

Vea discusiones, estadísticas y perfiles de autor para esta publicación en <https://www.researchgate.net/publication/344006659>

Evaluación del rendimiento del sistema ciberfísico inalámbrico a través de un enfoque de base de datos de gráficos

Artículo en Journal of Computing and Information Science in Engineering · Agosto 2020

DOI: 10.1115/1.4048205

CITAS

5

LEE

49

4 autores:



Mohamed Kashef

Universidad de Maryland, College Park

59PUBLICACIONES**819**CITAS

VER EL PERFIL



yongkang liu

Administración de Drogas y Alimentos de EE. UU.

45PUBLICACIONES**843**CITAS

VER EL PERFIL



Carlos Montgomery

Instituto Nacional de Normas y Tecnología

15PUBLICACIONES**53**CITAS

VER EL PERFIL



ricardo candell

Instituto Nacional de Normas y Tecnología

60PUBLICACIONES**1,143**CITAS

VER EL PERFIL

Algunos de los autores de esta publicación también están trabajando en estos proyectos relacionados:



Ciencia y tecnología dieléctrica [Ver Proyecto](#)



Sistemas Inalámbricos Industriales [Ver Proyecto](#)

Publicado en forma editada final como:

J Comput Inf Sci Eng. 2021 abril; 21(2): . doi:10.1115/1.4048205.

Evaluación del rendimiento de los sistemas ciberfísicos inalámbricos a través de un enfoque de base de datos de gráficos

Mohamed Kashef*, yongkang liu, Carlos Montgomery, ricardo candell Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST), Gaithersburg, Maryland 20899

Abstracto

A pesar de los enormes esfuerzos para implementar tecnologías de comunicaciones inalámbricas en escenarios de fabricación inteligente, algunos sectores de fabricación aún tardan en adoptar masivamente. Esta lentitud en la adopción generalizada de tecnologías inalámbricas en sistemas ciberfísicos (CPS) se debe en parte a que no se comprende completamente el impacto detallado del despliegue inalámbrico en los procesos físicos, especialmente en los casos que requieren comunicaciones de baja latencia y alta confiabilidad. En este documento, presentamos un enfoque para integrar datos de tráfico de redes inalámbricas y datos de procesos físicos para evaluar el impacto de las comunicaciones inalámbricas en el rendimiento de una celda de trabajo de fábrica. El enfoque propuesto se presenta a través de la discusión de un caso de uso de ingeniería. Se construye un banco de pruebas que emula una celda de trabajo de una fábrica de fabricación robótica utilizando dos brazos robóticos de grado colaborativo, emuladores de máquinas y dispositivos de comunicación inalámbrica. Todos los datos de tráfico de la red se recopilan y los datos del proceso físico, incluidos los estados de los robots y las máquinas y varios comandos de control de supervisión, también se recopilan y sincronizan con los datos de la red. Luego, los datos se integran donde se eliminan los datos redundantes y las actividades correlacionadas se conectan en una base de datos de gráficos. Se propone, desarrolla y elabora un modelo de datos. Luego, la base de datos se llena con eventos del banco de pruebas y se presenta el gráfico resultante. Luego, los comandos de consulta se presentan como un medio para examinar y analizar el rendimiento de la red y las relaciones dentro de los componentes de la red. Además, detallamos la forma en que se utiliza este enfoque para estudiar el impacto de las comunicaciones inalámbricas en los procesos físicos e ilustramos el impacto de varios parámetros de red inalámbrica en el rendimiento de la celda de trabajo de fabricación emulada. Este enfoque se puede implementar como un componente básico para varias herramientas de análisis inalámbrico predictivo y descriptivo para CPS.

1. Introducción

La fabricación inteligente y las fábricas modernas requieren interacciones y colaboraciones entre varios equipos, productos y logística distribuidos para lograr niveles sin precedentes de productividad y eficiencia operativa. La comunicación inalámbrica es una de las tecnologías que permiten lograr esta visión [1]. Debido a una mayor demanda de facilidad de instalación, costos reducidos de implementación y mantenimiento, y flexibilidad, las redes alámbricas están siendo

*Dirija toda la correspondencia a este autor. mohamed.kashef@nist.gov.

Descargo de responsabilidad

Ciertos equipos, instrumentos o materiales comerciales se identifican en este documento para especificar adecuadamente el procedimiento experimental. Dicha identificación no pretende implicar recomendación o respaldo por parte del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología, ni pretende implicar que los materiales o equipos identificados son necesariamente los mejores disponibles para el propósito.

reemplazado por redes inalámbricas. Esto presenta un verdadero desafío para las redes y los sistemas de control. En comparación con las conexiones por cable, los enlaces inalámbricos tienen sus ventajas únicas en la conexión de sensores y actuadores de campo con un costo de cableado reducido y soporte natural de movilidad [2]; sin embargo, la mayoría de los sistemas de comunicación actuales carecen del soporte de latencia y confiabilidad [3] exigido por los requisitos de fábrica [4,5]. Más específicamente, la adopción de sistemas inalámbricos en ciberfísicos (CPS) requiere métodos y enfoques innovadores para cuantificar el impacto de las tecnologías inalámbricas en términos de eficiencia de producción y medir el costo de las fallas de los enlaces inalámbricos en el rendimiento [6].

En los CPS modernos, se genera y transfiere un gran volumen de datos heterogéneos dentro de una variedad de equipos, sensores, controladores y plataformas informáticas. El análisis de datos para CPS juega un papel fundamental en la mejora de la operación de la fábrica y la calidad del producto, reduciendo el tiempo de inactividad de la máquina y mejorando la eficiencia de fabricación [7, 8]. Generalmente, el análisis de datos realiza la tarea de extraer información, analizar el rendimiento y predecir el pronóstico de producción. En [7], el ciclo de vida del análisis de datos en CPS incluye la adquisición, posesión, almacenamiento y análisis de datos. La adquisición de datos incluye agregar varios puntos de recolección de datos y la transferencia de datos a las unidades de almacenamiento y procesamiento. Posteriormente, se implementan técnicas típicas de limpieza, integración y compresión debido al gran volumen, redundancia, y heterogeneidad de los datos brutos. Finalmente, se realiza el análisis de datos para el modelado y visualización de datos.

Los sistemas de gestión de bases de datos desempeñan el papel de organizar los datos de manera eficiente y eficaz. Existen dos tipos de bases de datos, a saber, relacionales y no relacionales. Las bases de datos no relacionales también se conocen como NoSQL y se utilizan a menudo para almacenar datos semiestructurados y no estructurados. Las bases de datos NoSQL incluyen varios modelos de datos, como almacenes de valores clave, bases de datos en columnas, almacenes de documentos y bases de datos de gráficos (GDB) [9]. Por lo tanto, las bases de datos no relacionales son más adecuadas para gestionar datos heterogéneos en entornos industriales [10]. Un GDB es una base de datos NoSQL que utiliza nodos, bordes y propiedades para almacenar y presentar datos. El GDB no impone un esquema particular al tener un modelo de datos que permite que cualquier tipo de nodo tenga un conjunto diferente de propiedades y, de manera similar, las relaciones. Específicamente, no se requiere cada propiedad o relación correspondiente a un tipo de nodo específico para cada instancia de la implementación de GDB. Las relaciones dentro de un GDB se pueden consultar de manera eficiente porque se almacenan de manera persistente dentro de la base de datos. En un GDB se pueden realizar consultas en base a relaciones. Esto, en particular, presenta una ventaja cuando se almacena información sobre sistemas con correlaciones aparentes pero difíciles de visualizar o cuantificar.

Para mejorar la implementación de la tecnología inalámbrica industrial en CPS, se deben ofrecer estrategias efectivas y fáciles de usar para probar y evaluar dichos sistemas de manera que se correlacione el rendimiento de la red con el rendimiento operativo. Los datos necesarios para este propósito se recopilan de varias actividades y redes de CPS, y generalmente se encuentran en grandes cantidades, heterogéneas y correlacionadas. Como resultado, presentamos un método novedoso para capturar simultáneamente información de eventos operativos y de red utilizando un GDB. El uso de un GDB permite realizar inferencias más intuitivas a través de las relaciones almacenadas y los modelos teóricos de grafos [11].



Los principales beneficios de implementar un enfoque de GDB son los siguientes: i) permite tener relaciones directas entre los mensajes, transacciones y acciones físicas correspondientes, lo que permite una consulta de base de datos más rápida en comparación con las bases de datos relacionales (es decir, acceder a un vértice de GDB y sus vecinos). puede ocurrir con una simple búsqueda en la memoria a través de un puntero adjunto a cada vértice), y ii) ofrece una explicación clara del impacto de los eventos individuales de las comunicaciones inalámbricas en la acción física individual correspondiente que no se basa en criterios estadísticos.

En [12], presentamos el diseño de línea de base cableado del banco de pruebas de celdas de trabajo colaborativo de dos robots para el cuidado de máquinas del Instituto Nacional de Estándares y Tecnologías (NIST). En este documento, ampliamos el uso de este banco de pruebas mediante la implementación de una red inalámbrica para el tráfico de control de supervisión robótica. Luego proponemos el enfoque de análisis de datos completo que se muestra en la Fig. 1 para evaluar el rendimiento de la red inalámbrica y su impacto en las actividades físicas de la celda de trabajo. En [13], presentamos una implementación de GDB para medir el rendimiento inalámbrico de la red sin correlacionarlo aún con las acciones físicas de la celda de trabajo. En resumen, las contribuciones de este trabajo son las siguientes:



1. Se describe un banco de pruebas de células de trabajo de mantenimiento de máquinas colaborativas de dos robots conectados de forma inalámbrica y se elabora el método para recopilar el tráfico de red y los datos de acciones físicas del banco de pruebas.
2. Se explica en detalle una aplicación de GDB para la captura y el análisis del rendimiento del sistema ciberfísico de una celda de trabajo de fabricación que utiliza la plataforma de base de datos Neo4j, donde se describe un modelo de datos propuesto para correlacionar los eventos operativos y de red.
3. Se obtienen resultados numéricos para validar el enfoque propuesto y describir el impacto de las comunicaciones inalámbricas en este caso de uso específico.

Este documento analiza múltiples componentes a través de la discusión de un caso de uso de ingeniería. Algunos de estos componentes son genéricos y se pueden usar más, mientras que el resto puede ser más específico para este caso de uso. Estos componentes incluyen el marco general utilizando un GDB, el diseño e implementación del modelo de datos, la implementación del banco de pruebas y la recopilación de datos, y el análisis de datos. Se necesita la introducción de un enfoque GDB para analizar CPS industrial, que logre el mapeo uno a uno entre las actividades de la red y las acciones físicas correspondientes, para comprender los impactos de la red inalámbrica industrial en las actividades físicas. Hasta donde sabemos, este marco es el primero en lograr este mapeo en un estudio experimental. Por lo tanto, la idea de usar GDB es genérica y puede usarse en muchos escenarios industriales. El modelo de datos presentado se puede adoptar ampliamente en múltiples casos de uso que implementan redes inalámbricas industriales para el control de supervisión de robots y máquinas, incluidas las aplicaciones de atención de máquinas y de recogida y colocación. Este modelo y los scripts implementados que construyen el GDB utilizando los datos de red recopilados, los comentarios de estado de los robots y el estado de la máquina pueden ser adecuados para estas aplicaciones de supervisión. Por otro lado, la implementación exacta del caso de uso y el análisis de datos subsiguiente son más específicos para el caso de uso de ingeniería en el que tratamos de introducir el marco propuesto y la fecha mientras se implementa en un estudio experimental. Algunas ideas para la recopilación y sincronización de datos pueden ser genéricas, pero también se examinan en la literatura.

Nuestro documento está organizado de la siguiente manera: en la Sección 2, presentamos una revisión de la literatura relacionada donde comenzamos con el estado del arte de la tecnología inalámbrica industrial en la Sección 2.1, seguido de una discusión sobre la importancia del análisis de datos industriales en la Sección 2.2. Discutimos las aplicaciones y ventajas de la base de datos de gráficos en la Sección 2.3, seguidas de ejemplos de su implementación en el análisis de datos industriales en la Sección 2.4. En la Sección 3, se presentan brevemente el caso de uso y la configuración del banco de pruebas. En la Sección 4, comenzamos presentando las justificaciones para seleccionar el enfoque de GDB y el uso de la herramienta Neo4j. Luego presentamos la arquitectura relacionada con GDB en la Sección 4.1 y varias etapas de procesamiento de datos en la Sección 4.2. Luego presentamos los resultados de nuestro análisis en la Sección 5, seguidos de las conclusiones y la dirección futura en la Sección 6.



