIRO ESPINOSA-BEDOYA²
GUSTAVO ALONSO ACOSTA-AMAYA³
 JOVANI ALBERTO JIMÉNEZ-BUILES²

1. Q- Vision Technologies S.A.
2. Universidad Nacional de Colombia
3. Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

Resumen

Las aplicaciones de robótica móvil actuales en el marco de la industria 4.0 requieren emplear una red de robots para garantizar la comunicación entre diferentes agentes robóticos. Según algunos autores, se plantean retos a nivel de red de robots dado que se presentan retrasos en la transmisión de datos debido al gran flujo de información y a los ruidos que se pueden presentar. Por tanto, existen diferentes métricas de rendimiento que permitan evaluar el desempeño de los robots y de la red de robots, pero a la hora de realizar la evaluación de una red de robots no se tiene claro cuál de las diferentes métricas emplear. En este artículo se propone una evaluación de métricas de rendimiento a partir de una selección de características, con el fin de apoyar la toma de decisiones que permitan seleccionar las métricas más adecuadas según la aplicación. Se espera que con esta solución los investigadores puedan seleccionar las métricas que requieren para la evaluación de redes de robots en el marco de la industria 4.0.

Palabras claves: red de robots, métricas de rendimiento, industria 4.0, robótica en la nube.

Evaluation of metrics for the performance of wireless networks of mobile robots in the framework of Industry 4.0

Abstract

Current mobile robotics applications within the framework of Industry 4.0 require the use of a network of robots to ensure communication between different robotic agents. According to some authors, there are challenges at the robot network level given that there are delays in data transmission due to the large flow of information and the noise that can occur. Therefore, there are different performance metrics that allow evaluating the performance of robots and the robot network, but when evaluating a robot network it is not clear which of the different metrics to use. This article proposes an evaluation of performance metrics based on a selection of characteristics, in order to support decision-making that allows selecting the most appropriate metrics according to the application. It is expected that with this solution, researchers will be able to select the metrics they require for the evaluation of robot networks in the framework of Industry 4.0.

Keywords: Robot Network, Performance Metrics, Industry 4.0, Cloud Robotics.

1. Introducción

Las aplicaciones robóticas industriales vienen creciendo exponencialmente, de modo que es necesario contar con un grupo de agentes robóticos que trabajen de manera coordinada [1]. Por ello, existen arquitecturas de red que permiten la comunicación de estos agentes de manera inalámbrica en entornos industriales, pasando por diferentes etapas para la recolección de datos de sensores, análisis de los algoritmos de control y transmisión de la toma de decisiones en la red [1]. En las arquitecturas de red se debe establecer la manera en que se distribuye la red de robots con el fin de evitar retrasos en la transmisión y recepción de datos evitando que se afecte la disponibilidad del servicio [2]. Uno de los criterios a la hora de evaluar el rendimiento de la red es el uso de diferentes métricas según la aplicación, que permitan determinar si una arquitectura de red de robots cumple con los requisitos mínimos de rendimiento y estabilidad con una carga de datos balanceada, sin sacrificar significativamente los costos de implementación y su mantenibilidad en el tiempo [2].

Para la evaluación de métricas se emplean diferentes simuladores que realizan la evaluación de las métricas de redes a nivel general, pero con un enfoque en los algoritmos de ruteo de redes, dejando de lado las diferentes características a la hora de evaluar redes de robots [3].

En este artículo se propone la evaluación de diferentes métricas de rendimiento de redes inalámbricas de robots móviles en el marco de la industria 4.0 a partir de una selección de características propias de una red de robots. El artículo se desarrolla de la

siguiente manera: en la sección 2 se presentan los referentes teóricos que abarcan el trabajo, plasmados en los materiales y métodos. Luego, en la sección tres, se muestran los resultados y la discusión, para luego exhibir las conclusiones en la sección 4.

