

**.XXXVII.**

# JORNADAS DE AUTOMÁTICA

FACULTAD DE INFORMÁTICA  
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

## LIBRO DE ACTAS

7, 8 y 9  
SEPTIEMBRE  
2016  
**MADRID**



# MODELADO Y ANÁLISIS DE MISIONES MULTI-ROBOT MEDIANTE MINERÍA DE PROCESOS

Félix Díez, Juan Jesús Roldán y Antonio Barrientos  
Centro de Automática y Robótica (UPM-CSIC)  
C/ José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid

[felix.diez.arias@alumnos.upm.es](mailto:felix.diez.arias@alumnos.upm.es), [jj.roldan@upm.es](mailto:jj.roldan@upm.es), [antonio.barrientos@upm.es](mailto:antonio.barrientos@upm.es)

## Resumen

*Las misiones multi-robot pueden alcanzar una complejidad comparable a los procesos industriales y la gestión de las empresas o los servicios públicos. La minería de procesos es una disciplina emergente que se está aplicando con éxito al análisis de estos sistemas. Esta disciplina aborda el modelado, el análisis y la mejora de procesos a partir de la información contenida en registros de eventos. Este artículo propone la aplicación de la minería de procesos en el contexto de las misiones con múltiples robots. En concreto, este trabajo realiza dos contribuciones novedosas: la definición de un protocolo para la utilización de estas técnicas en el contexto de la robótica, y la aplicación en un escenario real de vigilancia y extinción de incendios con una flota de UAVs. Los resultados muestran el potencial de esta herramienta para el análisis de misiones, la detección de problemas como cuellos de botella o asignaciones de recursos ineficientes y la propuesta de mejoras.*

**Palabras Clave:** Robótica, Misión, Multi-Robot, Minería de Procesos, Modelado, Análisis.

## 1 INTRODUCCIÓN

Las misiones con múltiples robots cada día son más comunes y se aplican en nuevas áreas. Las razones para utilizar una flota de robots en lugar de un solo robot son variadas. Por un lado, el número de aplicaciones es mayor, ya que pueden llevar a cabo misiones complejas que requieran la participación de varios agentes y un cierto nivel de coordinación. Por otro lado, el rendimiento también es mayor, puesto que cuentan con diferentes robots para realizar diferentes tareas y pueden buscar la distribución de recursos óptima. Los equipos de robots pueden ser homogéneos o heterogéneos y estar compuestos por robots terrestres, marinos, submarinos o aéreos según el escenario.

La complejidad de estas misiones depende de múltiples factores: la composición de la flota, las características del escenario, la necesidad de

coordinación, etc. En algunos casos, el control de las misiones multi-robot es equiparables en complejidad al de los procesos industriales, las empresas o los servicios públicos. De hecho, todos estos sistemas se pueden analizar desde el mismo punto de vista: se dispone de un conjunto de recursos que deben ser asignados a un conjunto de tareas para alcanzar un conjunto de objetivos. Además, estas misiones implican una serie de retos en términos de factores humanos, tales como la comprensión del estado de la misión y la reducción de la carga de trabajo del operador, que pueden dar lugar a errores en el control y la monitorización [1].

La minería de procesos es una disciplina que estudia los procesos a partir de registros de eventos y modelos de los mismos. Esta disciplina dispone de herramientas para analizar los procesos según la gestión del tiempo o el consumo de recursos, así como generar modelos a partir de la experiencia contenida en registros de eventos. La minería de procesos ha emergido en los últimos años y se está aplicando a procesos como los sistemas sanitarios [2] o los comercios por internet [3]. En un trabajo anterior se realizó una aproximación teórica a la aplicación de la minería de procesos al análisis de misiones robóticas [4].

Este trabajo tiene como objetivo seguir esta línea y aplicar la minería de procesos al análisis de misiones con múltiples robots. En concreto, este artículo realiza dos contribuciones novedosas: la definición de un protocolo para la utilización de estas técnicas en el contexto de la robótica, y la aplicación en un escenario real de vigilancia y extinción de incendios con una flota de UAVs.