2. Trabajo relacionado

2.1 Tecnología inalámbrica industrial de última generación

Las comunicaciones inalámbricas en entornos industriales permiten el intercambio de información de máquina a máquina (M2M) para mejorar la eficiencia y la seguridad de la producción. Generalmente, los servicios inalámbricos industriales tienen varios requisitos en diferentes casos de uso. Ahmadzai et al. resumió los requisitos de CPS para los sistemas M2M y mencionó la alta conectividad dentro de la fábrica junto con la autonomía que indica las necesidades de sistemas inalámbricos confiables [14]. Un informe técnico reciente, en [15], identifica requisitos de servicio específicos en diferentes clases de aplicaciones inalámbricas industriales con umbrales métricos finamente ajustados. Pang et al. discutió la posibilidad de nuevas técnicas inalámbricas para soportar servicios industriales de alto rendimiento como tiempo de ciclo (1 ms a 10 us), confiabilidad (medio 10–6a alto 10–9) y escala (de 100 a 10 000) [16]. El diseño de sistemas inalámbricos industriales también enfrenta desafíos como la pérdida de transmisión en la propagación de radio y diversas interferencias en la planta de producción. Una serie de campañas de medición de canales han mostrado características únicas de canales de radio en sitios industriales reales. En [17], el rendimiento del canal se analizó dentro de dos fábricas diferentes que muestran claramente un entorno multitrayecto para diferentes tipos de antena y polarización. Los datos de medición de canales activos y pasivos se recopilaron en diferentes sitios e identificaron la gran diversidad de características de propagación de radio que varían con los diseños de fábrica y las actividades de producción [18]. Además, la fábrica contiene varias fuentes de interferencia que pueden perjudicar los enlaces inalámbricos. Los autores en [19] enumeran pocas fuentes como motores, convertidores de frecuencia, reguladores de voltaje, equipos de soldadura y computadoras de oficina. Por lo tanto, se necesitan métodos de evaluación eficientes para verificar las soluciones inalámbricas industriales emergentes y existentes. Los autores en [17,20] discutieron el rendimiento de las radios IEEE 802.15.4 en entornos industriales reales con un fuerte desvanecimiento de trayectos múltiples y concluyeron que las soluciones existentes no podían superar el sombreado logarítmico normal, medido en 7 – 12 dB, ya que no emplearon una fuerte codificación de canales en sus receptores. Existe una necesidad real de tener un banco de pruebas que pueda evaluar el rendimiento de las soluciones inalámbricas en apoyo de las aplicaciones industriales [21]. 4 radios en entornos industriales reales con fuerte desvanecimiento multitrayecto y llegó a la conclusión de que las soluciones existentes no podían superar el sombreado logarítmico normal, medido en 7 – 12 dB, ya que no empleaban una codificación de canal fuerte en sus receptores. Existe una necesidad real de tener un banco de pruebas que pueda evaluar el rendimiento de las soluciones inalámbricas en apoyo de las aplicaciones industriales [21]. 4 radios en entornos industriales reales con fuerte desvanecimiento multitrayecto y llegó a la conclusión de que las soluciones existentes no podían superar el sombreado logarítmico normal, medido en 7 – 12 dB, ya que no empleaban una codificación de canal fuerte en sus receptores. Existe una necesidad real de tener un banco de pruebas que pueda evaluar el rendimiento de las soluciones inalámbricas en apoyo de las aplicaciones industriales [21].

Cuando la información del estado industrial se recopila en el dispositivo de campo o el controlador genera un comando de control para actuadores remotos, la red intermedia tiene que transmitir estos datos de manera oportuna y confiable, especialmente en enlaces inalámbricos. Sin embargo, la conexión de los flujos de información del sistema inalámbrico con el funcionamiento del sistema físico no siempre es evidente. Los estudios actuales no revelan dependencias ocultas en sistemas tan complejos.

En la Tabla 1, comparamos este trabajo con los trabajos más relacionados en la literatura para la evaluación de sistemas inalámbricos industriales. La comparación incluye el dominio de la aplicación, el caso de uso de prueba, la configuración del sistema, el enfoque de recopilación de datos y los criterios de evaluación. Nuestro trabajo es el único trabajo que logra el mapeo uno a uno entre las acciones físicas y las actividades de la red. Además, presenta sistemas de hardware tanto para dominios físicos como de red para capturar los impactos realistas del hardware en el rendimiento del sistema CPS.

2.2 Importancia del análisis de datos industriales

El análisis de datos industriales juega un papel esencial para lograr la visión de fábrica inteligente y mejorar la toma de decisiones en diversas aplicaciones industriales. En general, se estudian cinco metodologías de datos industriales principales, incluida la ingesta de datos altamente distribuidos, el depósito de datos, la gestión de datos a gran escala, el análisis de datos y el gobierno de datos [30]. El procesamiento de datos industriales ofrece información valiosa sobre varias secciones de aplicaciones industriales, incluidas las ineficiencias en los procesos industriales, fallas costosas y tiempos de inactividad, y decisiones de mantenimiento efectivas [31, 32]. El análisis de datos industriales generalmente se implementa para mejorar las operaciones de la fábrica mejorando la utilización de la maquinaria y prediciendo las demandas de producción, mejorando la calidad del producto analizando las demandas del mercado y reduciendo los productos defectuosos, y mejorar la eficiencia de la cadena de suministro mediante el análisis de los factores de riesgo y la elaboración de planes y cronogramas logísticos precisos [7]. Los métodos de análisis de datos industriales se pueden dividir en diferentes categorías, como análisis descriptivo, diagnóstico, predictivo y prescriptivo [7]. Las analíticas descriptivas y de diagnóstico se encargan de analizar los datos históricos y las causas de los eventos y comportamientos. Los análisis predictivos y prescriptivos requieren más poder de procesamiento, anticipar las tendencias de los datos e implementar los datos históricos en la toma de decisiones para lograr los objetivos de producción. Se pueden encontrar ejemplos de marcos de análisis de datos industriales en [33–36]. En [34], se presenta una plataforma para realizar análisis de big data industrial donde se introducen los requisitos de rendimiento para lograr una operación rentable. En [33], se propone una solución de big data de fabricación para el mantenimiento preventivo activo en entornos de fabricación. Se pueden encontrar varios otros marcos para el análisis de datos industriales en [35, 36], donde se enfatiza la importancia de usar el análisis de datos en la toma de decisiones.



2.3 Ventajas del enfoque BGF



Se han presentado múltiples encuestas sobre GDB para describir los modelos asociados, las herramientas y sus características, como [11,37,38]. Las ventajas de implementar GDB incluyen tener un enfoque más natural del modelado de datos y mantener las propiedades de los datos conectadas a los nodos y las relaciones [11]. Además, los GDB ofrecen interfaces gráficas y de visualización de datos y pueden mantener la información relacionada con el tiempo de los eventos a través de varias rutas de gráficos [38]. Además, en [39] se presenta una lista ampliada de aplicaciones e implementaciones de GDB para mostrar su uso en datos empresariales, redes sociales y determinar la seguridad y los derechos de acceso. Se descubrió que los GDB proporcionan la estructura que tanto se necesita para almacenar datos e incorporar un modelo de datos dinámico. En general, los casos de uso, en los que los GDB mejoran perfectamente la gestión de datos, incluyen la búsqueda de rutas con propiedades de ruta ponderadas y relacionadas con el tiempo, el mapeo de dependencias de varios componentes del sistema para capturar puntos débiles potenciales y comunicaciones entre varios elementos en red [38]. Por otro lado, los lenguajes de consulta se utilizan para extraer datos, incluido el recorrido de la base de datos, la comparación de nodos

propiedades y coincidencia de subgrafos [37,40]. El desempeño de diferentes herramientas y metodologías de GDB se analiza y compara en [41,42]. Varios aspectos de la funcionalidad diferencian el rendimiento de los lenguajes de consulta, como la coincidencia de subgráficos, la búsqueda de nodos conectados por rutas, la comparación y devolución de rutas, la agregación, la creación de nodos y la comparación y clasificación aproximadas [40].

2.4 GDB para análisis de datos industriales

Debido a sus ventajas, que incluyen escalabilidad, eficiencia y flexibilidad, los GDB se adoptan ampliamente en diversas aplicaciones y casos de uso relacionados con la industria, como operaciones de red, detección de fraude y gestión de activos y datos [43]. En [44], los autores han propuesto un nuevo enfoque de seguimiento de objetos para aplicaciones de vigilancia. El enfoque GDB se selecciona para contribuir a la escalabilidad del esquema propuesto y respaldar el análisis de conectividad requerido para el seguimiento de objetos. Además, las relaciones en las redes sociales se han modelado utilizando un GDB para la minería y el marketing de información estructural [45]. Por otro lado, los GDB también se implementan en soluciones comerciales para escenarios con múltiples fuentes de datos grandes que requieren procesamiento distribuido en la toma de decisiones para diversos problemas, como detección de fraude, predicción de tendencias,

En [8], se demostró que GDB y Neo4j se pueden usar en aplicaciones relacionadas con la seguridad de la red porque las características de la red cumplen con el concepto de nodos y relaciones de GDB. Se afirmó que Neo4j se seleccionó para consultar y analizar de manera eficiente los datos donde los resultados de la consulta se pueden visualizar directamente. Además, en [47], Neo4j también se usó para construir un modelo para un análisis de red de red eléctrica donde los resultados experimentales compararon el rendimiento con un sistema de base de datos relacional de ejemplo. En [48], un marco de recuperación de información eficiente y seguro para redes centradas en contenido utilizó la base de datos de gráficos Neo4j para mejorar la eficiencia del almacenamiento y procesamiento de datos a gran escala. En [49], Neo4j se utilizó para analizar la vulnerabilidad de la red para garantizar la precisión del proceso de análisis y generación de gráficos de ataque.

Además, el uso de GDB, y más específicamente Neo4j, en el análisis de registros de datos con marca de tiempo se ha demostrado en [50, 51]. En [50], se ha utilizado un enfoque GDB para analizar archivos de registro de red de diferentes fuentes en tiempo real. Los datos de diferentes capas de red se han exportado y combinado en un solo gráfico para detectar anomalías en el rendimiento de la red. En [51], se demuestra el monitoreo de registros de eventos comerciales donde se exportó una solicitud de préstamo a un BGF para facilitar el proceso de toma de decisiones comerciales en función de los datos disponibles. En nuestro trabajo, presentamos la aplicación de un enfoque GDB para el análisis de CPS industrial, que logra el mapeo uno a uno entre las actividades de la red y las acciones físicas correspondientes.



3 Estudio de caso: Atención de máquinas robóticas

El banco de pruebas y el sistema de medición inalámbricos industriales del NIST proporcionan un marco reutilizable que se puede utilizar para evaluar numerosas tecnologías inalámbricas. En esta sección, se presenta un estudio de caso de una celda de trabajo de dos robots que atienden máquinas para presentar los procedimientos propuestos en el flujo de trabajo de datos. Esta sección revisa el diseño de la celda de trabajo, el sistema de medición y el equipo utilizado que sirve en un caso típico de evaluación. En esto

sección, detallamos la implementación del sistema físico del caso de uso de ingeniería discutido donde se aplica nuestro enfoque de evaluación

3.1 Implementación y medidas de la celda de trabajo

En el banco de pruebas, se realiza la tarea de recoger y colocar de dos robots que se puede adaptar a otros casos de uso y tecnologías inalámbricas. Se construyó una celda de trabajo para realizar una tarea de recoger y colocar con un robot dual que está controlada por un controlador lógico programable (PLC) supervisor. Los robots tienen seis grados de libertad y utilizan mensajes de comunicación Modbus/TCP para recibir y ejecutar tareas asignadas desde el supervisor PLC. También hay cuatro máquinas emuladas de control numérico (CNC) que detectan el estado físico del banco de pruebas con sensores de proximidad. Para detectar si la máquina CNC está libre u ocupada, se colocan sensores de proximidad en el radio interior de las copas que sujetan las piezas.

La Fig. 2 muestra los robots, el PLC supervisor y las máquinas CNC en el banco de pruebas en relación con la rampa de cola física que suministra piezas a las máquinas CNC. Se utiliza una interfaz hombre-máquina (HMI) para agregar tareas a la cola de trabajos. Para realizar la tarea de recoger y colocar, el operador mueve las piezas desde la rampa de la cola a cada una de las máquinas CNC y de regreso a la rampa de la cola. Entre cada movimiento del Operador, el Inspector realiza una detección de búsqueda forzada para determinar si la pieza está en la ubicación correcta antes de que el Operador proceda. Se pueden encontrar más detalles sobre el flujo de trabajo del banco de pruebas en [12].

Todos los dispositivos de comunicación del banco de pruebas se diseñaron originalmente para utilizar Ethernet TCP/IP para las comunicaciones. Para habilitar la conexión inalámbrica en el banco de pruebas, se utilizan puentes Ethernet-WiFi para comunicaciones inalámbricas a través de un punto de acceso (AP) común. También es posible utilizar otras tecnologías inalámbricas industriales como los convertidores Ethernet-Zigbee. Para establecer los puentes Ethernet-WiFi, se utilizan computadoras de factor de forma pequeño, llamadas NUC, ya que permiten flexibilidad en la celda de trabajo. Para el experimento de este documento, los NUC utilizaron una sola antena para comunicaciones inalámbricas mediante IEEE 802.11n (Wi-Fi) en la banda ISM de 2,4 GHz. Cada NUC está configurado para ser una de las siguientes formas: un puente, un rastreador inalámbrico, un generador de tráfico o un sumidero de tráfico. Estas configuraciones en la red se muestran en la Fig. 3.



En el banco de pruebas se recopilan tres tipos diferentes de mediciones (datos de estado de la red, del robot y del PLC). Los datos de tráfico de red, cableado e inalámbrico se capturan utilizando siete dispositivos de punto de acceso de prueba (TAP) y un rastreador inalámbrico, que se muestra en la Fig. 3 con etiquetas verdes. Se utiliza una máquina que ejecuta UBUNTU 18.04, que no se muestra, para capturar los datos de todo el tráfico de la red cableada en el banco de pruebas. Los datos de posición y de estado del robot se capturan desde los controladores del robot utilizando el protocolo de intercambio de datos en tiempo real (RTDE) [52]. Los datos RTDE se capturan en una estación de trabajo de captura de datos Linux. Por último, los datos de estado del PLC se capturan localmente en el PLC supervisor durante cada prueba del experimento. Estos tres tipos de medidas (datos de estado de la red, del robot y del PLC) comparten una marca de tiempo precisa que se origina en la sincronización con el gran servidor de tiempo maestro.