2. Materiales y Métodos

La Industria 4.0 es la tendencia actual en automatización, la cual comprende el entendimiento entre máquinas, personas con máquinas, inteligencia artificial, mejoras tecnológicas continuas y comunicación continua con internet, cubriendo brechas presentadas en la industria en el pasado [4]. Las redes inalámbricas de robots juegan un papel fundamental en la Industria 4.0 permitiendo la coordinación y cooperación de robots a gran escala [4]. A continuación, se discuten diferentes elementos propios de las redes inalámbricas de robots en el marco de la Industria 4.0.

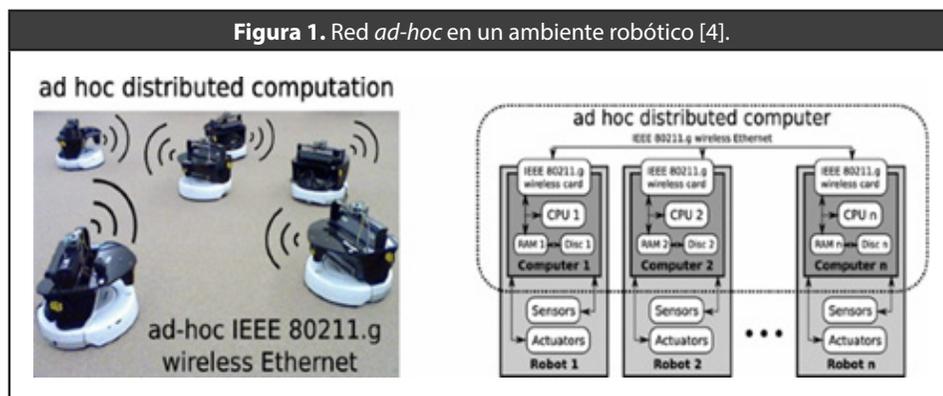
Las arquitecturas de red multirobot son propuestas a partir de las estrategias utilizadas para tomar decisiones, gestionar las interacciones entre los robots y lograr un comportamiento grupal en el equipo de robots [5]. En la actualidad se emplean arquitecturas clasificadas en diferentes categorías. La arquitectura centralizada consiste en un único punto de control para gestionar el comportamiento de todos los robots [6]. La arquitectura jerárquica toma como referente un robot que controla un grupo de robots, cada uno de ellos controlando a su vez, un grupo de otros robots; este patrón puede continuar por varios niveles de jerarquía en función del tamaño de la red [6]. En la arquitectura descentralizada, los robots toman decisiones basados en la propia visión local siguiendo ciertas pautas, estrategias y objetivos del equipo de robots, siendo un desafío mantener la sincronización entre ellos [6]. En la actualidad se fusionan diferentes arquitecturas para lograr una arquitectura híbrida; en este enfoque se combina un control descentralizado combinado con un control jerárquico para lograr la sincronización y coordinación global de acciones, metas y tareas [6].

A nivel general una red “*ad-hoc*” consiste en un grupo de computadores que se comunican entre sí directamente mediante protocolos de red inalámbricos sin la necesidad de emplear puntos de acceso [4]. Las configuraciones propuestas son de punto a punto o “peer to peer” en donde los computadores dentro de un rango de transmisión definido se pueden comunicar entre ellos [4]. Las redes Ad-hoc son relevantes en el ámbito de los robots móviles ya que permiten la formación de equipos dinámicos convirtiéndolos en computadores distribuidos, al agrupar recursos computacionales. Así se reduce la complejidad computacional empleando métodos que permiten restringir el subespacio ambiental como se ilustra en la Figura 1.

Las métricas de rendimiento de robots son medidas objetivas, que también se llaman indicadores claves de rendimiento (KPI). Se utilizan en la industria con el fin de controlar el rendimiento de una línea de producción. Gracias a ellas es posible evaluar qué partes del proceso son efectivas y en cuáles se necesita mejorar. En el ámbito de la robótica móvil tradicional se hace uso de las siguientes métricas [7].

El tiempo de ciclo es una métrica que se mide la duración de la secuencia de un robot en ejecutar una tarea, llamado también como tiempo de ciclo, en donde se busca reducir los tiempos de ciclo haciendo pequeños cambios con el fin de ahorrar tiempo en cada tarea, ya que con esto se podrá aumentar el procesamiento en un mismo periodo de tiempo [7].