La sección 2 describe la minería de procesos y sus diferentes recursos. La sección 3 establece una metodología sistemática para aplicar la minería de procesos a misiones multi-robot. La sección 4 describe el conjunto de misiones multi-UAV de vigilancia y extinción de incendios. La sección 5 muestra los resultados de aplicar esta metodología a estos experimentos. Por último, la sección 6 resume las conclusiones del estudio y propone una serie de trabajos futuros.

## 2 MINERÍA DE PROCESOS

La minería de procesos es una disciplina que estudia los procesos a partir de registros de eventos y modelos de los mismos [5]. Esta disciplina comparte herramientas y técnicas con el análisis de procesos, la minería de datos, el modelado o la simulación. A continuación se enumeran algunas de sus posibilidades:

- Descubrimiento de modelos: obtención de modelos a partir de registros de eventos mediante la aplicación de algoritmos basados en abstracción (Alpha Miner), heurística (Heuristic Miner) o búsqueda (Genetic Miner) [6].
- Reproducción de modelos: obtención de registros de eventos a partir de modelos, realizando diferentes recorridos para generar diferentes trazas.
- Análisis de conformidad: evaluación de la capacidad del modelo para explicar los comportamientos contenidos en el registro de eventos [7].
- Análisis y mejora de procesos: utilización de diferentes técnicas para estudiar los procesos en términos de tiempo y recursos y poder descubrir cuellos de botella o asignaciones de recursos ineficientes.

### 2.1 REGISTROS DE EVENTOS

Los registros de eventos son sucesiones ordenadas de eventos que forman parte de un proceso. Los eventos se registran mediante un identificador de caso, una actividad, una fecha y hora, unos recursos y otros datos que puedan resultar útiles para el análisis del proceso.

El identificador suele ser un código alfanumérico que identifica la ejecución del proceso. El caso depende del análisis que se desee realizar: por ejemplo, en una misión multi-robot de vigilancia y extinción de incendios puede haber un caso para la misión o un caso para cada robot.

La actividad es la operación que forma parte del proceso y ha generado el evento. Siguiendo el ejemplo, algunas actividades podrían ser un comando del operador, el despegue y el aterrizaje de un robot, el comienzo y el fin de una tarea o un accidente entre dos robots.

Por último, los recursos son los agentes que han participado en la actividad o los medios que se han empleado para el evento. En el ejemplo los recursos podrían ser tanto los robots que participan en la misión como ciertos elementos del escenario (por ejemplo, un pantano donde los robots cargan el agua que liberan sobre el fuego).

## 2.2 MODELOS DE PROCESOS

Los modelos son representaciones de los procesos que permiten su estudio, visualización y simulación. El trabajo con estos modelos reduce la complejidad al permitir la definición de unos ciertos dominios de aplicación y niveles de detalle. Estos modelos se pueden obtener a través del análisis o, como en el caso de la minería de procesos, a partir de la experiencia.

Algunos modelos empleados por la minería de procesos son los sistemas de transiciones, las redes de Petri, las redes causales y los modelos y notaciones de procesos de negocios (más conocidos como BPMN por su nombre en inglés Business Process Model and Notation).

Los modelos tienen que alcanzar un compromiso entre cuatro métricas: ajuste, simplicidad, precisión y generalización. El ajuste indica si el modelo representa adecuadamente el proceso. La simplicidad da una idea de si el modelo es comprensible y útil. La precisión valora si el modelo sirve para analizar los casos actuales. Y la generalización evalúa si el modelo sirve para predecir los nuevos casos.