3.2 Equipo utilizado

Los siguientes equipos se ilustran en la Fig. 3. Se utilizan NUC equipados con Intel Core i7 que ejecutan UBUNTU 14.04, que permiten las comunicaciones inalámbricas en el banco de pruebas; los NUC se comunican a través de un AP común. El AP es un enrutador inalámbrico Netgear AC1900 compatible con IEEE 802.11ac 4x4; sin embargo, MIMO no se usa para el experimento en este documento. Para las comunicaciones por cable, se utilizan dos conmutadores Ethernet de grado industrial Cisco IE 4000 que son compatibles con PTP para la sincronización de tiempo. Los robots colaborativos que realizan la tarea de recoger y colocar son de la serie CB "UR3" de Universal Robots. Los robots colaborativos están equipados con sensores de fuerza/par OnRobot HEX-H, que el inspector utiliza para inspeccionar las piezas. El PLC supervisor es un Beckhoff CX2020 con módulo PTP EL6688 para sincronización horaria. Los simuladores CNC son PLC Beckhoff CX9020. Los siete dispositivos TAP en el banco de pruebas son SharkTap Gigabit Network Sniffers. Para sincronizar la temporización de los dispositivos mientras se toman las medidas, se utiliza un servidor de tiempo gran maestro Meinberg Lantime M900. Por último, tanto el operador como el inspector utilizan un conmutador Ethernet no gestionado de 8 puertos DGS-108 de D-link para las comunicaciones por cable entre el controlador del robot y el sensor de par de fuerza. Estos conmutadores también se utilizan para permitir que la estación de trabajo Linux recopile datos RTDE a través de una conexión por cable. el operador y el inspector utilizan cada uno un conmutador Ethernet no administrado D-link DGS-108 de 8 puertos para las comunicaciones por cable entre el controlador del robot y el sensor de par de fuerza. Estos conmutadores también se utilizan para permitir que la estación de trabajo Linux recopile datos RTDE a través de una conexión por cable. el operador y el inspector utilizan cada uno un conmutador Ethernet no administrado D-link DGS-108 de 8 puertos para las comunicaciones por cable entre el controlador del robot y el sensor de par de fuerza. Estos conmutadores también se utilizan para permitir que la estación de trabajo Linux recopile datos RTDE a través de una conexión por cable.

4 Aplicación de GDB en el Cuidado de Máquinas Robóticas

Se creó un GDB para administrar los datos recopilados de las mediciones del banco de pruebas tanto del tráfico de la red como de las operaciones físicas. En esta sección, presentamos brevemente los componentes gráficos desarrollados para nuestro banco de pruebas y el flujo de procesamiento de datos que transforma los resultados de las mediciones en entidades gráficas.

Para justificar el uso del enfoque propuesto, comenzamos declarando y definiendo las características de los datos recopilados y los requisitos para el enfoque de la base de datos implementada en el manejo de los datos para el objetivo de nuestro estudio de la siguiente manera:

1. Datos heterogéneos: los datos recopilados del sistema de comunicaciones inalámbricas industriales son heterogéneos en diferentes aspectos de la siguiente manera
 - a. Diferentes fuentes: recopilamos datos de red en varios nodos de red en el sistema. Además, los datos recopilados mediante el rastreador inalámbrico describen el entorno físico inalámbrico. También se recopilan datos del controlador supervisor, que incluyen los estados del sistema y los comandos de supervisión. Los datos de los robots se utilizan para describir las acciones físicas realizadas.
 - b. Diferentes formatos: los datos incluyen diferentes formatos de archivo, como archivos de captura de paquetes (PCAP), y los datos que provienen de diferentes PLC y controladores de robot se almacenan en formato de archivos de valores separados por comas (CSV). Otro ejemplo es el formato de marca de tiempo de diferentes dispositivos.
 - c. Diferentes velocidades: los paquetes de datos pueden ser tanto periódicos como impulsados por eventos. Además, la retroalimentación del estado del robot es periódica con una tasa de actualización diferente a la tasa de actualización del estado del PLC.

2. Las entidades están interrelacionadas: este es el principal requisito y desafío en este trabajo, donde el objetivo es obtener la conexión directa uno a uno entre las acciones físicas y sus entidades correspondientes, incluidas las actividades de red, el entorno inalámbrico físico a través de informes de sniffer y el entorno físico. estado del sistema.
3. Varios tipos de entidades: el modelo de datos considerará dos tipos de entidades del sistema, a saber, dinámicas y estáticas. La clase de entidades estáticas cubre los perfiles de configuración del banco de pruebas que contienen componentes del banco de pruebas, interfaces de red y sus configuraciones. Estas entidades normalmente están predeterminadas o recopiladas en la inicialización de cada medición. La clase de entidades dinámicas captura varios eventos del sistema, como informes de estado de la máquina, tráfico de red y flujos de información en el banco de pruebas. Estas entidades se agregan dinámicamente al conjunto de datos cuyas cantidades y propiedades están determinadas por los datos medidos.
4. Modelo de datos con múltiples mecanismos de abstracción: el modelo de datos considerado y las consultas correspondientes deben abarcar múltiples niveles de abstracción, incluido el nivel de datos de tráfico, el nivel de hardware físico, el nivel de entorno físico, el nivel de acciones físicas y las interacciones entre estos diversos niveles. El sistema de base de datos de la red debe permitir la categorización y el etiquetado a través de estos niveles.
5. Consultas de viaje en el tiempo: el modelo de datos y la base de datos resultante deben permitir la consulta directa de variaciones temporales de las entidades estudiadas. Por lo tanto, las relaciones temporales entre los paquetes de datos y las acciones físicas correspondientes deben almacenarse y ser directamente accesibles.
6. Consultas eficientes de rutas y relaciones: dado el requisito de tener nodos interrelacionados, el lenguaje de consulta debe permitir que las consultas de rutas y relaciones extraigan directamente esta información. Estos tipos de consultas se utilizan para calcular varias métricas del sistema y, por lo tanto, deben realizarse de manera eficiente.

Teniendo en cuenta estos requisitos discutidos, el enfoque de la base de datos de gráficos se selecciona para la gestión de datos debido a las siguientes razones. Primero, el modelo de datos se define de manera que los nodos del mismo tipo pueden tener diferentes conjuntos de propiedades y, por lo tanto, GDB ofrece la capacidad de almacenar datos sin un esquema obligatorio, de modo que hay más flexibilidad en la forma en que se organizan y se accede a los datos en la forma más adecuada para la aplicación [54]. El GDB también permite obtener información de las relaciones entre puntos de datos o en aplicaciones donde la información disponible para los usuarios finales está determinada por sus conexiones con otros. Además, el GDB muestra datos de forma intuitiva, por lo que se puede realizar una inspección visual de ciertas conexiones de datos [9, 38, 55]. Más específicamente, los datos recopilados que salen del banco de pruebas están en formato de tabla. Sin embargo, realizar consultas que atraviesan estas tablas requiere un procesamiento costoso; por lo tanto, construir un gráfico conectado una vez facilita el recorrido y obtiene las consultas más directas.

Con respecto al uso de Neo4j en el enfoque GDB propuesto, encontramos al estudiar la literatura que Neo4j ofrece lo siguiente: consultas de vecindario o recorrido de gráficos, la capacidad de integrarse dentro de nuestras herramientas analíticas en Python, la complejidad de la consulta no

depende del tamaño del gráfico y del uso del lenguaje de consulta Cypher [55–57]. Más específicamente, los registros almacenados en Neo4j están vinculados con punteros directos para evitar mantener una estructura de indexación dedicada adicional para recorrer el gráfico y, en consecuencia, la complejidad de la consulta no depende del tamaño del gráfico. En cambio, solo depende de qué tan grande sea el subgráfico visitado. Además, en la Tabla 3 y la Sección 4.8 en [55], se resume una comparación entre Neo4j y otros enfoques de GDB donde los criterios de comparación son el modelo utilizado, las propiedades de almacenamiento de registros, los bordes de almacenamiento y la distribución de datos. Se afirmó en [55] que Neo4j es el sistema de base de datos de gráficos más popular, según diferentes clasificaciones de bases de datos. Por otro lado, la sintaxis de Cypher se utiliza para consultar la estructura de la base de datos de gráficos en Neo4j. Cypher es un lenguaje de consulta declarativo que permite a los usuarios especificar qué acciones desean realizar, como hacer coincidir, insertar, actualizar y eliminar datos de gráficos. La sintaxis está en formato ASCII, que proporciona una forma bien conocida y legible de colapsar patrones de nodos y relaciones dentro de conjuntos de datos de gráficos [56]. Se afirmó en [57] que Neo4j puede almacenar cientos de billones de entidades. Neo4j puede soportar las operaciones de almacenamiento, consulta, copia de seguridad y redundancia para datos a gran escala. Aunque estas características se pueden encontrar en otras herramientas, encontramos que Neo4j las satisface bien y, por lo tanto, es adecuada para nuestra aplicación. que proporciona una forma bien conocida y legible de colapsar patrones de nodos y relaciones dentro de conjuntos de datos de gráficos [56]. Se afirmó en [57] que Neo4j puede almacenar cientos de billones de entidades. Neo4j puede soportar las operaciones de almacenamiento, consulta, copia de seguridad y redundancia para datos a gran escala. Aunque estas características se pueden encontrar en otras herramientas, encontramos que Neo4j las satisface bien y, por lo tanto, es adecuada para nuestra aplicación. que proporciona una forma bien conocida y legible de colapsar patrones de nodos y relaciones dentro de conjuntos de datos de gráficos [56]. Se afirmó en [57] que Neo4j puede almacenar cientos de billones de entidades. Neo4j puede soportar las operaciones de almacenamiento, consulta, copia de seguridad y redundancia para datos a gran escala. Aunque estas características se pueden encontrar en otras herramientas, encontramos que Neo4j las satisface bien y, por lo tanto, es adecuada para nuestra aplicación.

4.1 Modelo de datos de referencia

En un GDB, el modelo de datos, que puede ser más o menos análogo al "esquema" de las bases de datos relacionales, ilustra cómo se organizan y almacenan los registros de datos en un gráfico. Sin embargo, a diferencia de un esquema fijo, el modelo de datos de GDB tiene más flexibilidad para representar diversos tipos de datos, contenido y conexiones entre diferentes entidades cuya estructura y perfil de propiedad pueden actualizarse y evolucionar con más datos y/o mejor observación. Un modelo de datos contiene diferentes tipos de nodos con propiedades específicas en el gráfico y varias relaciones entre ellos. En [13], identificamos los requisitos de un modelo de datos GDB y construimos un gráfico que contiene nodos y relaciones que exhiben principalmente información sobre dispositivos industriales en red en una celda de trabajo de fábrica. En este papel, poblamos aún más el gráfico de datos de celda de trabajo definido anteriormente mediante la introducción de tipos de nodos adicionales que caracterizan las acciones físicas que se capturan recientemente. En consecuencia, actualizamos las relaciones, como la asociación de datos de informes de calidad de servicio (QoS) individuales del rastreador inalámbrico con los paquetes capturados en el receptor colocado. El modelo de datos actualizado proporciona una visión integral de las operaciones de producción, los flujos de información y las variaciones de canales inalámbricos en el banco de pruebas, lo que facilita el trabajo de análisis adicional.

Como se muestra en la Fig. 4, aquí se ilustra un ejemplo que resume los nodos, las relaciones y sus propiedades clave utilizadas en el GDB. Elaboraremos la definición y el uso de estas entidades en el resto de esta sección.

Diseño de nodos: Para representar de manera efectiva las operaciones del banco de pruebas en la medición, definimos una serie de tipos de nodos en el gráfico. Los nodos son elementos de GDB que se utilizan para identificar los componentes del banco de pruebas, los estados de los dispositivos y los mensajes que almacenan instantáneas del banco de pruebas para su posterior análisis. Se pueden encontrar en dos clases principales según el tipo de objetos que represente el nodo.

la clase de *estática* cubre los perfiles de configuración del banco de pruebas, que contienen componentes del banco de pruebas, interfaces de red y sus configuraciones. Estas entidades normalmente están predeterminadas o recopiladas en la inicialización de cada medición. Suelen permanecer constantes en cada ronda de mediciones. En nuestro modelo de datos, esta clase de nodos incluye lo siguiente.

Actor Un componente físico dentro de la celda de trabajo de la fábrica, como un robot, un PLC u otro elemento en red.

Ntwk ID Un elemento de dirección de red para un actor, como una dirección de Protocolo de Internet (IP).

SMS Un sistema de gestión del espectro (SMS) observa y registra eventos espectrales significativos dentro de la celda de trabajo y puede informar esos eventos a los actores dentro de la celda de trabajo.

Oledor Dispositivo de medición que registra todas las transmisiones realizadas a través del medio inalámbrico e incluye la información de cabecera inalámbrica para cada transmisión inalámbrica detectada.

Adaptador Dispositivo que sirve para conectar un actor a una red (los adaptadores se dividen en subcategorías según el tipo de interfaz a una red).

Adaptador: Ethernet Una subcategoría de adaptador que representa una interfaz Ethernet.

Adaptador: inalámbrico Una subcategoría de adaptador que representa una interfaz inalámbrica.

Adaptador: Inalámbrico: AP Una subcategoría de adaptador que representa una interfaz de punto de acceso inalámbrico.

Adaptador: Inalámbrico: UE Una subcategoría de adaptador que representa una interfaz de equipo de usuario inalámbrico.

la clase de *dinámica* Los nodos en el gráfico capturan varios eventos del sistema, como informes de estado de la máquina, tráfico de red y flujos de información en el banco de pruebas. Estos nodos se agregan dinámicamente al gráfico, y esas cantidades y propiedades están determinadas por los datos medidos. En nuestro modelo de datos, esta clase de nodos incluye lo siguiente.

Transacción Un intercambio completo de información entre dos o más actores (múltiples actores pueden participar en una transacción).

Mensaje Un evento de transmisión de red que ocurre entre dos actores (los mensajes son esencialmente transmisiones de paquetes capturadas en la capa de transporte; varios mensajes admiten una transacción).

Informe QoS Informe de calidad de servicio de un mensaje (no todos los mensajes tendrán un informe de QoS).

Acción Física (PhyAction) Una ocurrencia física dentro de la celda de trabajo de la fábrica asociada con los Actores a través de múltiples relaciones basadas en el tiempo.

PhyAction:URScheduleUna subcategoría de PhyAction que representa una decisión de programación tomada por el supervisor PLC para un robot

PhyAction: estado del sensorUna subcategoría de PhyAction que representa una lectura en tiempo real del estado del sensor de proximidad en un CNC

PhyAction:RouteStateUna subcategoría de PhyAction que representa una lectura en tiempo real de la ruta de acción en un robot

Relaciones gráficas—Una relación en el gráfico denota una acción realizada para asociar dos nodos, ya sean homogéneos o heterogéneos, que muestra sus conexiones en la topología, línea de tiempo o afiliación. Identificamos las siguientes relaciones en el banco de pruebas.