Los ciclos completados indican cuántos ciclos realiza un robot en un periodo determinado, para calcular el rendimiento en función de la cantidad de producto que se puede ser procesar en un determinado periodo, algo que está directamente relacionado con la duración del ciclo [7].



El tiempo de espera se considera como el porcentaje de tiempo en el cual el robot se encuentra sin realizar ninguna actividad mientras se ejecuta un programa y es la suma de todos los tiempos de espera individuales. Se trata de una métrica importante en el ámbito de los robots móviles, ya que las pérdidas de tiempo a menudo suceden cuando el robot está esperando otro proceso para finalizar [7].

La eficiencia es el porcentaje de tiempo en el que el robot realiza un trabajo productivo mientras se ejecuta un programa, Por ejemplo, si un robot se mueve durante 48 minutos entre las 17 y las 18 horas su eficiencia sería del 80% (48 min/60 min) [7].

Las métricas de rendimiento de redes es la integración de la red inalámbrica en el bucle de control de los sistemas de control en red NCS (*Networked Control Systems*), dado el comportamiento estocástico de la comunicación inalámbrica en la robótica móvil, puede degradar el rendimiento del sistema, es decir, su calidad de control (QoC). Para realizar la evaluación de una red se toman como base los parámetros del estándar IEEE 802.11n, rendimiento, paquetes perdidos, retardo y variación del retardo, dentro del ambiente de producción [8]. En la Tabla 1 se detallan las diferentes métricas de rendimiento aplicadas a la red de robots.

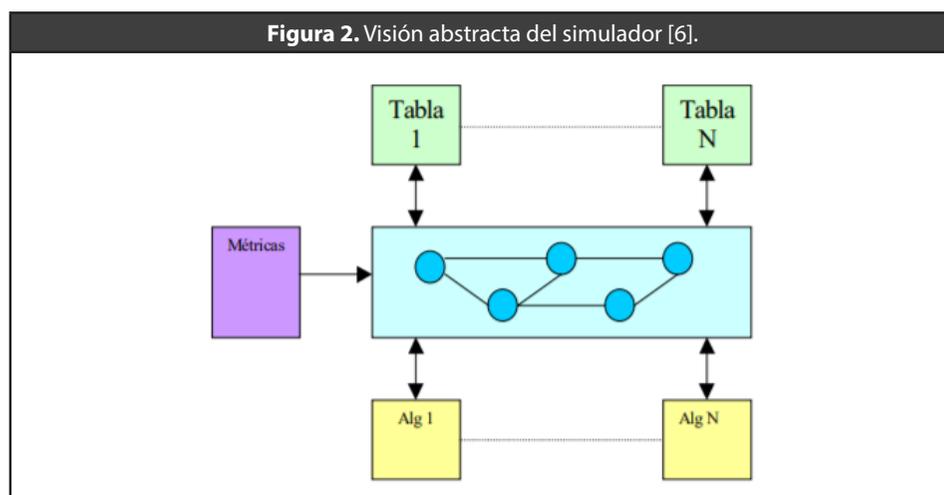
Tabla 1. Métricas de rendimiento de redes [8].

Métrica	Descripción
Encabezados de paquetes	Datos de encabezado de un paquete capturado
Paquetes de datos	Carga útil de la capa de aplicación de un paquete capturado
Tipo de protocolo de paquete	Tipo de protocolo de un paquete capturado
Marca de tiempo del paquete	Marca de tiempo de un paquete capturado
Tamaño del paquete	Tamaño de un paquete en <i>bytes</i>
Errores de paquete	Número de paquetes transmitidos o recibidos con errores
Paquetes descartados	Número de paquetes descartados por la red

Una vez presentadas las métricas de rendimiento se hace necesario hacer una evaluación de éstas con el fin de encontrar la más adecuada en función de las características de cada una [6].

