Actas de las XXXVI Jornadas de Automática, 2 - 4 de septiembre de 2015. Bilbao
ISBN 978-84-15914-12-9 © 2015 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Minería de procesos aplicada a la monitorización de las misiones robóticas

Juan Jesús Roldán, Jaime del Cerro y Antonio Barrientos
Centro de Automática y Robótica (UPM-CSIC)
C/ José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid
jj.roldan@upm.es, j.cerro@upm.es, antonio.barrientos@upm.es

Resumen

Las misiones robóticas y especialmente las misiones multi-robot generan un considerable volumen de datos. El control y la monitorización de estas misiones requiere el análisis de estos datos para extraer información. Este trabajo estudia la minería de procesos y su posible aplicación en el terreno de las misiones robóticas. Esta disciplina aborda el descubrimiento, diseño, evaluación y optimización de los procesos a partir de la información recogida en registros de eventos. Estas técnicas aplicadas a las misiones robóticas podrían servir para la generación automática de modelos a partir de la experiencia o el análisis y la mejora de las misiones robóticas a partir de los modelos.

Palabras clave: Misión Robótica, Modelado, Control, Monitorización, Minería de Procesos

1. INTRODUCCIÓN

A día de hoy, las misiones robóticas son una realidad y cuentan con multitud de aplicaciones: agricultura, monitorización ambiental, inspección de infraestructuras, vigilancia de seguridad, exploración...

Esta variedad de aplicaciones da lugar a una variedad de misiones. Según la complejidad, las misiones pueden requerir la utilización de uno o varios robots y, en el segundo caso, robots heterogéneos u homogéneos. Según el escenario, estas pueden emplear robots terrestres (Unmanned Ground Vehicle, UGV), marinos (Unmanned Surface Vehicle, USV), submarinos (Unmanned Underwater Vehicle, UUV) o aéreos (Unmanned Aerial Vehicle, UAV).

Un análisis a la literatura sobre misiones robóticas permite extraer las siguientes conclusiones:

- Las misiones robóticas están experimentando un aumento de complejidad, motivado por la necesidad de expansión a nuevos campos de aplicación y apoyado por los avances en la automática y la robótica.
- En particular, el paso de las misiones con un robot a las misiones con múltiples robots supone un salto en su complejidad y plantea una serie de retos relacionados con la automatización o los factores humanos [1].
- Las misiones multi-robot conllevan un incremento de la autonomía de los robots, dejando atrás el control manual y acercándose al control automático con sistemas de gestión por consentimiento o excepción [2].
- Además, las misiones multi-robot suponen un aumento de la carga de trabajo de los operadores, que puede sobrepasar sus capacidades si no se introducen técnicas para mejorar el conocimiento de la situación y apoyar la toma de decisiones [3].
- Las misiones robóticas generan un volumen de datos considerable, aunque dependiente de factores como el número y la complejidad de los robots o las características del escenario [5].

Este trabajo parte de la necesidad de reducir la carga de trabajo del operador de misiones multi-robot y se centra en el tratamiento de los cuantiosos volúmenes de datos para extraer la información valiosa para la misión. Con este fin, esta comunicación aborda el campo de la minería de procesos y estudia su aplicación en diferentes áreas de las misiones robóticas.

La sección 2 describe brevemente la minería de procesos y selecciona algunas fuentes que aportan más información. La sección 3 aborda su posible aplicación en el modelado de misiones, mientras que la sección 4 se ocupa de su posible aplicación en el análisis de las mismas. Por último, la sección 5 resume las conclusiones que se han obtenido tras la realización de este estudio.

2. MINERÍA DE PROCESOS

La minería de procesos [6] es una disciplina que se ocupa del descubrimiento, diseño, evaluación y optimización de los procesos a partir de la información recogida en registros de eventos. Por lo

ISBN 978-84-15914-12-9 © 2015 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

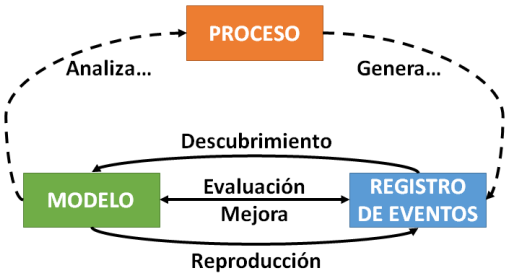

Figura 1: Minería de procesos.

tanto, la minería de procesos se sitúa a medio camino entre el análisis y modelado de procesos y la minería de datos, disciplina que se centra en el análisis de datos para realizar clasificaciones o predicciones.

Esta disciplina surgió por la necesidad de analizar y optimizar los procesos de negocios, pero su aplicación se ha extendido por diversos campos - como las industrias, las infraestructuras o las organizaciones - y en el futuro podría alcanzar el terreno de la robótica.