PARTICIPO ENLos actores participarán en las transacciones. Existe una transacción para cada conjunto lógico de mensajes entre actores, como la configuración de un registro Modbus o el envío de un comando a un robot. Por lo tanto, los actores participarán en muchas transacciones y múltiples actores pueden participar en una sola transacción.

SOPORTADOLos mensajes (es decir, paquetes entre actores) se asocian con transacciones a través de la relación SOPORTADA. Dependiendo del protocolo y la calidad del canal, una sola transacción puede tener uno o varios mensajes conectados a través de esta relación.

TX/RXUn actor puede transmitir (TX) o recibir (RX) un mensaje. Tanto la relación TX como la RX contienen una marca de tiempo en el formato de una época que es un número de coma flotante en segundos desde el 1 de enero de 1970, con una resolución de microsegundos.

TOMÓCuando un actor realiza una acción física, se crea una relación TOK entre el actor y el nodo de acción física. Esta relación contiene propiedades de tiempo de inicio y finalización, así como la fuente de la observación, como una cámara en red.

REPORTADOUn SMS puede ser un oyente pasivo o activo dentro de una celda de trabajo. Cuando un SMS funciona como oyente activo, los informes espectrales del SMS pueden enviarse a un actor de manera que el actor pueda responder de manera inteligente al evento espectral. Los informes de un SMS a un actor se capturan dentro de esta relación.

CUBIERTOUn rastreador inalámbrico sigue monitoreando los canales inalámbricos en funcionamiento y extrae la información de QoS del enlace en tiempo real de los paquetes inalámbricos rastreados, como el indicador de intensidad de la señal recibida (RSSI). Una relación CUBIERTA vincula el nodo QoSReport con el nodo Mensaje concurrente recibido en el mismo lugar. No todos los nodos de mensajes tienen una relación de este tipo con QoSReport, que depende de la disponibilidad del sniffer ubicado junto al receptor y de los datos del sniffer inalámbrico notificados durante la transmisión.

Otras relaciones mostradas en la Fig. 4 pero no explicadas anteriormente se consideran autoexplicativas.

Examen más detallado—El modelo de datos del gráfico está diseñado de forma que los nodos y las relaciones se centren en los actores. Los actores tienen roles duales en las operaciones de la celda de trabajo. En el sistema de fábrica, los Actores participan en las operaciones de producción. En el ejemplo de la Fig.

4, se presentan dos nodos Actor. En este caso, el actor "Supervisor" es el controlador de supervisión y el actor "Operador" es un brazo robótico. El supervisor programa la producción, recopila los estados de los otros actores y aloja servicios de apoyo, como SMS. El Operador sigue las instrucciones del Supervisor y mueve las piezas entre las estaciones de trabajo. Mientras tanto, los Actores también actúan como nodos de comunicación que intercambian mensajes entre sí a través de varias interfaces de red. En la Fig. 4, los Actores participan en una transacción que, en este ejemplo, es un intercambio Modbus/TCP. La transacción en sí está asociada con uno o más mensajes (es decir, paquetes). Cada mensaje asociado con una transacción se manifiesta como un nodo en el gráfico. Existirán múltiples nodos de mensajes para cada transacción. Además,

Los nodos de eventos dinámicos en la medición, es decir, acciones físicas, mensajes de red, transacciones de información y registros QoSReport, tienen marcas de tiempo que representan el "tiempo de medición" de los eventos registrados. Una vez que ocurre un nuevo evento, se agregaría una relación adecuada entre el actor y el nodo de evento físico/de red. Todas las marcas de tiempo están sincronizadas con precisión con el reloj del gran maestro.

4.2 Flujo de trabajo de la información

Se implementa un flujo de trabajo de varias etapas para alimentar el gráfico con instancias de nodos, relaciones y sus propiedades que se extraen de los datos de medición, como se muestra en la Fig. 5. En el conjunto de datos de medición, los datos de red de las sondas de red distribuidas en los enlaces seleccionados se almacenan en archivos de captura de paquetes (PCAP), mientras que los datos operativos que provienen de diferentes PLC y controladores de robot se almacenan en formato de archivos de valores separados por comas (CSV). Todo el proceso contiene cuatro pasos que incluyen el preprocesamiento de datos, la extracción de funciones, la inserción de la base de datos y el ajuste posterior a la importación. Dicha conversión de datos sin procesar al gráfico listo para usar se realizó mediante la ejecución de scripts automatizados en una máquina host que mantiene depósitos de datos de resultados de medición e implementa la aplicación de escritorio Neo4j.

Preprocesamiento de datos-El preprocesamiento de datos es el primer paso en el que los datos de medición se verifican, limpian y formatean para facilitar los siguientes pasos de procesamiento. Como se mencionó anteriormente, los datos de medición contienen resultados recopilados de módulos/dispositivos heterogéneos en el banco de pruebas, que pueden adoptar diferentes tipos de datos, frecuencias de muestreo, resolución métrica y de tiempo y formatos de archivo. Por ejemplo, diferentes máquinas pueden representar y almacenar las marcas de tiempo de registro en varios formatos dependiendo de la configuración del reloj local. Una vez que obtuvimos los datos, unificamos la representación del tiempo en todo el conjunto de datos utilizando la época de tiempo que tiene una resolución de microsegundos. En otro ejemplo, implementamos filtros de paquetes para eliminar las capturas de paquetes no relacionados. En el tratamiento de datos de medición, por ejemplo, experimentando con enlaces de interferencia inalámbricos simples o dobles,

Extracción de características-La extracción de características se refiere al proceso de extraer información relevante de los datos de medición y preparar los datos para insertarlos en la base de datos.

Los nodos y las relaciones están definidos por un conjunto de características que comparten vistas comunes. Desarrollamos scripts bash y Python que seleccionan las características deseadas para producir archivos CSV que están listos para insertarse en la base de datos Neo4j. En este paso, se desarrolló un script bash que ejecuta la herramienta tshark para extraer campos de encabezados de protocolo en capturas de paquetes y guardar la información de campo en archivos CSV. Cada línea en estos registros CSV creará una instancia de nodo de mensaje como una copia del paquete del remitente o del receptor a través de un enlace. También se utilizó un script de Python para detectar cambios de estado en los datos de acción física y etiquetar estos momentos que fueron activados por las comunicaciones del banco de pruebas.

Por ejemplo, la Fig. 6 ilustra la información de temporización que se extrae de los datos de captura de la red y se usa como características en los nodos creados, por ejemplo, Transacciones y Mensajes, y relaciones, por ejemplo, TX y RX. Una transacción de mensaje completa en el enlace PLC-PLC/UR3 incluye dos mensajes, es decir, una solicitud y una respuesta. En los datos de medición, hay cuatro copias de paquetes correspondientes a una transacción, independientemente de las retransmisiones o la pérdida de paquetes. Por lo tanto, en el paso de extracción de características, nuestro script bash llama a tshark para diseccionar las capturas de paquetes para obtener estas cuatro marcas de tiempo que se usarán más tarde para emparejar las copias de paquetes transmitidas y recibidas.

Inserción de gráficos—Cargamos los datos preparados en Neo4j GDB mediante la importación masiva, que puede crear uno o varios nodos y/o relaciones en el gráfico leyendo un archivo CSV una vez. Neo4j usa Cypher para construir consultas GDB para importar datos. Como resultado de la extracción de características, cada línea del archivo CSV puede crear una nueva entidad de nodo y/o generar los criterios para vincular dos nodos calificados para una nueva relación. Las propiedades de las nuevas entidades se pueden asignar explícitamente mediante los valores de columna de los registros o se pueden inferir de reglas predeterminadas, como una combinación fija de nodos y bordes en el gráfico. Se pueden crear varios tipos de nodos a partir del mismo archivo de datos utilizando una plantilla de nodo común en la que cada tipo de nodo tiene su propio subgrupo de propiedades. Por ejemplo, Los paquetes Modbus y ADS usan la misma estructura de nodos de mensajes en nuestro gráfico para administrar la información de transmisión común, como las direcciones IP y la identificación de la sesión TCP. Mientras tanto, cada uno de estos mensajes mantiene su propia información de encabezado de capa de aplicación en las propiedades del nodo, por ejemplo, direcciones de registro Modbus y códigos de función ADS.

Ajuste posterior a la importación:El ajuste posterior a la importación hace referencia a cualquier modificación adicional en el gráfico después de importar los datos CSV. Este paso trata algunos casos en los que los datos sin procesar funcionan con información gráfica actual para obtener otras nuevas. Primero, en el caso de inserción aditiva, es decir, cuando se agregan nuevos datos al gráfico, vincula los nodos recién agregados a los existentes siguiendo las relaciones necesarias entre ellos. Los datos de series temporales suelen utilizar este método para vincular nodos de eventos consecutivos en el proceso registrado. En segundo lugar, es el caso en el que se necesitan características de mayor nivel en el gráfico que se pueden abstraer de los datos importados. Por ejemplo, los nodos Transacción se basan en nodos Mensaje que participan en las mismas transacciones de aplicación; Los propios nodos de mensajes también son el resumen de los datos del paquete, es decir, las copias de los paquetes en los transceptores inalámbricos. Tercero, puede alimentar la extracción de características con piezas de información en el gráfico actual para fines como el acoplamiento de registros de datos. Por ejemplo, acoplar los informes de calidad del servicio y los mensajes en sus ventanas de observación solía ser un proceso que requería mucho tiempo. Por un lado, cada dato bruto del Mensaje, es decir, el emisor o

copia del receptor, contiene sólo la mitad de la información de la ventana de tiempo de transmisión. Por otro lado, la consulta de Cypher tarda mucho tiempo en encontrar todas las relaciones elegibles, ya que Neo4j generaría un enorme producto cartesiano al tratar el gran conjunto de muestras. Resolvimos este problema obteniendo nodos de mensajes calificados e introduciéndolos en la extracción de funciones donde un script de Python más eficiente encuentra todos los pares de informes de QoS de mensajes y luego los presenta en el gráfico como nuevas relaciones CUBIERTAS.

Los cuatro pasos de procesamiento de datos anteriores se pueden realizar a través de múltiples iteraciones para tratar los datos y refinar el gráfico de acuerdo con la complejidad y los requisitos de los datos.

5 resultados

Una vez que los datos residen dentro de la base de datos, aplicamos consultas para extraer información para la evaluación del rendimiento de la celda de trabajo y la visualización de la red y los eventos operativos dentro de la celda de trabajo. Mediante el seguimiento de las rutas a través de las relaciones dentro del gráfico, es posible discernir cómo un evento de red, como la interferencia, se relaciona con eventos físicos, como la incertidumbre de la posición o el rendimiento parcial. Se pueden introducir varios impedimentos como parte de la operación de la celda de trabajo. Entre los ejemplos de dichas deficiencias se incluyen el tráfico inalámbrico en competencia, la interferencia de radio y los reflejos y la difracción debidos al entorno de trayectos múltiples [58]. Hemos demostrado que es factible implementar dichas deficiencias y medir la manifestación del rendimiento físico resultante [12].

Esta sección se introduce para mostrar el tipo de resultados que se pueden obtener para el caso de uso investigado utilizando el enfoque GDB. Estas cantidades incluyen el impacto de la latencia de la transacción inalámbrica en el tiempo de procesamiento de la acción física correspondiente y la correlación entre estas cantidades. Esta sección también presenta el modelo de datos realizado del GDB implementado para verificar que el GDB implementado sigue el modelo de datos previsto. Aunque los resultados obtenidos reflejan el rendimiento del banco de pruebas y, por lo tanto, se pueden obtener utilizando otros enfoques. Será demasiado complicado obtener la conexión uno a uno entre las acciones físicas y las actividades de la red utilizando otro enfoque según nuestro leal saber y entender. Recorrer las tablas de los datos recopilados para cada consulta llevará mucho tiempo si no se construye el GDB. Por eso,

En las siguientes subsecciones, mostramos los resultados de un escenario experimental del banco de pruebas inalámbrico industrial del NIST. En este escenario, se utilizan dos enlaces inalámbricos para conectar los controladores de robot y el AP inalámbrico que está conectado a todos los demás actores en el banco de pruebas. Los nodos inalámbricos son dispositivos IEEE 802.11b/g/n. Durante cada ejecución de este escenario experimental, se emuló la producción de 20 piezas, lo que resultó en 12 minutos de actividad de la red. Realizamos 4 casos experimentales diferentes con respecto a la red de comunicaciones, a saber, 1) línea de base cableada donde todos los enlaces están conectados mediante cables Ethernet para actuar como punto de referencia para la comparación de rendimiento, 2) línea de base inalámbrica donde el tráfico de robots es el único tráfico transferido a través de la red inalámbrica,

pares de una fuente y un sumidero que cada fuente genera 1250 pps de tráfico simultáneamente con el tráfico de robots. Estos pares de tráfico externo tienen un tamaño de paquete de 1000 bytes.

5.1 Esquema Realizado

Después de llenar la base de datos con los datos capturados de las ejecuciones del experimento, el esquema realizado resultante se muestra en la Fig. 7. La visualización del esquema se produce invocando el comando

llamar a `db.schema.visualization()`

en Neo4j. Es importante señalar que, en comparación con el modelo de datos que se muestra en la Fig. 4, un esquema realizado muestra solo una representación de cada nodo y relación. Cuando se emplea la herencia de etiquetas, como en el caso de diferentes tipos de adaptadores, se reproducen las relaciones; sin embargo, esto es el resultado de la herramienta de visualización y no del esquema en sí. La Fig. 7 sirve, por lo tanto, para validar que el modelo de datos pretendido se realizó efectivamente mediante la inserción de datos de eventos del banco de pruebas. En el esquema realizado, las etiquetas heredadas se muestran como nodos separados.

5.2 Procesamiento de acciones físicas

En esta subsección, usamos los datos extraídos del GDB para estudiar el impacto de las comunicaciones inalámbricas en el rendimiento de la acción física. Centramos nuestro análisis en esta subsección en el progreso de `URSchedule` y `RouteState` a lo largo del tiempo, donde `URSchedule` es el nodo dinámico para representar una decisión de acción física en el supervisor y `RouteState` es el nodo dinámico para representar un comando de acción física recibido por uno de los robots donde los parámetros de comando se almacenan en los registros del robot. Nótese aquí que la transacción entre un controlador de robot y el supervisor se inicia con un mensaje de solicitud del controlador de robot y finaliza al recibir también correctamente un mensaje de respuesta del supervisor al controlador de robot.