Existen diferentes simuladores para la evaluación de métricas en algoritmos de ruteo en redes de computadores, cuya finalidad es la de proporcionar un medio automático para la evaluación de algoritmos de ruteo tradicionales como así también aquellos que usan información geográfica, sujetos a un conjunto de métricas. Esto permite la detección de estados y organizaciones de la red que conducen a un bajo desempeño de los mismos, posibilitando la creación de heurísticas que controlen esta situación [6].

En la Figura 2 se da una visión abstracta del simulador en donde se tiene como parámetros de entrada los algoritmos de ruteo y las métricas a evaluar. Lo anterior permite generar los resultados en las diferentes tablas con los valores obtenidos al realizar las evaluaciones de los algoritmos de ruteo. Se deja a consideración del investigador la evaluación de las métricas y selección de la más educada.



Este acercamiento es el más próximo que se ha tenido con el propósito de realizar una evaluación de métricas, tomando como referencia la evaluación de algoritmos de ruteo en redes tradicionales [6].

3. Resultados

Para este artículo se tomaron como base la selección de diferentes características propias de una red de robots como elemento principal en la comparación de métricas de rendimiento de redes de robots en el marco de la Industria 4.0. La comparación se describe en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de las métricas.

Características	Métricas de ruteo de redes [6]	Métricas de distorsión [9]	Métricas híbridas [10]	Métricas estocásticas [11]	Métricas de robustez de la red [12]	Métricas de capacidad computacional [13]
Análisis estocástico	Si	Si	Si	Si	No	No
Análisis de distorsión	No	Si	No	No	No	No
Rendimiento de tiempo / Velocidad de comunicación	No	No	Si	No	Si	No
Análisis de algoritmos de control	No	No	No	No	Si	Si
Costo de la comunicación	No	No	Si	No	Si	No
Análisis de algoritmo de ruteo y geográficos	Si	No	No	No	Si	Si

Es importante comprender en qué consiste cada de estas características las cuales se tienen en cuenta para realizar la evaluación de las diferentes métricas:

Análisis estocástico: toma como referencia las variaciones estocásticas que presentan cada uno de los sensores en cada uno de los robots a la hora de recopilar los diferentes datos en la red. Se tienen en cuenta las variaciones de fuentes y limitaciones de comunicación durante la recopilación de datos con el fin de optimizar y aumentar la eficiencia en la recopilación de datos [9].

Análisis de distorsión: toma como punto de partida un análisis estocástico previo en donde sus variaciones son la distorsión de error al cuadrado y tiene en cuenta las propiedades formales de la función de distorsión [9].

Rendimiento de tiempo/velocidad de la comunicación: en términos generales, los algoritmos de tiempo óptimo son rápidos y sólidos, pero requieren una gran cantidad de intercambio de mensajes. En contraste, los algoritmos óptimos de comunicación minimizan la cantidad de información enrutada a través de la red, pero son lentos y sensibles a fallas en los enlaces [10]. Esta característica se enfoca en buscar una transición elegante del rendimiento óptimo en el tiempo, al rendimiento óptimo en la comunicación para determinar la solidez del algoritmo en la medida del tiempo requerido.

Análisis de algoritmos de control: las tareas de los robots coordinados o grupos de robots, requieren comunicaciones fiables entre los miembros del equipo. Por lo anterior es necesario tener en cuenta, al desarrollar los algoritmos de control, que los robots tomen rutas de navegación óptimas para garantizar la integridad de la red de comunicación [11].

Costo de la comunicación: existe una interacción significativa entre los controladores de robots y los subsistemas de comunicación. Esto permite realizar una medida general de la capacidad computacional del robot adicionando el costo de la comunicación a nivel de recursos [12].

Tabla 3. Clasificación de métricas con respecto a las arquitecturas de red.