## 3 METODOLOGÍA

Como se ha visto en la sección anterior, la minería de procesos ofrece multitud de métodos y técnicas tanto a nivel de modelado como analítico. En este trabajo se presenta una metodología sistemática para su aplicación en el contexto de la robótica. Esta metodología responde a dos necesidades:

- Contribuir al desarrollo de esta disciplina emergente y su aplicación en contextos alternativos al mundo de los negocios. Esto permitirá extraer información valiosa para la mejora de los procesos y el aprovechamiento de los recursos.
- Establecer un procedimiento para utilizar la minería de procesos que permita la transferibilidad de las técnicas y la comparación de los resultados entre los distintos estudios. En efecto, este procedimiento permitirá conectar distintas aplicaciones para la discusión a nivel de eficiencia de los algoritmos, profundidad del análisis o conformidad de los casos.

En las siguientes secciones se describe esta metodología a través de sus directrices básicas.

### 3.1 ESTUDIO PRELIMINAR DEL PROCESO

Antes de empezar el análisis es preciso recopilar y estructurar la información que se tiene del proceso. Para ello se debe definir:

- Naturaleza del caso, desarrollo y propósito de la actividad.
- Agentes involucrados en la actividad, campo de actuación y relación con el resto.
- Tipología y atributos de los eventos.
- Número de casos.

Una vez hecho esto, se deben plantear los objetivos del análisis para guiar el trabajo en la dirección apropiada. En función de ellos, se realizarán unos determinados análisis o se aplicarán unas ciertas técnicas.

### 3.2 PREPARACIÓN DE REGISTROS DE EVENTOS

El primer paso del análisis es la preparación del registro de eventos. La información generada por los procesos suele estar recogida en hojas de cálculo guardadas en archivos CSV o Excel. Estos formatos se pueden convertir a XES, el formato estándar para los registros de eventos en la minería de procesos, mediante la herramienta Disco.

La configuración del registro de eventos tiene una influencia considerable en los resultados del modelado. Un registro de eventos debe contener como mínimo casos, actividades y tiempos para generar un modelo. Sin embargo, para realizar un análisis con mayor profundidad puede requerirse información adicional.

- El agente o recurso implicado en el evento es interesante a la hora de generar modelos sociales o evaluar la utilización de los recursos.
- Definir por separado el tiempo de comienzo y finalización de un evento amplía la información para la realización de análisis temporales.

Por otro lado, existe la posibilidad de hacer combinaciones de atributos para obtener diferentes modelos del proceso y analizarlo desde diferentes perspectivas.

- Si se toma como caso tanto la ejecución del proceso como el recurso implicado en el evento, se puede obtener un modelo del proceso global pero que representa a los agentes por separado.
- Si se toma como actividad una combinación de la actividad y el recurso, se puede hacer un análisis que distinga las actividades en función del agente que las ha realizado.

Estas técnicas producen registros de eventos modificados, que tras el modelado darán lugar a modelos diferentes. Corresponde a los conductores de los estudios definir las configuraciones útiles para cada caso en particular.

### 3.3 DESCUBRIMIENTO DE MODELOS

Para el descubrimiento de los modelos se propone el uso de la herramienta de uso abierto ProM (Process Mining framework) [8]. Esta herramienta dispone de multitud de plugins que nos permiten aplicar diferentes algoritmos para obtener diferentes modelos expresados en diferentes notaciones.

A continuación se presentan los modelos básicos para analizar una misión de robots conducida por un operador:

- Modelo completo de la misión: este modelo nos permite detectar el desarrollo a nivel global de la misión. Además, la combinación de las órdenes del operador con las acciones de los robots nos permite observar la relación que existe entre ellos.
- Modelo del operador: este modelo nos permite observar la estrategia seguida por el operador para comandar a los robots en la misión. Entre otras cosas, el modelo permite detectar comportamientos desviados de la normalidad de la ejecución. Estas conclusiones pueden servir para desarrollar sistemas de apoyo a las decisiones del operador.
- Modelo de los agentes: este modelo considera solamente las acciones de los robots y permite evaluar su desempeño y su colaboración durante la misión. Esto nos permite detectar cuellos de botella de la misión, así como utilizaciones ineficientes de los recursos. Este modelo permite analizar la misión desde perspectivas que no son posibles mediante la observación directa del desarrollo o análisis planos de los datos.
- Modelo combinado del operador y los agentes: este modelo se obtiene a partir de un registro particular en el que los casos se separan según los recursos. Su interés radica en que el modelo integra las acciones del operador y los robots pero las representa de manera segregada. Esto tendrá su valor a analizar y reproducir el registro sobre el modelo.