El supervisor toma decisiones basadas en la información disponible sobre el banco de pruebas. Una vez que toma una decisión, se refleja en el valor de `URSchedule`. Definimos el tiempo de procesamiento del supervisor como el tiempo desde el instante en que se toma la decisión hasta el instante en que se inicia la transacción inalámbrica para solicitar una nueva acción física y se denota por T_{Sorber} . Entonces, la latencia de la transacción es el tiempo total empleado por todos los paquetes inalámbricos correspondientes a una acción tal que es el tiempo entre el instante en que el controlador del robot inicia la transacción inalámbrica para requerir una nueva acción hasta que llegan los datos de el supervisor en el controlador de robot previsto. La latencia de la transacción inalámbrica se indica mediante T_w . El tiempo de procesamiento del robot es el tiempo que transcurre entre el instante en que el controlador del robot recibe los datos inalámbricos y el instante en que se actualiza la acción requerida en el registro `RouteState`, lo que indica que comienza la acción física. El tiempo de procesamiento del robot se denota por T_{Robar} . El tiempo de acción física total, que representa el tiempo necesario para que un comando de supervisor se refleje en el robot correspondiente, se denota por T_{Actoy} evaluado a través de

$$T_{\text{Actoy}} = T_{\text{Sorber}} + T_w + T_{\text{Robar}}. \quad (1)$$

En la figura 8-12, presentamos los valores de los tres componentes del tiempo de acción física total para cada corrida del banco de pruebas. El eje horizontal representa el índice de acción para todas las acciones del operador y del inspector, mientras que los componentes de tiempo correspondientes se muestran en el eje de la figura vertical.

En la Fig. 8, el valor de la latencia de la transacción es casi fijo al implementar un canal cableado, mientras que en la Fig. 9 comienzan a aparecer más fluctuaciones debido a la introducción de un canal inalámbrico en la línea de base inalámbrica. En este caso, el canal es relativamente bueno, por lo que ocurren muy pocas fluctuaciones. En Figs posteriores. 10-12, la interferencia inalámbrica se introduce donde estas fluctuaciones aumentan significativamente. La actualización del registro de RouteState ocurre una vez durante el ciclo de exploración del programa del robot de manera periódica casi cada 120 ms. En este mismo ciclo, también ocurre el inicio de la transacción y, por lo tanto, la suma de estas dos cantidades (T_w

+ T_{Robar}) es igual al tiempo de bucle de aproximadamente 120 ms. Es por eso que cuando la latencia de la transacción aumenta con cierta cantidad de tiempo, el tiempo de procesamiento del robot correspondiente cae exactamente con la misma cantidad de tiempo. Tales observaciones se capturan en las figuras 8-12.

Por otro lado, la mayor parte de la aleatoriedad en el tiempo total de acción física resulta del tiempo de procesamiento del supervisor. También notamos que la aleatoriedad en el tiempo de procesamiento del supervisor no se ve afectada por el canal inalámbrico donde varias ejecuciones del mismo caso inalámbrico con el mismo tráfico de interferencia tienen un rendimiento del tiempo de procesamiento del supervisor completamente diferente, como se muestra en las figuras 10 y 11.

5.3 Distribución estocástica del tiempo de acción física

En esta subsección, presentamos los histogramas normalizados de la latencia de transacción y el tiempo total de acción física en las Figs. 13 y 14, respectivamente. En la Fig. 13, notamos el claro impacto del canal de comunicación y la interferencia en el histograma de la latencia de la transacción, donde la media y la varianza se ven claramente afectadas por los parámetros inalámbricos. Por otro lado, el tiempo de acción física total no se ve afectado directamente por el canal de comunicaciones en este caso de uso debido al hecho de que el bucle de procesamiento del robot compensa cualquier latencia de transacción por debajo del tiempo de bucle de 120 ms.

5.4 Visualización de línea de tiempo

Finalmente, presentamos un resultado de visualización simple logrado al procesar los datos a través del GDB. En la Fig. 15, dibujamos la línea de tiempo de varios eventos relacionados con las acciones físicas. Estos eventos ocurren en el supervisor y el robot correspondiente donde se logra el mapeo mediante la creación y consulta del GDB. La línea de tiempo detallada es solo una versión ampliada de los datos a la izquierda donde los cambios de valor de URSchedule se pueden capturar a través de esta visualización. La conexión principal entre estos eventos, como se muestra en el esquema, es la transacción desencadenante.

5.5 Discusión

En el caso de uso específico estudiado del control de supervisión de atención de máquinas, el impacto de la latencia de la red en la acción física es la métrica principal a estudiar para las aplicaciones de control de supervisión. Otras métricas, como la confiabilidad, pueden ser beneficiosas en otras aplicaciones como control de retroalimentación. Por lo tanto, evaluamos el rendimiento a través de métricas relacionadas con la latencia en este

caso de uso En el trabajo futuro, planeamos modificar el caso de uso para permitir una mayor evaluación de las métricas. El conjunto actual de resultados ilustra el uso de nuestro enfoque para lograr resultados de latencia y evaluar el impacto de la interferencia en este caso de uso específico.

6. Conclusiones

Hemos presentado en este documento un enfoque novedoso para capturar información de eventos operativos y de red de una celda de trabajo de fábrica con los propósitos de 1) capturar y almacenar eventos operativos y de red, 2) calcular métricas de rendimiento de la red y 3) descubrir el rendimiento dependencias entre la red y el ensamblaje físico de la celda de trabajo. Usando una base de datos de gráficos, hemos demostrado que es posible construir una base de datos de este tipo, calcular métricas de rendimiento de la red y descubrir correlaciones. También hemos desarrollado la capacidad de examinar la correlación entre los eventos de la red y el desempeño de las acciones físicas. Hemos probado este enfoque en una celda de trabajo de fábrica de fabricación robótica emulada que tiene dos brazos robóticos de grado colaborativo para una tarea de recoger y colocar. Hemos demostrado que la latencia de las transacciones inalámbricas tiene un impacto mínimo en el tiempo de procesamiento de las acciones físicas en este caso de uso. Se espera que este comportamiento ocurra en muchos casos de uso similares en los que la acción física se realiza después de una exploración en bucle de los parámetros de activación de la acción.

El progreso futuro y los datos de medición se publicarán en el repositorio de dominio público del NIST como referencia para los esfuerzos de modelado de tráfico industrial y estudios comparativos sobre tecnologías inalámbricas industriales [59]. La implementación de este enfoque permite tener una conexión directa entre los paquetes de red y las acciones físicas. Inicialmente, esto puede ayudar en el diseño de la red inalámbrica al permitir que la red reaccione a los eventos que pueden causar perturbaciones de acciones físicas, especialmente en aplicaciones de misión crítica. En el futuro, los resultados se pueden usar directamente en el dominio de control donde los lazos de control podrán reaccionar a los cambios en los parámetros físicos mediante la adaptación de los parámetros de las redes inalámbricas. Además, mediante el despliegue de inteligencia artificial,

Referencias

- [1]. Martinez B, Cano C y Vilajosana X, 2019. "A square peg in a round hole: The complex path for wireless in the manufacturer industry". Revista de comunicaciones del IEEE, 57(4), 4., págs. 109 a 115.
- [2]. Huang VKL, Pang Z, Chen CA y Tsang KF, 2018. "Nuevas tendencias en el despliegue práctico de la tecnología inalámbrica industrial: de casos de uso no críticos a críticos". Revista de electrónica industrial IEEE, 12(2), 6, págs. 50-58.
- [3]. Vilajosana X, Cano C, Martínez B, Tuset P, Melià J, and Adelantado F, 2018. "El panorama de la tecnología inalámbrica en la industria manufacturera: una revisión de la realidad". ArXiv, abs/1801.03648.
- [4]. Kagermann H, Wahlster W y Helbig J, 2013. Recomendaciones para implementar la iniciativa estratégica industria 4.0, grupo de trabajo industria 4.0.
- [5]. Barnard Feeney A, Frechette S y Srinivasan V, 2017. Ingeniería de sistemas cibernéticos para la fabricación. Springer International Publishing, Cham, págs. 81-110.
- [6]. Huang VKL, Pang Z, Chen CA y Tsang KF, 2018. "Nuevas tendencias en el despliegue práctico de la tecnología inalámbrica industrial: de casos de uso no críticos a críticos". Revista de electrónica industrial IEEE, 12(2), 6, págs. 50-58.

- [7]. Dai HN, Wang H, Xu G, Wan J e Imran M, 2019. "Análisis de big data para la fabricación de Internet de las cosas: oportunidades, desafíos y tecnologías habilitadoras". *Enterprise Information Systems*, 6, págs. 1–25.
- [8]. Tao F, Qi Q, Liu A y Kusiak A, 2018. "Fabricación inteligente basada en datos". *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 7, págs. 157–169.
- [9]. Drake M, 2019. Comparación de sistemas y modelos de gestión de bases de datos NoSQL.
- [10]. Lade P, Ghosh R y Srinivasan S, 2017. "Análisis de fabricación e internet industrial de las cosas". *IEEE Intelligent Systems*, 32(3), 5, págs. 74–79.
- [11]. Angles R, y Gutierrez C, 2008. "Encuesta de modelos de bases de datos de grafos". *Cómputo ACM. Surv*, 40(1), 2., págs. 1:1–1:39.
- [12]. Liu Y, Candell R, Kashef M y Montgomery K, 2019. "Un banco de pruebas de células de trabajo colaborativo para comunicaciones inalámbricas industriales: el diseño básico". En 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), págs. 1315–1321.
- [13]. Candell R, Kashef M, Liu Y, Montgomery K y Foufou S, 2020. "Un enfoque de base de datos de gráficos para la evaluación del rendimiento de la celda de trabajo inalámbrica IIoT". En 2020 Conferencia Internacional IEEE sobre Tecnología Industrial (ICIT). (preimpresión, URL:<https://www.nist.gov/publications/graph-databaseapproach-wireless-iiot-work-cell-rendimiento-evaluacion>).
- [14]. Ahmadi A, Moradi M, Cherifi C, Cheutet V y Ouzrout Y, 2019. "Conectividad inalámbrica de CPS para fabricación inteligente: una encuesta". En Congreso Internacional de Software, Conocimiento de la Información, Gestión Industrial y Aplicaciones, SKIMA.
- [15]. Montgomery K, Candell R, Liu Y y Hany M, 2019. Requisitos de usuario inalámbrico para la celda de trabajo de fábrica. tecnología URL del representante:<https://www.nist.gov/publications/wireless-userrequirements-factory-workcell>.
- [dieciséis]. Pang Z, Luvisotto M y Dzung D, 2017. "Comunicaciones inalámbricas de alto rendimiento: los desafíos y oportunidades de un nuevo objetivo". *Revista de electrónica industrial IEEE*, 11(3), págs. 20–25.
- [17]. Damsaz M, Guo D, Peil J, Stark W, Moayeri N y Candell R, 2017. "Modelado de canales y rendimiento de radios Zigbee en un entorno industrial". Taller internacional IEEE sobre sistemas de comunicación de fábrica - Actas, WFCS.
- [18]. Candell R, Remley KA, Quimby JT, Novotny D, Curtin A, Papazian PB, Kashef M y Diener J, 2017. Mediciones de propagación de radio de sistemas inalámbricos industriales. tecnología representante doi: 10.6028/nist.tn.1951.
- [19]. Islam K, Shen W y Wang X, 2012. "Fiabilidad y seguridad de la red de sensores inalámbricos en la automatización de fábricas: una encuesta". *Transacciones IEEE sobre Sistemas, Hombre y Cibernética Parte C: Aplicaciones y Revisiones*.
- [20]. Peil J, Damsaz M, Guo D, Stark W, Candell R y Moayeri N, 2017. Modelado de canales y rendimiento de radios Zigbee en un entorno industrial (NIST-TN-1941). tecnología representante, NIST, Gaithersburg, MD.
- [21]. Lu C, Saifullah A, Li B, Sha M, Gonzalez H, Gunatilaka D, Wu C, Nie L y Chen Y, 2016. Redes inalámbricas de sensores y actuadores en tiempo real para sistemas industriales ciberfísicos. doi: 10.1109/JPROC.2015.2497161.
- [22]. Aminian B, Araujo J, Johansson M y Johansson KH, 2013. "GISOO: Un banco de pruebas virtual para sistemas ciberfísicos inalámbricos". En IECON 2013 – 39.ª Conferencia Anual de la Sociedad de Electrónica Industrial IEEE, IEEE, págs. 5588–5593.
- [23]. Jecan E, Pop C, Padrah Z, Ratiu O y Puschita E, 2018. "Una solución de doble estándar para el despliegue de redes de sensores inalámbricos industriales: banco de pruebas experimental y evaluación del rendimiento". En 2018, 14.º Taller internacional de IEEE sobre sistemas de comunicación de fábrica (WFCS), IEEE, págs. 1 a 9.
- [24]. Ding Y, Hong SH, Lu R, Kim J, Lee YH, Xu A y Xiaobing L, 2015. "Investigación experimental de la tasa de pérdida de paquetes de redes industriales inalámbricas en entornos industriales reales". En la Conferencia Internacional IEEE sobre Información y Automatización de 2015, IEEE, págs. 1048–1053.
- [25]. Liu Q, Ma L, Fan SZ, Abbod MF, Lu CW, Lin TY, Jen KK, Wu SJ y Shieh JS, 2018. "Diseño y evaluación de un sistema de adquisición de señales fisiológicas en tiempo real implementado

en Multiquirófanos de Anestesia". Revista de Sistemas Médicos, 42(8), 8, p. 148. [Pub Med: 29961144]