Arquitectura de red	Métricas de ruteo de redes [6]	Métricas de distorsión [9]	Métricas híbridas [10]	Métricas estocásticas [11]	Métricas de robustez de la red [12]	Métricas de capacidad computacional [13]
Centralizada	Si	No	Si	No	Si	Si
Jerárquica	Si	No	Si	No	Si	Si
Descentralizada	Si	Si	Si	No	Si	Si
Híbrida	Si	No	No	No	Si	Si
<i>Ad-hoc</i>	Si	Si	No	Si	Si	Si

Análisis de algoritmos de ruteo y geográficos: es la capa de red encargada de decidir la línea de salida por la que se transmitirá un paquete de entrada. Requiere un análisis basado en métricas cuya finalidad es la de proporcionar un medio automático para la evaluación de los algoritmos de ruteo tradicionales, como así también, aquellos que usan información geográfica. Esto permite la detección de estados y organizaciones de la red que conducen a un bajo desempeño de los mismos, posibilitando la creación de herramientas que controlen esta situación [13]. De manera complementaria, a esta evaluación se realiza una clasificación de las diferentes métricas de rendimiento con respecto a las diferentes arquitecturas de red aplicables actualmente en la robótica móvil.

Para la realización de la evaluación, se tuvo en cuenta la aplicabilidad de estas métricas en las diferentes arquitecturas de redes de robots, las cuales son expuestas en la Tabla 3, luego de realizar una revisión de literatura de cada una de las métricas existentes. Esta evaluación proporciona un panorama de la capacidad de las diferentes métricas de rendimiento para aplicarse a las arquitecturas de red de robots como se evidencia en la Tabla 3.

4. Análisis de Resultados y Discusión

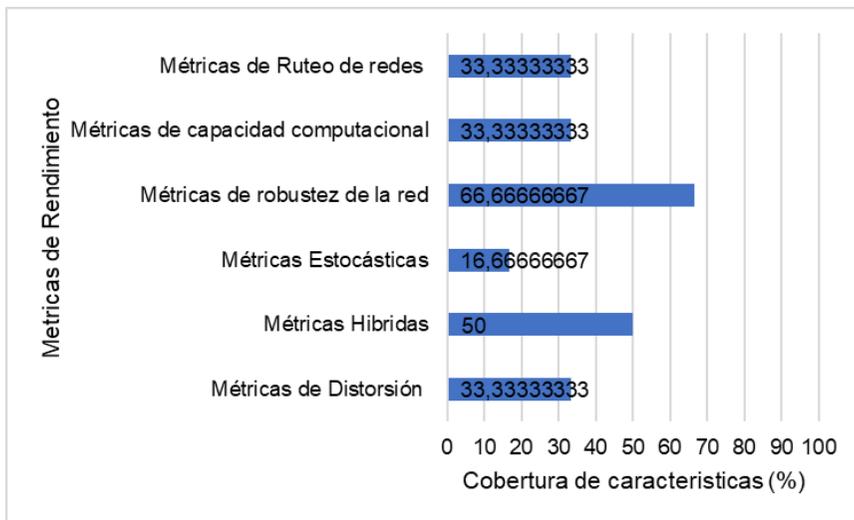
A partir de las métricas propuestas y su evaluación en función de las características se tiene que las métricas de distorsión, híbridas y estocásticas se enfocan en evaluar ruidos en la transmisión de datos y su aplicación son más ajustadas a unas pocas características como lo son el análisis estadístico y de distorsión. Por otra parte, las métricas de robustez de la red, capacidad computacional y ruteo de redes, tienen un enfoque orientado hacia las características de rendimiento tiempo/velocidad de la comunicación, análisis de algoritmos de control, costo de la comunicación y análisis de algoritmo de ruteo y geográficos. Algunas de estas métricas abarcan un poco más de estas características.

Para el análisis de la evaluación de métricas en función de las características como se representa en la Ecuación 1, se toma como referencia el número de características de la métrica, se multiplica por 100 y se divide entre el total de características enunciadas en la Tabla 2.

$$Capacidad\ de\ Cobertura\ (\%) = \frac{N^{\circ}\ de\ características\ de\ la\ métrica * 100}{N^{\circ}\ total\ de\ características} \tag{1}$$

En la Figura 3 se presenta la capacidad de cobertura de las características de cada una de las métricas de manera porcentual, donde a mayor porcentaje, mayor será la capacidad de cobertura. A partir de la figura se puede determinar que las métricas de robustez de la red tienen un porcentaje de cobertura de características del 66,7% convirtiendo esta métrica una de las más completas a la hora de hacer una evaluación de red de robots a nivel de características, seguido de las métricas híbridas con un 50%. Las métricas con la menor capacidad de cobertura fueron las híbridas con un 16.7% ya que solo cubre una característica.