### 3.4 ANÁLISIS Y MEJORA DE MODELOS

Una vez descubiertos los diferentes modelos que nos ayudaran a conducir el estudio, hay que evaluar su grado de conformidad con el registro de eventos.

La herramienta ProM dispone de diversos plugins que determinan el grado de conformidad de los modelos con los registros. Algunos plugins de descubrimiento de modelos, como el "Mine a heuristic net using heuristic miner", proporcionan directamente un valor de ajuste. Sin embargo, otros

modelos requieren de un análisis de conformidad a propósito.

Por otro lado, algunas aplicaciones ayudan a mejorar, filtrar o modificar el modelo para solventar ciertos problemas. Por ejemplo, eliminar ciertos lugares o transiciones poco comunes puede mejorar su simplicidad y su generalización, aunque también puede comprometer su ajuste o su precisión.

### 3.5 REPRODUCCIÓN DEL REGISTRO SOBRE EL MODELO OBTENIDO

Algunos de los plugins que presentan tanto ProM como Disco generan animaciones en tiempo real con los eventos registrados sobre el modelo generado. Este ejercicio puede ayudarnos a detectar desviaciones del modelo, así como a descubrir alternativas en el proceso.

### 3.6 ANÁLISIS TEMPORAL

En este caso se vuelve a hacer uso de la herramienta Disco por tener un interfaz que permite visualizar cómodamente los tiempos empleados en realizar las diferentes actividades o las transiciones entre ellas.

En este sentido se determinan algunos ejercicios de análisis generales que nos servirán en la mayoría de los casos para hallar los tiempos medios, encontrar las tareas más costosas y los cuellos de botella de la misión.

- Modelo de tiempos de actuación: en misiones operadas es interesante determinar los tiempos medios que toma el operador para ejecutar un comando o actuación.
- Modelo de tiempos de decisión: este modelo busca determinar la demora desde que se requiere una intervención del operador hasta que éste es consciente de ello y actúa en consecuencia.
- Modelo de tiempos de ejecución: este modelo determina los tiempos medios que necesitan los robots en realizar sus actividades. Podemos detectar actividades de ejecución excesivamente lenta que pueden dar lugar a planteamientos de mejora ejecutiva.
- Modelo de transiciones entre eventos: este análisis detecta los tiempos de transición entre las actividades, que pueden implicar esperas excesivas o infrutilización de los recursos.

## 4 EXPERIMENTOS

Con objeto de aplicar esta metodología de análisis, se han realizado veinte misiones multi-robot. En las próximas secciones se describe la misión, la flota de robots y la interfaz.

### 4.1 MISIÓN

La misión consiste en la vigilancia y la extinción de incendios, así como la búsqueda y el seguimiento de sospechosos. La figura 1 muestra el escenario escalado que se ha recreado en el laboratorio con los diferentes agentes (tanto los dos UAVs que llevan a cabo la misión, como el UGV que representa a un sospechoso) y puntos de interés (la base donde se encuentran los UAVs al comienzo de la misión, un pantano en el que pueden coger el agua y un fuego que tienen que detectar y apagar).