- [26]. Fink J, Ribeiro A, and Kumar V, 2013. "Control Robusto de Movilidad y Comunicaciones en Equipos de Robots Autónomos". Acceso IEEE, 1, págs. 290–309.
- [27]. Liang W, Zheng M, Zhang J, Shi H, Yu H, Yang Y, Liu S, Yang W y Zhao X, 2019. "WIA-FA y sus aplicaciones a la fábrica digital: una solución de red inalámbrica para la automatización de fábricas". Actas del IEEE, 107(6), 6, págs. 1053–1073.
- [28]. Candell R, 2015. "Un marco de investigación para implementaciones inalámbricas industriales". En Actas del Simposio de Instrumentación ISA 2015.
- [29]. Liu Y, Candell R, Lee K y Moayeri N, 2016. "Un marco de simulación para redes inalámbricas industriales y sistemas de control de procesos". En la Conferencia mundial de IEEE sobre sistemas de comunicación de fábrica (WFCS) de 2016, IEEE, págs. 1 a 11.
- [30]. Wang J, Zhang W, Shi Y, Duan S y Liu J, 2018. "Análisis de big data industrial: desafíos, metodologías y aplicaciones". CoRR, abs/1807.01016.
- [31]. Lee J, 2015. Industrial Big Data (Mechanical Industry Press, China). 07
- [32]. Raptis TP, Passarella A, and Conti M, 2019. "Gestión de datos en la industria 4.0: Estado del arte y desafíos abiertos". Acceso IEEE, 7, págs. 97052–97093.
- [33]. Wan J, Tang S, Li D, Wang S, Liu C, Abbas H y Vasilakos AV, 2017. "Una solución de big data de fabricación para el mantenimiento preventivo activo". IEEE Transactions on Industrial Informatics, 13(4), 8, págs. 2039–2047.
- [34]. (GE). Desbloqueo de datos de la máquina para convertir los conocimientos en resultados poderosos. En línea. URL <https://www.ge.com/digital/>, Consultado el 01-07-2019.
- [35]. Courtney Brian. Análisis industrial de big data: presente y futuro. En línea. URL <https://www.isa.org/intech/20140801/>, consultado el 01-07-2019.
- [36]. (TEJIDO). Big Data y toma de decisiones en plantas industriales. En línea. URL <https://new.abb.com/cpm/production-optimization/big-data-analytics-decision-making>, Consultado el 2019- 07-01.
- [37]. Kumar Kaliyar R, 2015. "Bases de datos de gráficos: una encuesta". En Conferencia Internacional sobre Informática, Automatización de las Comunicaciones, págs. 785–790.
- [38]. Vyawahare HR y Karde PP, 2015. "Una descripción general del modelo de base de datos de grafos". Revista internacional de investigación innovadora en ingeniería informática y de comunicaciones (IJIRCE), 3, 8, págs. 7454–7457.
- [39]. Satone KN, 2014. "Modelos de bases de datos de grafos modernos". Revista internacional de investigación y aplicaciones de ingeniería (IJERA), págs. 19–24.
- [40]. Wood PT, 2012. "Lenguajes de consulta para bases de datos de grafos". SIGMOD Record, 41, págs. 50–60.
- [41]. Jadhav PS y Oberoi RK, 2015. "Análisis comparativo de modelos de bases de datos de gráficos mediante clasificación y agrupación mediante la herramienta weka".
- [42]. Macko P, Margo D y Seltzer M, 2013. "Introspección de rendimiento de bases de datos de grafos". En Actas de la 6.ª Conferencia Internacional de Sistemas y Almacenamiento, SYSTOR '13, ACM, págs. 18:1–18:10.
- [43]. Webber J y Robinson I, 2015. "Los 5 principales casos de uso de bases de datos de grafos". libro blanco, Neo4j.
- [44]. Kükükeçeci C, y Yazici A, 2019. "Seguimiento de objetos multinivel en redes inalámbricas de sensores multimedia para aplicaciones de vigilancia usando big data basado en gráficos". Acceso IEEE, 7, págs. 67818– 67832.
- [45]. Gomez-Rodriguez M, Leskovec J, and Krause A, 2012. "Inferir redes de difusión e influencia". ACM Trans. Saber Descubrir Data, 5(4), 2., págs. 21:1–21:37.
- [46]. Skhiri S y Jouili S, 2013. Minería de gráficos grandes: desarrollos recientes, desafíos y posibles soluciones. Springer Berlin Heidelberg, Berlín, Heidelberg, págs. 103–124.
- [47]. Kan B, Zhu W, Liu G, Chen X, Shi D y Yu W, 2017. "Modelado y análisis de topología de una red eléctrica mediante una base de datos de gráficos". Revista Internacional de Computación Sistemas de Inteligencia, 10(1), pág. 1355.

- [48]. TK, AK, Thomas JP y Parepally S, 2017. "Un marco de recuperación de información eficiente y seguro para redes centradas en contenido". *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 104, 6, págs. 223-233.
- [49]. Barik MS, Mazumdar C y Gupta A, 2016. "Análisis de vulnerabilidad de la red utilizando un modelo de datos de gráfico restringido". págs. 263-282.
- [50]. Diederichsen L, Choo K-KR y Le-Khac NA, 2019. "Un enfoque basado en una base de datos gráfica para analizar archivos de registro de red". En *Network and System Security*, Liu JK y Huang X, eds., Springer International Publishing, págs. 53-73.
- [51]. Esser S, 2019. "Uso de estructuras de datos de gráficos para registros de eventos".
- [52]. Robots universales. Guía de intercambio de datos en tiempo real (RTDE). En línea. URL <https://www.universal-robots.com/how-tos-and-faqs/how-to/ur-how-tos/real-time-data-exchange-rtdeguide-22229>, consultado el 8 de enero de 2020.
- [53]. Comité Técnico, 2008. "Estándar IEEE para un protocolo de sincronización de reloj de precisión para sistemas de medición y control en red - línea roja". IEEE Std 1588-2008 (Revisión de IEEE Std 1588-2002) - Redline, 7, págs. 1-300.
- [54]. Robinson I, Webber J y Eifrem E, 2015. "Interiores de la base de datos de gráficos". En *Graph Databases*, segunda edición. O'Reilly, cap. 7, págs. 149-170.
- [55]. Besta M, Peter E, Gerstenberger R, Fischer M, Podstawski M, Barthels C, Alonso G y Hoefler T, 2019. "Desmitificación de las bases de datos de gráficos: análisis y taxonomía de la organización de datos, diseños de sistemas y consultas de gráficos".
- [56]. Fosis I y Solic K, 2019. "Enfoque de base de datos de gráficos para almacenamiento, presentación y manipulación de datos". En 2019, 42.a Convención internacional sobre tecnología de la información y la comunicación, electrónica y microelectrónica (MIPRO), IEEE, págs. 1548-1552.
- [57]. Huang H y Dong Z, 2013. "Investigación sobre arquitectura y rendimiento de consultas basado en la base de datos de gráficos distribuidos Neo4j". En 2013, Tercera Conferencia Internacional sobre Electrónica de Consumo, Comunicaciones y Redes, IEEE, págs. 533-536.
- [58]. Candell R, Remley C, Quimby J, Novotny D, Curtin A, Papazian P, Koepke G, Diener J y Kashef M, 2017. *Sistemas inalámbricos industriales: medidas de propagación de radio. tecnología representante*, Instituto Nacional de Estándares y Tecnología, Gaithersburg, MD.
- [59]. Candell R, Hany M, Liu Y y Montgomery K *Sistemas inalámbricos confiables y de alto rendimiento para la automatización de fábricas*. URL <https://www.nist.gov/programs-projects/reliable-high-performance-wireless-systems-factory-automation>.

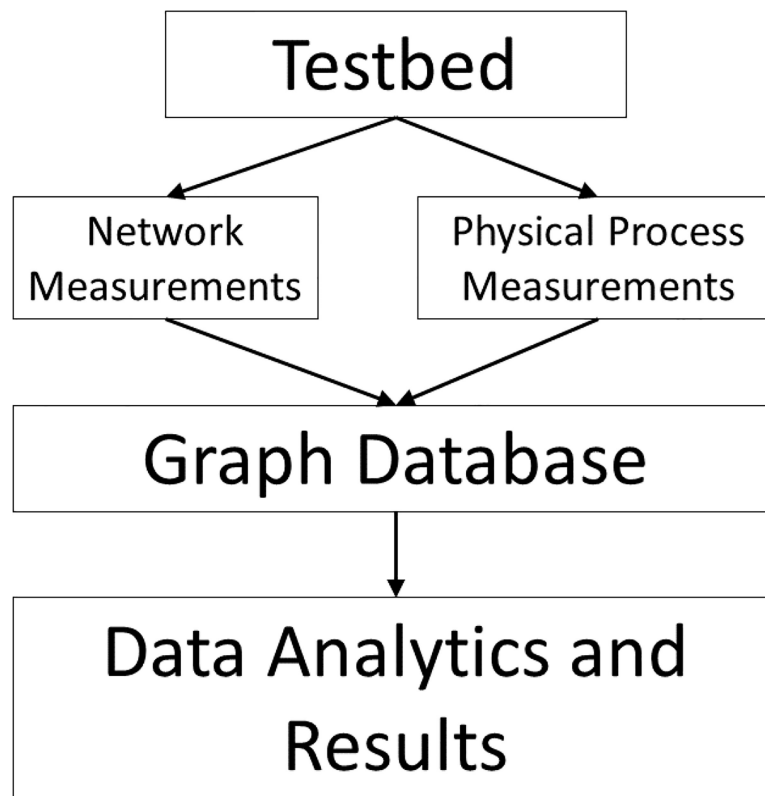


Figura 1:

Enfoque de base de datos de gráficos para la evaluación del rendimiento de la red inalámbrica

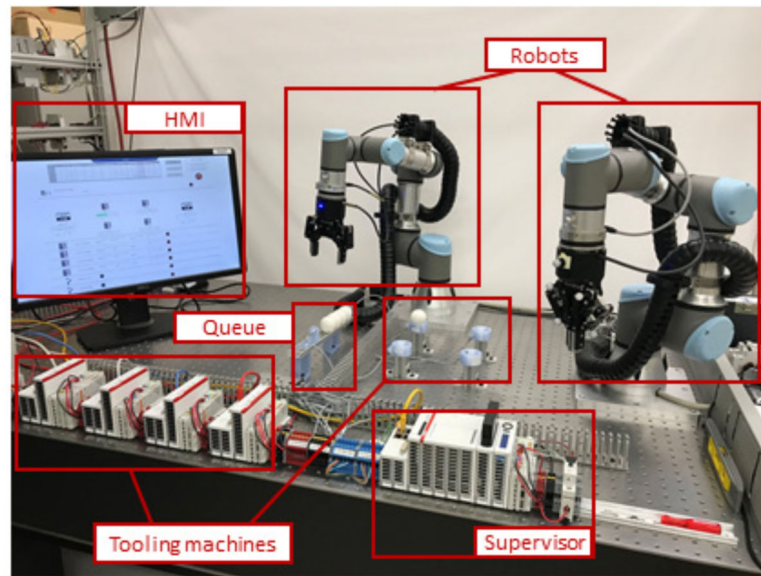


Figura 2:

Banco de pruebas de células de trabajo colaborativo

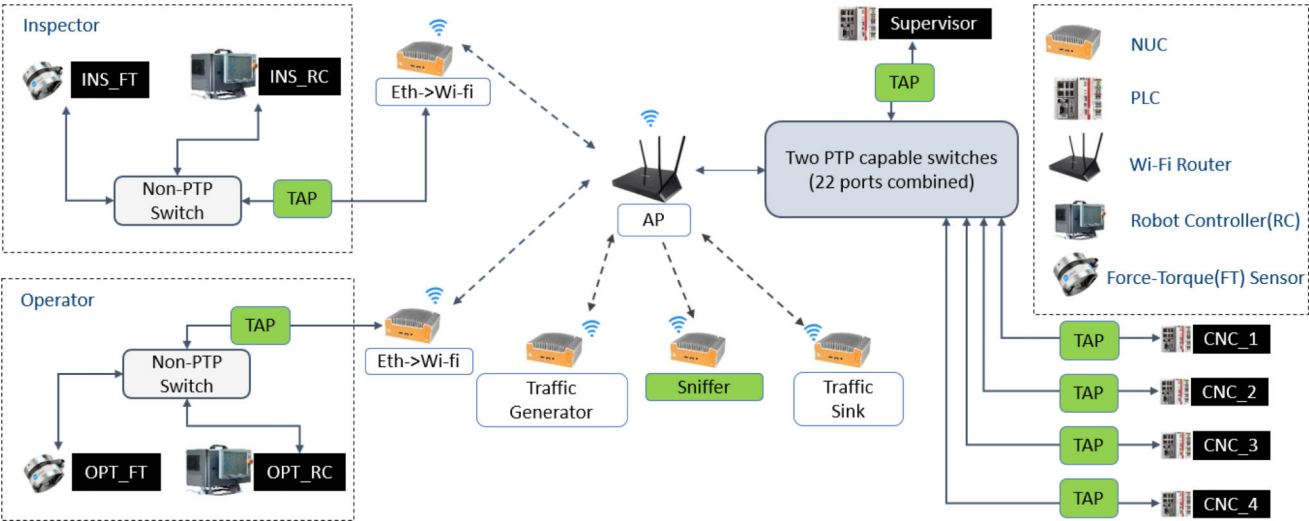


Fig. 3: Diagrama de red del banco de pruebas. Las líneas continuas representan comunicaciones basadas en Ethernet y las líneas discontinuas representan comunicaciones basadas en inalámbricas.