Figura 3. Capacidad de cobertura de características de las métricas de rendimiento.

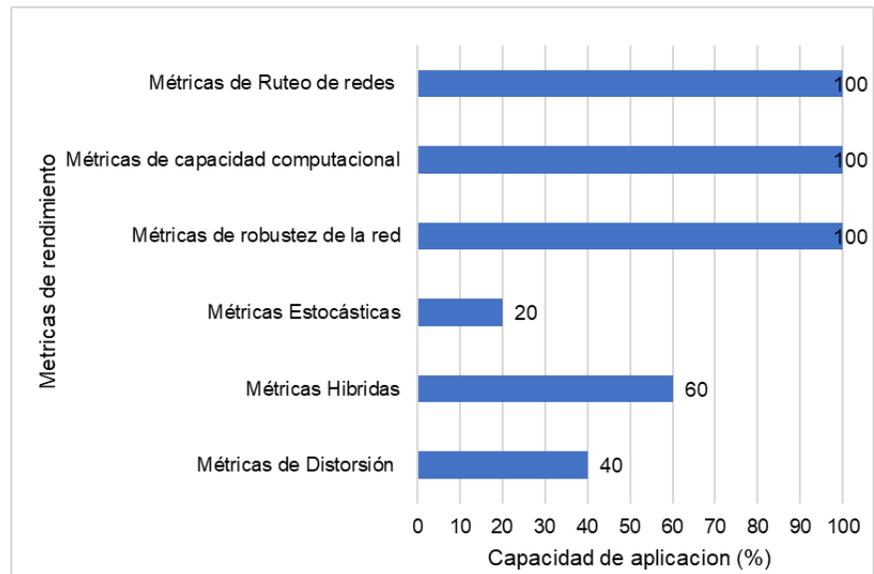


Para el análisis de la evaluación de las métricas en función de las arquitecturas de red, se toma el número de arquitecturas en las cuales la métrica es aplicable. Se multiplica por 100 y se divide entre el total de arquitecturas enunciadas en la tabla 3 como se representa en la Ecuación 2.

$$Capacidad\ de\ Aplicacion\ de\ Metricas\ (\%) = \frac{N^{\circ}\ de\ arquitecturas\ aplicables\ a\ la\ métrica * 100}{N^{\circ}\ total\ de\ arquitecturas} \tag{2}$$

En la Figura 4 se presenta la capacidad de aplicación de las métricas en cada una de las arquitecturas de red, de manera porcentual, donde a mayor porcentaje mayor será la capacidad de aplicación. Analizando la capacidad de aplicación de arquitecturas de red a partir de la figura, se encuentra que las métricas de ruteo de redes, capacidad computacional y robustez de la red se adaptan en un 100% a las arquitecturas de red propuestas. Por otra parte, se evidencia la poca capacidad de aplicación en las métricas estocásticas logrando solo un 20%, lo que indica que están diseñadas para una arquitectura de red en específico.

Figura 4. Capacidad de aplicación de características de las métricas de rendimiento.



5. Conclusiones

La evaluación de métricas de rendimiento de robots a partir de un análisis de características y arquitecturas de red, permite seleccionar las métricas de rendimiento que mejor se adapten a una red propuesta. La métrica con mayor capacidad de cobertura de características y que se adapta de mejor manera a las diferentes arquitecturas, es la métrica de robustez de la red, ya que, hace una evaluación de los algoritmos de control, transmisión y tiempo.