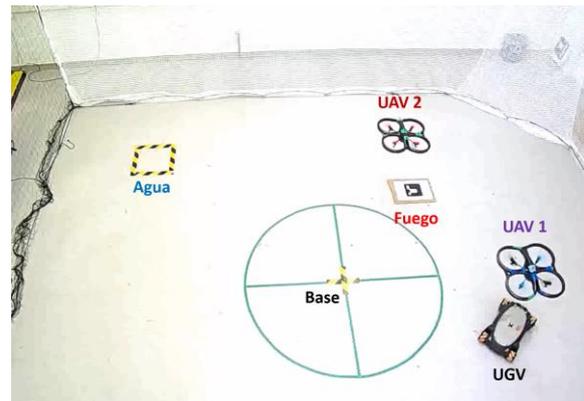


Figura 1: Misiones multi-robot

Estas son las tareas que componen estas misiones:

- Inicio: Encendido y despegue del robot.
- Vigilancia: El robot vuela sobre un área, con una altura de 1,6 metros y un patrón de zigzag, para detectar un objetivo.
- Reconocimiento: El robot vuela sobre un conjunto de puntos, con una altura de 0,8 metros, para comprobar y validar el objetivo.
- Seguimiento: El robot sigue un objetivo móvil con una altura de 1 metro.
- Captura: El robot vuela a la reserva, desciende hasta 0,6 metros y carga el agua.
- Liberación: El robot vuela al fuego, asciende hasta 1,2 metros y descarga el agua.
- Final: Aterrizaje y apagado del robot.

### 4.2 FLOTA

Las misiones se llevaron a cabo con una flota de dos cuadricópteros Parrot AR.Drone 2.0. Estos drones proporcionan una telemetría con el estado, la estimación de la posición y la orientación basada en la odometría visual, las velocidades y aceleraciones lineales y angulares basadas en las lecturas de la unidad de medida inercial (IMU), el nivel de la batería y el voltaje de los motores. Además, un robot terrestre KUKA youBot desempeñó el papel del sospechoso que debe ser detectado y perseguido. Por último, un sistema de captura de movimientos



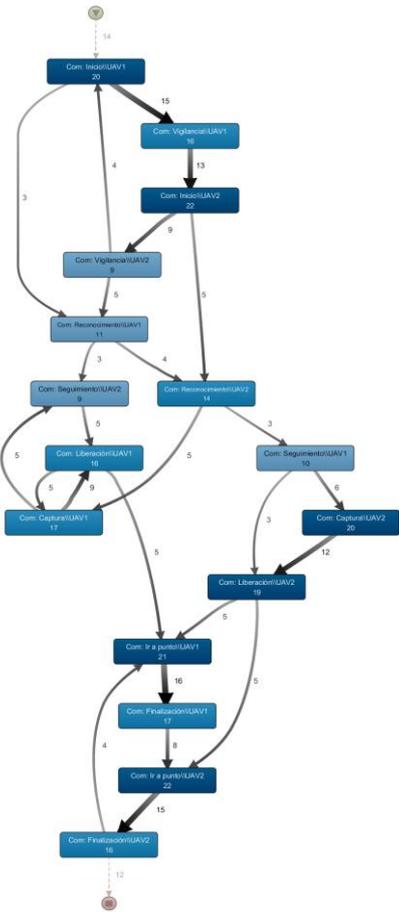


Figura 3: Modelo del operador

### 5.1.3 Modelo de comportamiento de los robots

En este modelo se puede ver la participación de cada robot por separado en la misión. Al no aparecer mezcladas las actividades realizadas por los robots se puede estudiar la concurrencia de sus actividades en cada momento.

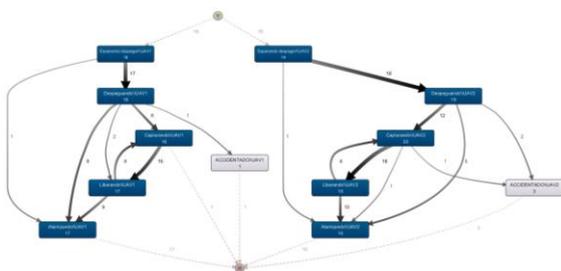


Figura 4: Modelo de los robots

### 5.1.4 Modelo paralelo robots y operador

Este modelo muestra a la izquierda el comando del operador y a la derecha el comportamiento de los diferentes robots. Esto nos puede ayudar a detectar lo

que hace el operador mientras los robots realizan determinadas tareas, así como comparar lo que hace un robot con lo que hacen sus compañeros.