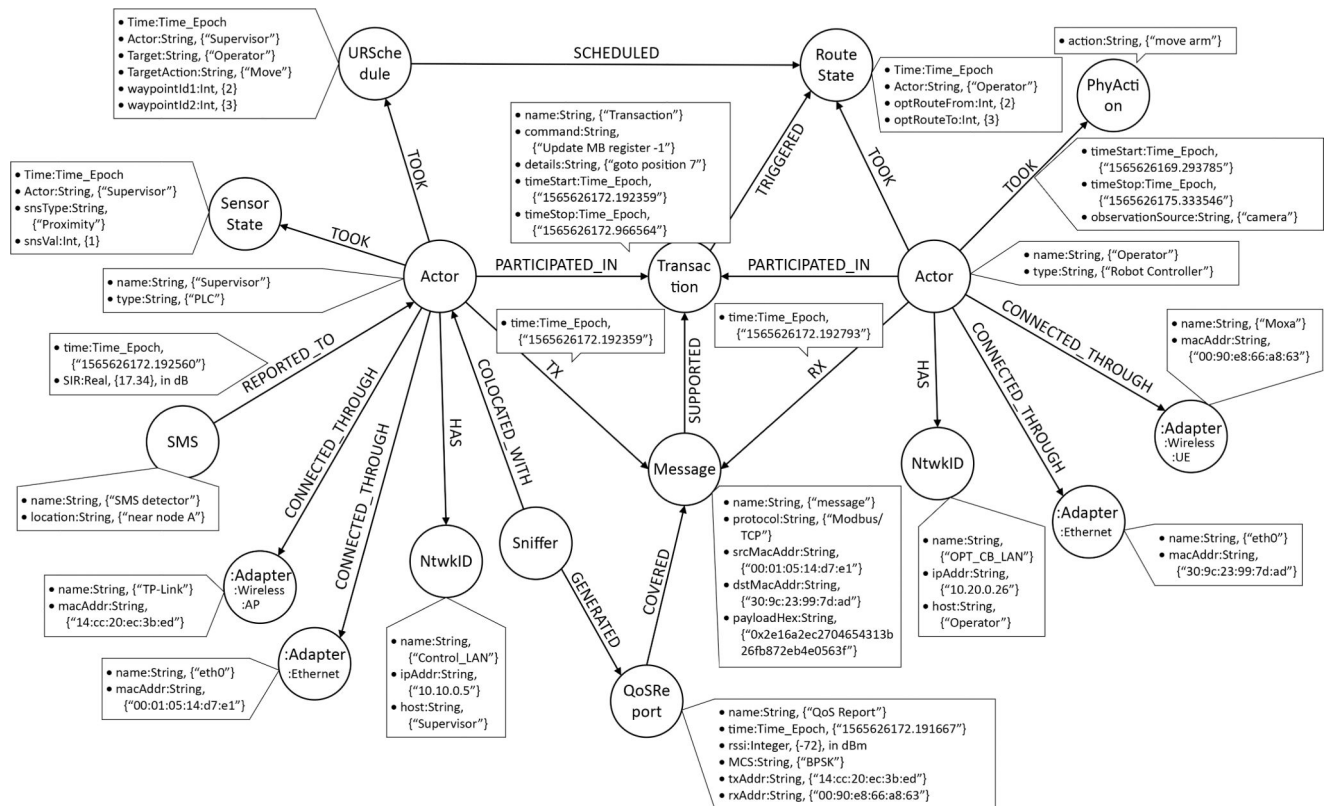
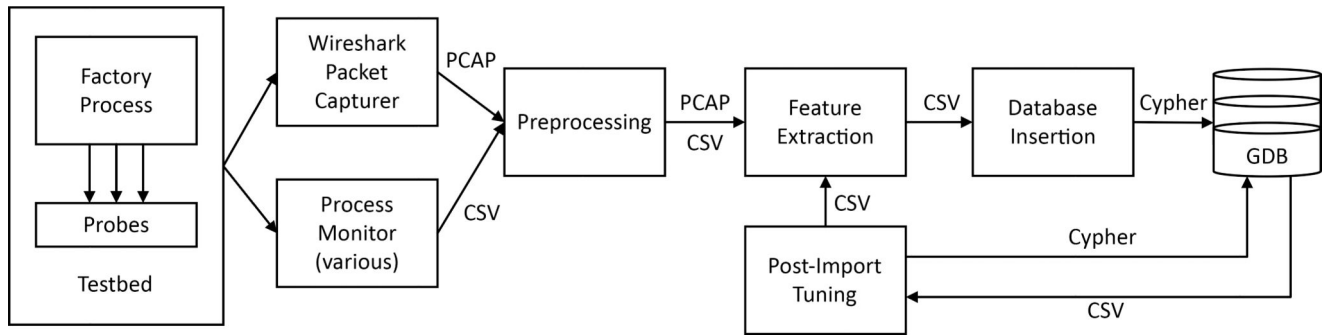


Figura 4:

El modelo de datos de la base de datos de gráficos utilizada para cada ejecución operativa del banco de pruebas de fábrica inalámbrico NIST. El gráfico está organizado en nodos y bordes, donde los bordes significan relaciones entre elementos de red y elementos operativos físicos.

**Figura 5:**

Flujo de procesamiento de datos desde la celda de trabajo de la fábrica hasta la base de datos

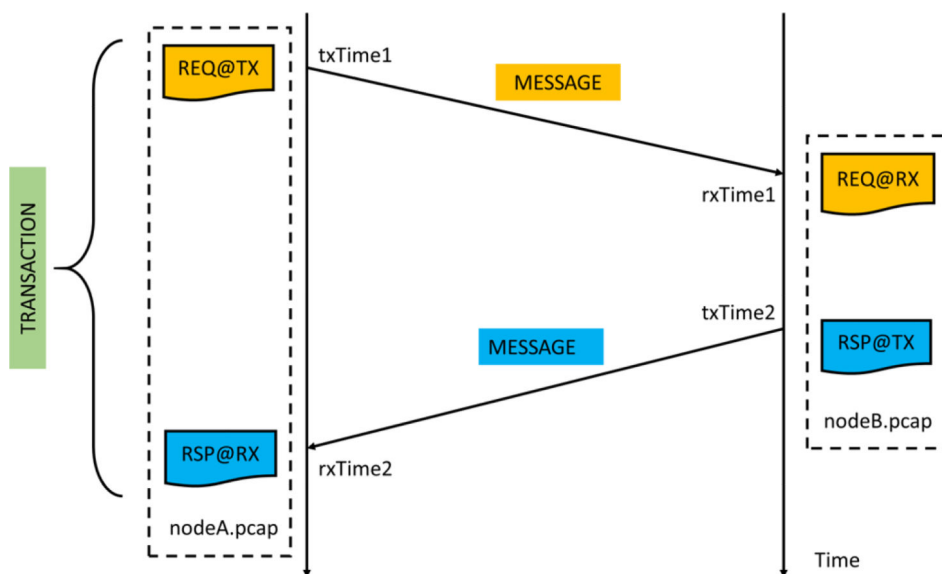


Figura 6:

Ilustración de línea de tiempo de múltiples capturas de red en una transacción de comando de control

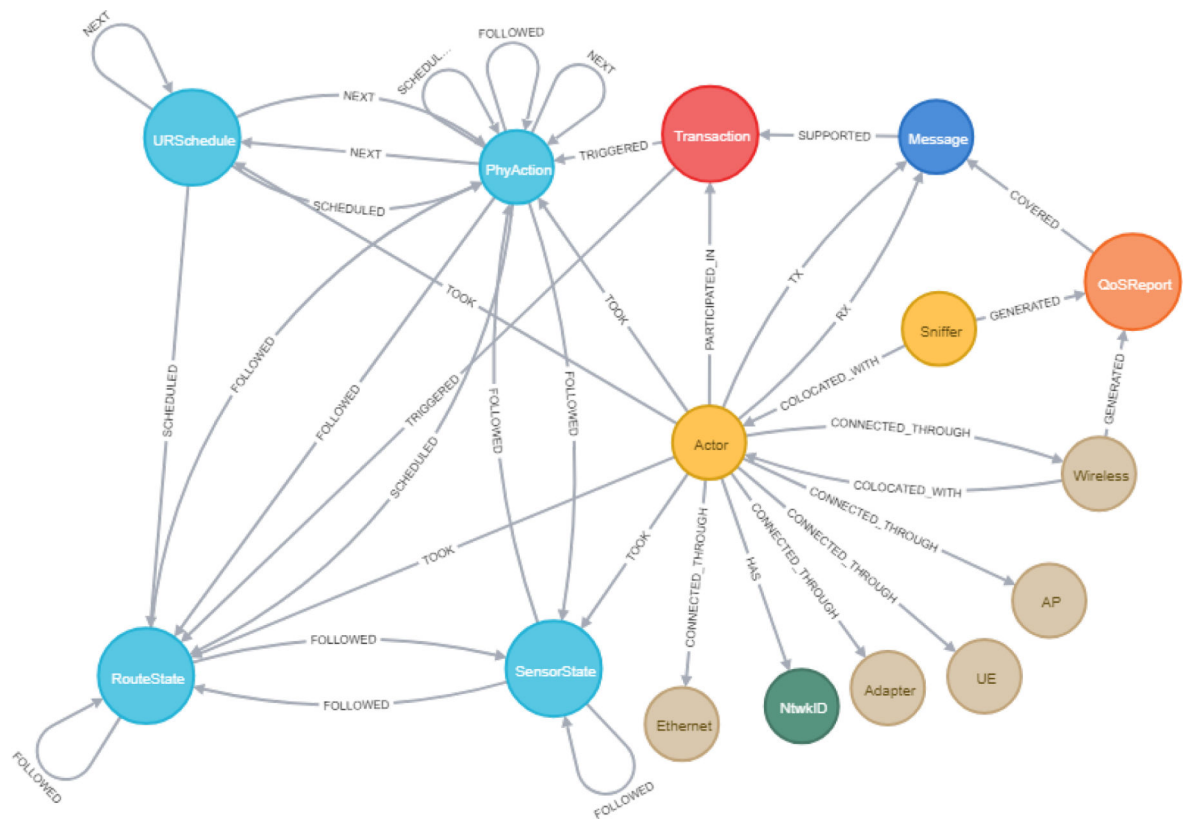
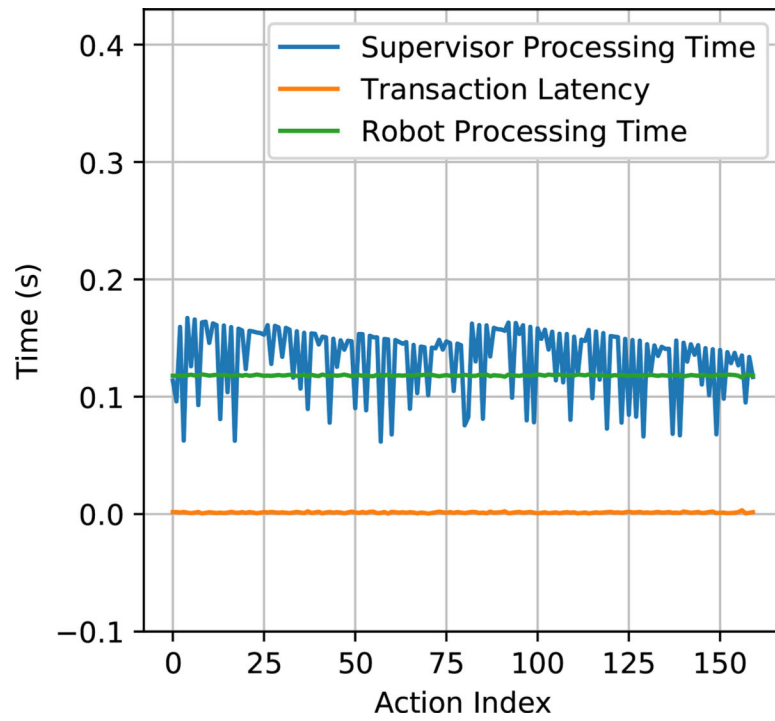
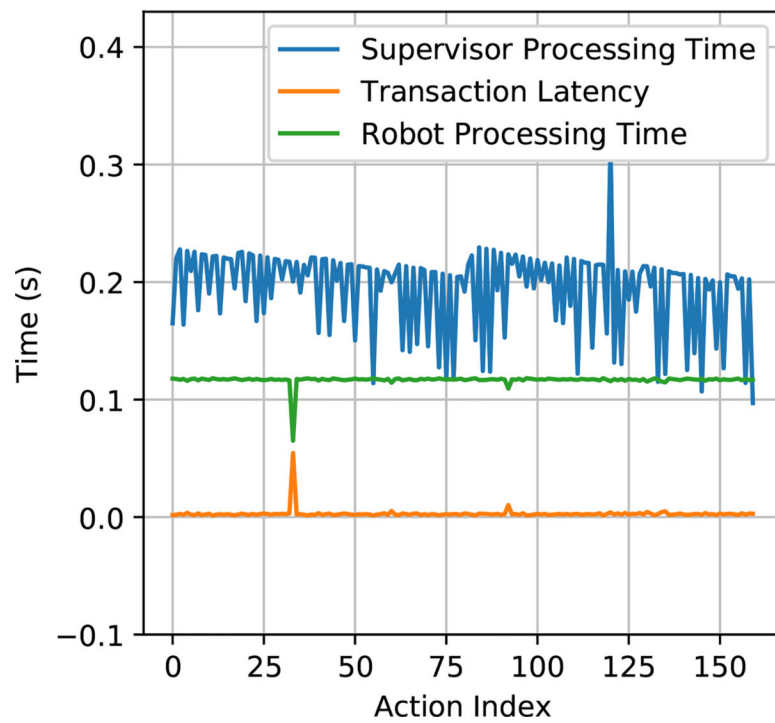


Figura 7:

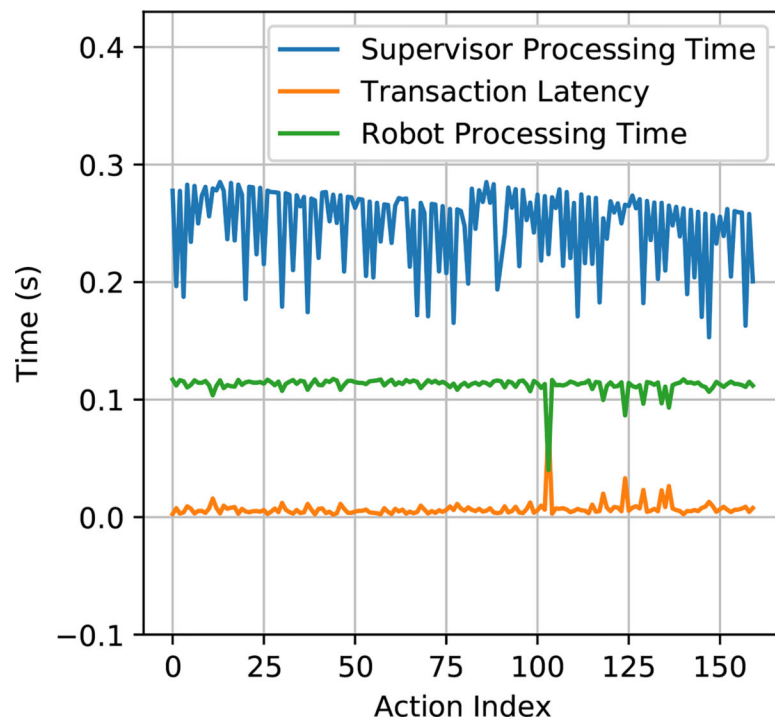
Esquema realizado de la base de datos de gráficos completamente poblado después de capturar la red y los datos operativos del banco de pruebas inalámbrico industrial NIST