Los trabajos relacionados a la evaluación de métricas en el ámbito de las redes de robots se han enfocado en métricas específicas, lo cual proporciona pocas herramientas a la hora de hacer una selección de características. En el marco de la industria 4.0 el uso de métricas de rendimiento, toma gran importancia a la hora de implementar un proyecto de redes de robots, debido a, la alta disponibilidad que se requiere en los diferentes entornos industriales y productivos. Las métricas de rendimiento que se han propuesto tiempo atrás, están ligadas a características específicas dejando de lado a otro tipo de características, que son de gran importancia a la hora de realizar la evaluación de arquitecturas de red de robots.

Se espera en un futuro contar con simuladores que permitan realizar una comparación de métricas enfocadas a redes de robots, sometiendo los algoritmos de control y ruteo de redes a un análisis estocástico, que permita determinar la métrica más adecuada según la arquitectura de red.

5. Referencias

- E. Spaho, L. Barolli, V. Kolici and A. Lala, "Performance Evaluation of Different Routing Protocols in a Vehicular Delay Tolerant Network," 2015 10th International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA), Krakow, 2015, pp. 157-162. DOI: 10.1109/BWCCA.2015.46.
- Erboz, G. (2017). How To Define Industry 4.0: Main Pillars Of Industry 4.0. 7th International Conference on Management (pág. 9). Nitra: ICoM. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.034.
- Falco, Joseph & Van Wyk, Karl & Messina, Elena. (2018). Performance Metrics and Test Methods for Robotic Hands. National Institute of Standards and Technology, 45-65. DOI: 10.6028/NIST.SP.1227-draft
- Gagliardi, E., & Peñalver, G. (2006). Evaluación de Métricas en Redes de Computadoras. IX Congreso Argentino de Ciencias de la Computación, 1361-1372. DOI: 10.1007/978-3-540-77024-4_4.
- Guarnizo, J., & Mellado, M. (2016). Arquitectura de equipos de fútbol de robots con control centralizado. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial, 54-67. DOI: 10.1016/j.riai.2016.05.005
- Hollinger, G., Choudhuri, C., Mitra, U., & Sukhatme, G. (2013). Distortion Metrics for Robotic Sensor Networks. International Workshop on Wireless Networking for Unmanned Autonomous Vehicles, 380-395. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2013.6825195.
- Jawhar, I., Mohamed, N., Wu, J., & Al-Jaroodi, J. (2018). Networking of Multi-Robot Systems: Architectures and Requirements. Journal of sensor and actuator networks (pág. 17). Pittsburgh: MDPI. DOI: 7. 52. 10.3390/jsan7040052.
- Rossi, F., & Pavone, M. (2013). Decentralized decision-making on robotic networks with hybrid performance metrics. 51st Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, 358-365. DOI: 10.1109/Allerton.2013.6736546.
- Wang, L., & Lui, M. (2014). Hierarchical Auction-based Mechanism for Real-Time Resource Retrieval in Cloud Mobile Robotic System. IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA), (págs. 2164-2169). Hong Kong. DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907157
- Ye, W., Vaughan, R., Sukhatme, G., Heidemann, J., Estrin, D., & Mataric, M. (2003). Evaluating control strategies for wireless-networked robots using an integrated robot and network simulation. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (págs. 1050-4729). Seoul, South Korea: IEEE. DOI: 10.1109/ROBOT.2001.933068.
- Zimmerman, T. (2019). Metrics and key performance indicators for robotic cybersecurity performance analysis (Vol. 1). (U. D. Commerce, Ed.) New York: National Institute of Standards and Technology. DOI: 10.6028/NIST.IR.8177
- Zavlanos, M., Ribeiro, A., & Pappas, G. (2010). Mobility & Routing Control in Networks of Robots. 49th IEEE Conference on Decision and Control, (págs. 7545-7550). Hilton Atlanta Hotel, Atlanta, GA, USA. DOI: 10.1109/CDC.2010.5717013.
- Zhang, F., Chen, W., & Xi, Y. (2006). Motion Synchronization in Mobile Robot Networks: Robustness. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, China: IEEE. DOI: 10.1109/IROS.2006.282274