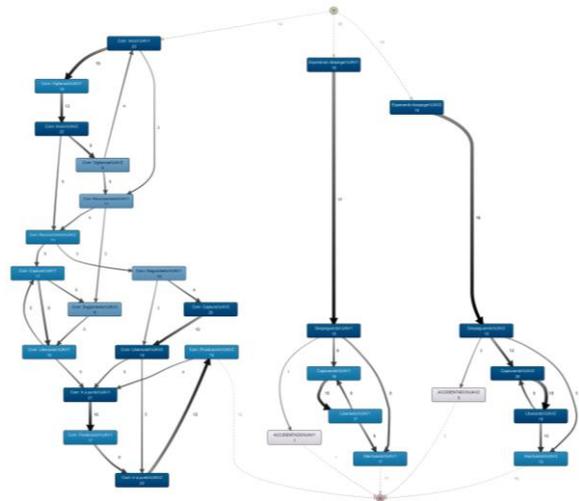


Figura 5: Modelo paralelo de robots y operador

## 5.2 ANÁLISIS TEMPORAL

### 5.2.1 Comandado general del operador

El análisis de tiempo para las diferentes opciones de comando que tiene el operador se muestra en la figura 6.

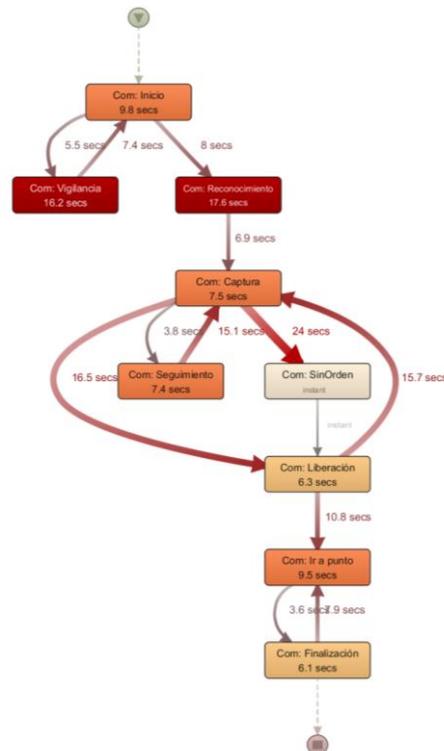


Figura 6: Análisis temporal del comando

Como podemos observar, hay algunos comandos que dificultan o ralentizan las tareas del operador y el desarrollo de la misión. Los dos principales son

vigilancia y reconocimiento, que tienen tiempos medios desde que se abre la interfaz de comando hasta que se emite el comando de 16.2 y 17.6 segundos respectivamente. Estos tiempos son mayores que para el resto de comandos debido a que el operador debe introducir manualmente los puntos clave de la tarea. Ese retardo puede causar que el operador se pierda ciertos sucesos de la misión.

### 5.2.2 Comandado del operador con UAVs

Separando los comandos con función del robot implicado podemos hacer un análisis temporal desde otra perspectiva. En este caso, podemos ver los tiempos medios de transición entre comandos pues se registran por separado los comandos enviados al UAV1 y UAV2.