**Figura 8:**

Tiempo de acción física de línea de base con cable

**Figura 9:**

Tiempo de acción física de línea de base inalámbrica

**Figura 10:**

Inalámbrico con tiempo de acción física de tráfico de 2500 pps (ejecución 1)

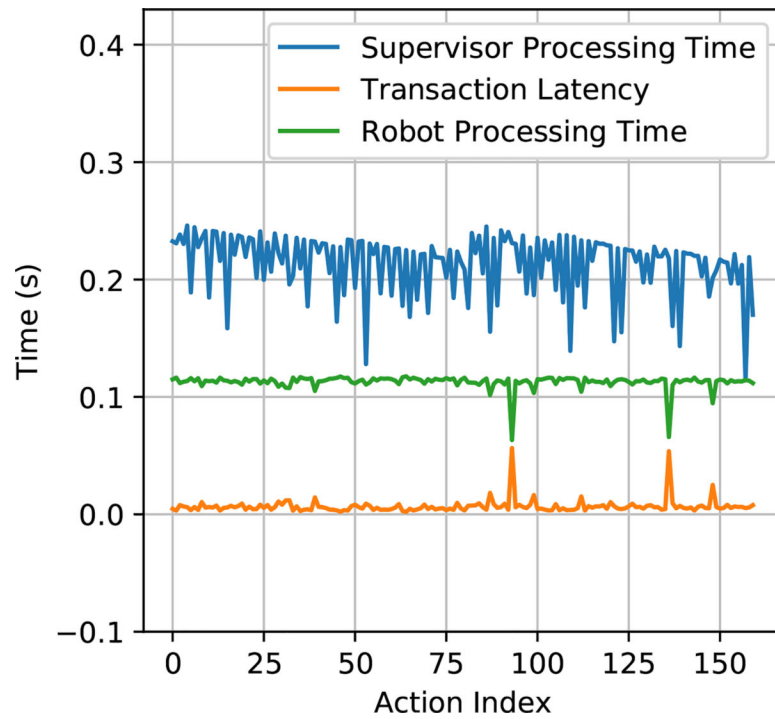


Figura 11:

Inalámbrico con tiempo de acción física de tráfico de 2500 pps (ejecución 2)

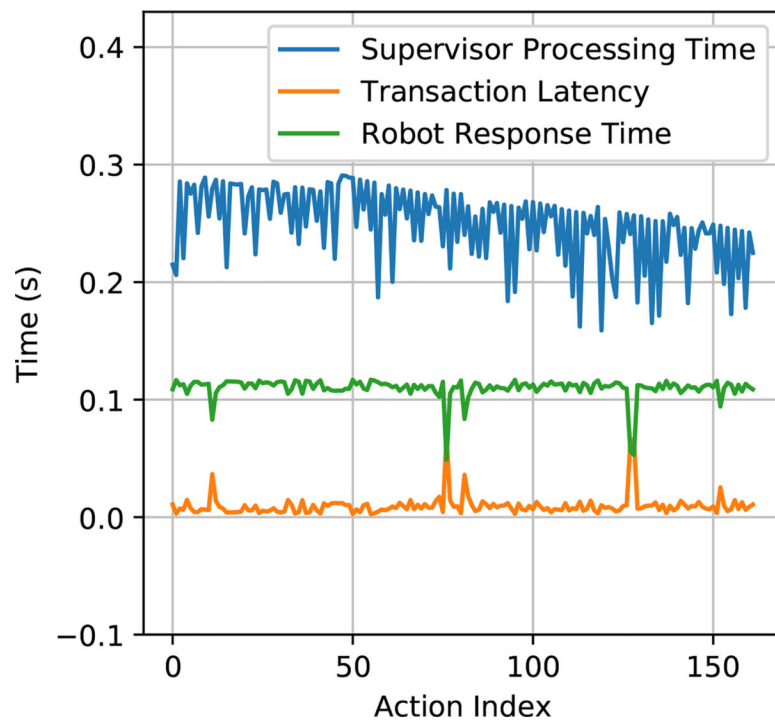
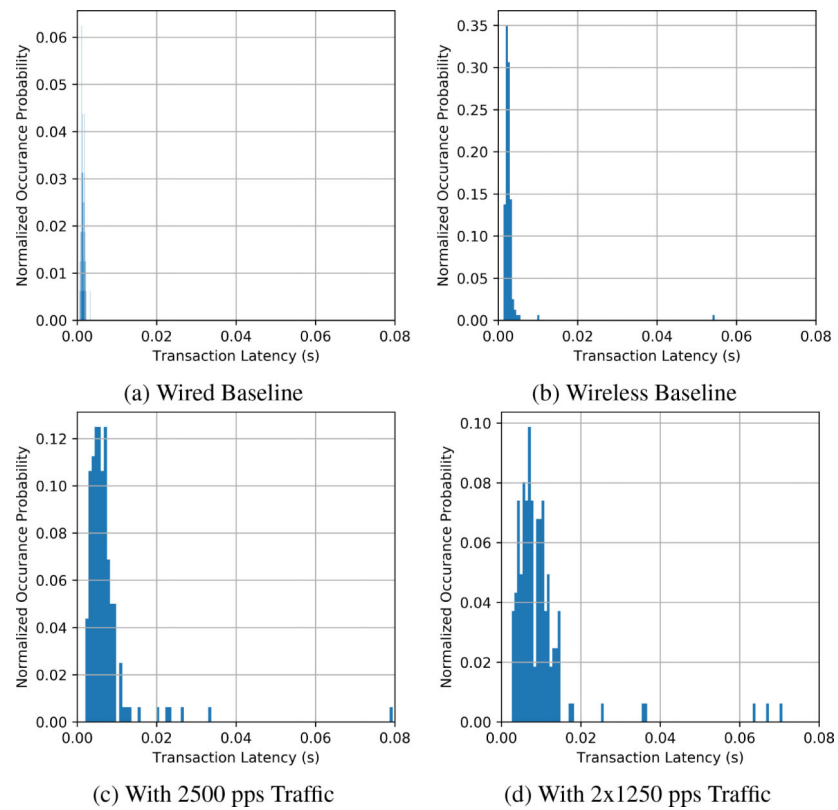
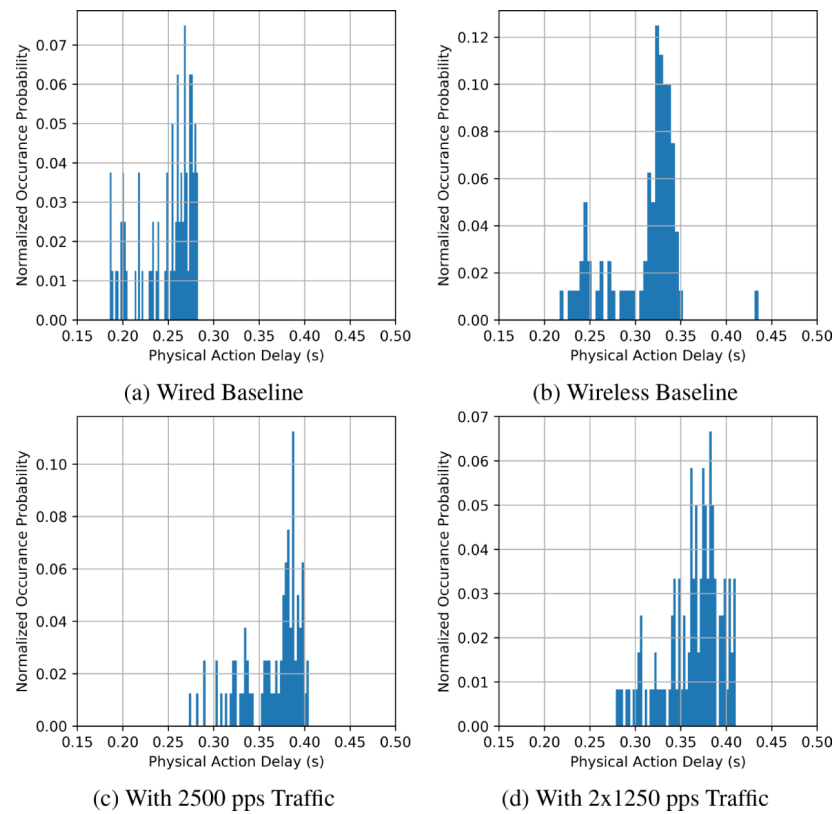


Figura 12:

Inalámbrico con tiempo de acción física de tráfico de 2×1250 paquetes/s

**Figura 13:**

Histogramas de latencia de transacción para varios escenarios experimentales

**Figura 14:**

Histogramas de tiempo de acción física para varios escenarios experimentales

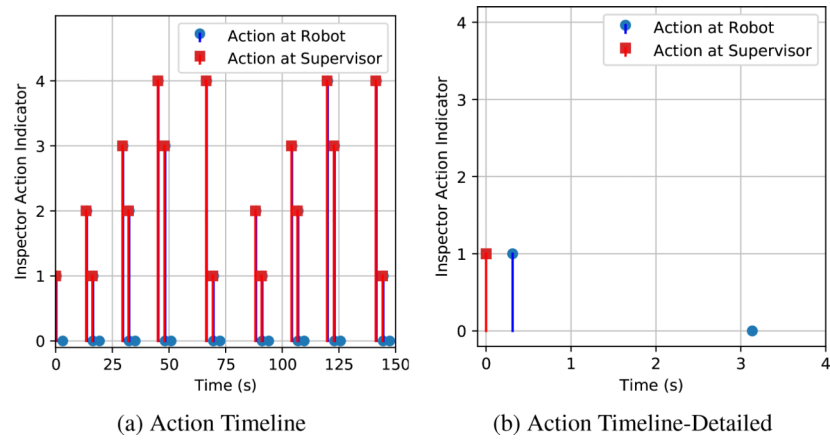


Figura 15:
Cronología de varios eventos relacionados con la acción física

Tabla 1:

Comparación de características con las plataformas de evaluación inalámbricas industriales existentes

	Solicitud Dominio	Caso de uso	Configuración del sistema			Recopilación de datos		Evaluación	
			Físico Sistema	Inalámbrico Red	Factor RF	Físico	Red	Datos Proceso	CPS Métrica
Este trabajar	Fábrica Automatización	Robótica Trabajar-celula	HW (PLC, robots, 10 - 125 Hz actualizaciones)	HW (WLAN IEEE 802.11b/g/n como presentado)	Interior (Laboratorio), administrado WiFi interferencia radios en 2,4 GHz	Dispositivo Inicio sesión, remoto acceso	Ethernet / WiFi oledor	Tubería, guiones, grafico base de datos	Control demora, sistema falla
aminiano 2013 [22]	Proceso Automatización	Doble-Tanque nivel controlar como presentado	SO (por Simulink)	SW (Inalámbrico Malla con IEEE 802.15.4), HIL (provisional)	SUDOESTE	Simulador Inicio sesión	Simulador Inicio sesión	Visual inspección, guiones	Control, E/S
Jecán 2018 [23]	Proceso Automatización	Industrial Inalámbrico Red	No	HW (HART inalámbrico más NIA 100.11a)	Interior (Laboratorio)	No	Red gerente	guiones	No
Timbre 2015 [24]	Proceso Automatización	Inalámbrico sensores y Actuación	HW (válvula controlar, 1 Hz actualizaciones)	HW (HART inalámbrico, NIA 100.11a)	Interior (fábrica), administrado Zigbee y WLAN en 2,4 GHz	No	Paquete oledor	guiones	No
liu, q 2018 [25]	Proceso Automatización	Inalámbrico médico telemetría	HW (operación habitación quirúrgico supervisión)	HW (WLAN IEEE 802.11b/g/n)	Interior (múltiple habitaciones apartado por paredes)	Salud base de datos (MySQL)	WiFi señal analizador, JPerf	guiones	Base de datos peticiones
Soplón 2013 [26]	robótica	Robot equipos	HW (móvil AGV)	hardware (IEEE 802.15.4)	interior (dos oficina/laboratorio edificios)	Ubicación reportado a 5 Hz	Señal fortaleza reportado a 5 Hz	guiones	No
Liang 2019 [27]	Fábrica Automatización	AGV, seguridad	HW (móvil AGV)	HW (WIA-FA)	Interior (industrial sitios)	Dispositivo Inicio sesión, campo medidas	Señal analizador, espectro analizador, red analizador	guiones	Movimiento distancia error
Candell 2015 [28]	Proceso Automatización	Químico proceso control	HIL (proceso simulador, SOCIEDAD ANÓNIMA, sensores)	hardware (IEEE 802.15.4-TDMA)	Interior (Laboratorio)	Simulador Inicio sesión	No	guiones	Proceso control
Liu, y. 2016 [29]	Proceso Automatización	Químico proceso control	SUDOESTE (proceso simulador)	SO (IEEE 802.15.4-TDMA)	SW (POR-SNR curvas)	Simulador Inicio sesión	Simulador Inicio sesión	guiones	Proceso control seguridad

Notas: HW: banco de pruebas de hardware; SW: software de simulación; HIL: simulación hardware-in-the-loop.

"scripts" significa el procesamiento de datos que utiliza un código/programa específico para tratar los datos del experimento en la evaluación del rendimiento.