La minería de procesos ofrece las siguientes posibilidades:

- Descubrimiento de modelos: Generación automática de modelos para los procesos a partir de registros de eventos. Estos modelos suelen describir los procesos como sucesiones de actividades, pero también pueden enfocar los procesos según su coste temporal o su consumo de recursos. Algunos modelos habituales son las redes de Petri, los modelos y notaciones de procesos de negocio, los sistemas de transiciones, los grafos de dependencias, las redes causales... En el terreno de las misiones de robots, estas técnicas permiten la generación de modelos a partir de la experiencia recogida en simulaciones o experimentos de campo.

- Reproducción de modelos: Generación automática de registros de eventos a partir de los modelos de los procesos. Estas técnicas permiten simular los procesos para obtener información interesante sobre la evolución de los mismos. Posteriormente, esta información puede tener diversos usos: estudio de los procesos, diseño de componentes, asignación de recursos o entrenamiento de operarios. Estas técnicas aplicadas a las misiones robóticas permiten la realización de simulaciones en lugar de experimentos, lo que conlleva una reducción del coste temporal y económico de las pruebas.

- Análisis de conformidad y mejora de modelos: Comparación de los modelos de los procesos con los registros de eventos. Estas técnicas son útiles para evaluar la conformidad del modelo con los eventos y corregir sus posibles desviaciones (desde descubrir estados o transiciones que no habían sido considerados en el modelo hasta detectar cuellos de botella y ayudar a optimizar la asignación de los recursos). En el terreno de las misiones de robots, estas técnicas permiten la adecuación de los modelos, habitualmente diseñados por los operadores mediante un análisis previo a la misión, a la experiencia.

Como se ha mencionado, la minería de procesos opera entre los registros de eventos y los modelos de los procesos. En los siguientes apartados se describen con más detalles ambos elementos.

2.1. Registros de eventos

Un registro de eventos es una sucesión ordenada de eventos que tienen lugar durante la ejecución de un proceso. A continuación se muestra la información que suelen contener estos eventos utilizando el ejemplo de una misión de robots.

- Caso: Identificador único del caso en el que se ha producido el evento. En el ejemplo se podría utilizar un código alfanumérico para identificar la misión real o simulada.

- Actividad: Operación que forma parte del proceso y se ha realizado en el evento. En el ejemplo podría ser vigilancia, reconocimiento, seguimiento, carga, descarga, etc.

- Tiempo: Fecha y hora en la que se ha producido el evento. Habitualmente se utiliza el formato AAAA/MM/DD-HH:MM:SS o alguno más simplificado.

- Recurso: Agente que ha participado en la realización del evento. En el ejemplo podría ser un robot terrestre, acuático o aéreo previamente identificado.

- Otros datos: La cantidad de datos que se pueden añadir al evento no está acotada y depende de la aplicación. En el ejemplo se podrían añadir datos sobre los robots (localización, autonomía...) o sobre las tareas (objetivos, duración...).

La tabla 1 muestra un posible registro de eventos para una misión multi-robot. En este ejemplo varios robots terrestres (UGVs) y aéreos (UAVs) colaboran para transportar una mercancía entre

ISBN 978-84-15914-12-9 © 2015 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Cuadro 1: Ejemplo de registro de eventos.

Caso	Actividad	Tiempo	Recurso
Misión 1	Iniciar	9:52	UAV 1
Misión 1	Iniciar	9:57	UGV 1
Misión 1	Buscar	10:01	UAV 1
Misión 1	Iniciar	10:03	UAV 2
Misión 1	Vigilar	10:09	UAV 2
Misión 1	Cargar	10:10	UGV 1
Misión 1	Finalizar	10:13	UAV 1
Misión 1	Transportar	10:14	UGV 1
Misión 1	Seguir	10:14	UAV 2
Misión 1	Descargar	10:34	UGV 1
Misión 1	Finalizar	10:36	UAV 2
Misión 1	Finalizar	10:48	UGV 1
...	...	...	...

dos ubicaciones. Este registro de eventos se podría completar con otros datos de los eventos y con información de otras misiones.

2.2. Modelos de procesos

Un modelo es una representación de un proceso que puede servir para su estudio, comprensión, visualización o reproducción. Trabajar con un modelo en lugar de con el proceso supone una reducción de la complejidad y, además, permite elegir el dominio de aplicación y el nivel de detalle. En la minería de procesos se suelen utilizar los siguientes tipos de modelos [6]:

- Sistema de transiciones: Los sistemas de transiciones están entre los modelos más básicos, constan de estados y transiciones y tienen un estado inicial y otro final.

  Formalmente, un sistema de transiciones es un conjunto $TS = (S, A, T)$, donde S es el conjunto de estados, A es el conjunto de actividades y $T \subseteq SxAxS$ es el conjunto de transiciones.

- Red de Petri: Las redes de Petri son herramientas matemáticas y gráficas para el modelado de sistemas, que consisten en un grafo bipartido y orientado con lugares, transiciones, arcos (que conectan lugares y transiciones) y marcas (que definen el estado y la evolución).