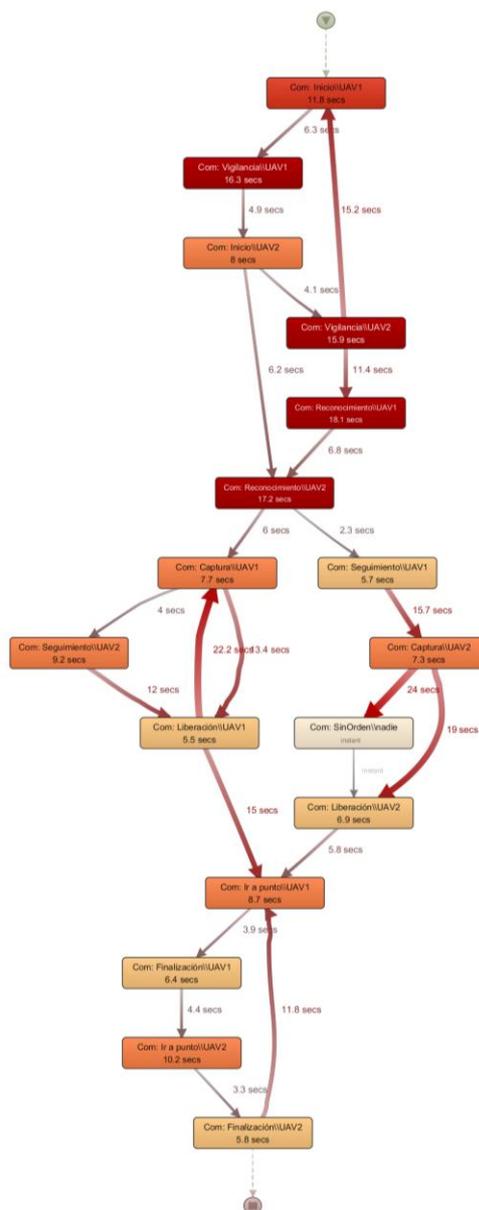


Figura 7: Análisis temporal con operador y UAVs

De esta manera vemos que algunos tiempos son elevados como el caso de la liberación por parte del UAV1. También vemos que en ocasiones hay bucles de captura y liberación, debido a que determinados fuegos necesitan más trabajos de extinción. Sin embargo, esta transición emplea una media de 22 segundos, un tiempo mayor que el resto de transiciones, lo que invita a proponer ciertas mejoras. Una de ellas sería que el operador alterne dos robots para apagar el fuego, si se da la condición de que el compañero no está realizando otras tareas significativas como la de seguimiento.

### 5.2.3 Ejecución de las tareas

En el modelo que se muestra a continuación se representan las actividades realizadas por cada robot en separado. El gráfico nos permite ver el tiempo que han empleado en llevarlas a cabo, así como el tiempo que consumieron en comenzar la tarea siguiente.

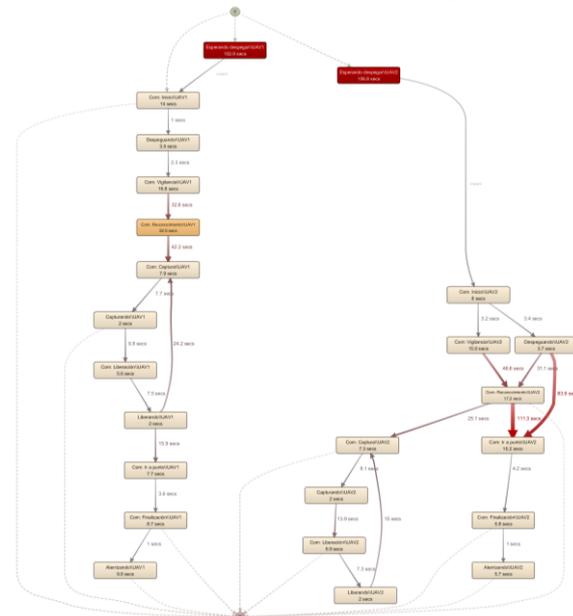


Figura 8: Análisis temporal de tareas

## 6 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha planteado la aplicación de las técnicas de minería de procesos a misiones con múltiples robots dirigidas por un solo operador. La adaptación a la robótica de estas técnicas surgidas para los negocios supone un desafío de investigación. Sin embargo, en muchos casos puede suponer un avance y una mejora a la hora de entender el desarrollo de estas misiones robóticas.

Nuestra aplicación de la minería de procesos sobre una misión de vigilancia y extinción de incendios con múltiples robots dirigida por un operador ha supuesto numerosos resultados interesantes:

- El modelado de las misiones nos permite conocer el desarrollo en tiempo real de las mismas de una manera visual e intuitiva. Esto nos permite comparar los resultados con las previsiones de desarrollo efectuadas a priori.
- Nos facilita la detección de las desviaciones en las misiones sobre el plan de las mismas.
- Nos proporciona las actividades que implican un mayor coste temporal y, en ocasiones, suponen cuellos de botella. Estas actividades disminuyen la eficiencia del proceso y su detección es fundamental para tratar de mejorar el desempeño de la misión.
- Nos permite detectar algunas situaciones de espera que pueden ser compensadas cambiando la asignación de los recursos.
- Nos ayuda a determinar el rol que desempeña cada robot en cada momento de la misión y estudiar su relación con el resto de agentes implicados en la misión.

Estos resultados demuestran la validez de la minería de procesos y justifican su uso en este tipo de misiones. Esto supone una ampliación de los métodos de análisis utilizados hasta ahora en este entorno de aplicación. La información generada puede ser útil para asistir las decisiones del operador y reducir la carga de trabajo del comando.

En futuros trabajos se propone desarrollar la integración de estas técnicas en tiempo real durante el comando de misiones. La detección de posibles caminos más eficientes en relación al modelo puede ayudar a aconsejar al operador en su toma de decisiones.

### Agradecimientos

Este trabajo está enmarcado en el proyecto SAVIER (Situational Awareness Virtual Environment), que está financiado y apoyado por Airbus Defence & Space.

Esta investigación ha recibido fondos del proyecto RoboCity2030-III-CM (Robótica aplicada a la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos. fase III; S2013/MIT-2748), financiado por los Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid y los Fondos Estructurales de la Unión Europea, y del proyecto DPI2014-56985-R (Protección robotizada de infraestructuras críticas), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España.

Los experimentos fueron realizados en las instalaciones del Interdisciplinary Centre for Security, Reliability and Trust (SnT) de la Universidad de Luxemburgo.

### Referencias

- [1] Roldán, J. J., del Cerro, J., Barrientos, A. (2016) "A proposal of methodology for multi-uav mission modeling". *MED 2015: 23rd IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation*, pp. 1-7.
- [2] Mans, R. S., Schonenberg, M. H., Song, M., van der Aalst, W. M. P., Bakker, P. J. M. (2015). "Process Mining in Healthcare". *Case study, Eindhoven University of Technology*.
- [3] Poggi, N., Muthusamy, V., Carrera, D., Khalaf, R. (2013). "Business process mining from e-commerce web logs". *Business Process Management, Springer Berlin Heidelberg*, pp. 65-80.
- [4] Roldán, J. J., del Cerro, J., Barrientos, A. (2015) "Minería de procesos aplicada a la monitorización de las misiones robóticas". *XXXVI Jornadas de Automática, 2-4 septiembre 2015, Bilbao. ISBN 978-84-15914-12-9, Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)*.
- [5] Van Der Aalst, W. (2011) "Process mining: discovery, conformance and enhancement of business processes". *Springer Science & Business Media*.
- [6] Van Dongen, B, Alves De Medeiros, A.K., Wen, L. (2009) "Process mining: Overview and outlook of petri net discovery algorithms". *Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency II, Springer*, pp. 225-242.
- [7] Van der Aalst, W., Adriansyah, A., van Dongen, B. (2012) "Replaying history on process models for conformance checking and performance analysis". *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, v. 2(2), pp. 182-192.
- [8] ProM 6.5.1 es un programa desarrollado por la Universidad de Eindhoven que contiene multitud de herramientas para realizar análisis de minería de procesos. <http://www.processmining.org/prom/start>