  Formalmente, una red de Petri es un conjunto $N = (P, T, F)$, donde P es un conjunto de lugares, T es un conjunto de transiciones tales que $P \cap T = 0$ y $F \subseteq (PxT) \cup (TxP)$ es un conjunto de arcos dirigidos. Una red de Petri marcada es un par (N, M), donde N es una red de Petri y $M \in B(P)$ es un conjunto sobre P que indica el marcado de la red.

- Modelo y Notación de Procesos de Negocio (Business Process Model and Notation, BPMN): Este lenguaje se utiliza ampliamente para modelar procesos de negocio y consta de eventos (similares a transiciones), actividades (similares a estados) y puertas lógicas y eventos temporales.

- Redes causales: Las redes causales son grafos donde los nodos representan actividades y los arcos representan dependencias causales, de manera que cada actividad tiene un conjunto de posibles entradas y otro conjunto de posibles salidas.

Algunos de estos modelos están centrados en los procesos de negocio (BPMN) o están adaptados a procesos con características similares como la existencia de relaciones de causalidad fijas entre actividades (redes causales). Sin embargo, otros de estos modelos son suficientemente generales y potentes para utilizarse en campos tan distantes como la robótica (redes de Petri) [4].

3. MODELADO DE MISIONES

Hay varias formas de llevar a cabo el modelado de una misión robótica, tal y como se muestra en la figura 2.

En un extremo está el modelado manual a partir de un análisis previo a la misión. Este proceso presenta varias ventajas: aprovecha un análisis que se tiene que realizar para planificar la misión y permite alcanzar una mayor profundidad y conseguir una planificación más completa y más segura. Sin embargo, este proceso tiene también inconvenientes: principalmente, las desviaciones que pueden existir entre la planificación previa y el desarrollo posterior de la misión.

En el otro extremo está el modelado automático a partir de la experiencia de la misión. Este proceso también presenta sus ventajas y sus inconvenientes. Por un lado, si los modelos se generan con información suficiente y significativa de las misiones, la discrepancia entre los modelos y las misiones serán mínimas. Por otro lado, la necesidad de información suficiente y significativa de las misiones para generar los modelos implica una serie de dificultades: realización de las misiones antes de tener modelos, repetición de las misiones para generar esta información...

Un término medio es la combinación entre los modelados manual y automático, partiendo de un modelo obtenido a partir de un análisis de la misión e incorporando la experiencia de la misión. Esta propuesta puede superar las dificultades de am-

ISBN 978-84-15914-12-9 © 2015 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

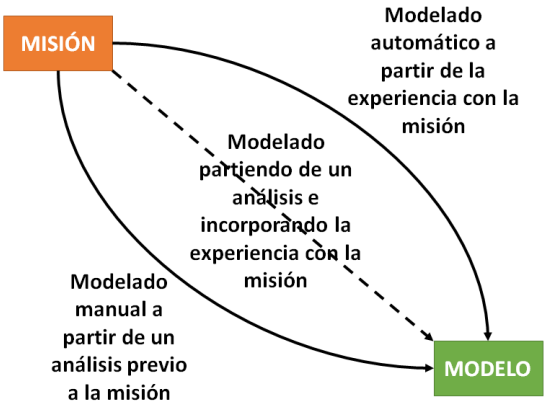

Figura 2: Modelado de misiones.

bos procesos de modelados y dar lugar a modelos representativos de las misiones.

La minería de procesos es una herramienta a tener en cuenta tanto para el modelado automático como para el modelado mixto. Como se mencionó antes, dos de sus aplicaciones son el descubrimiento de modelos y el análisis y la mejora de los mismos.

El descubrimiento de modelos a partir de registros de eventos se puede llevar a cabo mediante alguno de los siguientes algoritmos [8]:

- Algoritmos basados en abstracción: Estos algoritmos construyen el modelo a partir de una abstracción del registro de eventos. Primero escanean este archivo en busca de relaciones de precedencia entre las actividades. A continuación determinan relaciones de causalidad o paralelismo a partir de las relaciones de precedencia. Por último construyen el modelo teniendo en cuenta estas relaciones y un conjunto de reglas. Ejemplo: Alpha-Algorithm.

- Algoritmos basados en heurística: Estos algoritmos extraen los comportamientos principales del registro de eventos considerando la frecuencia de los estados y evitando la influencia del ruido. En un primer paso generan un grafo de dependencias con las dependencias causales entre actividades y sus frecuencias. En un segundo paso definen los puntos de separación y unión de acuerdo con el grafo de dependencias y sus frecuencias. Ejemplo: Heuristic Miner.

- Algoritmos basados en búsqueda: Estos algoritmos realizan una búsqueda en el registro de eventos para inferir las relaciones ordinales entre las actividades. Los algoritmos genéticos permiten la determinación de estas relaciones definiendo una población de posibles modelos y aplicando una evolución según su aptitud. De esta forma, estos algoritmos pueden encontrar relaciones diferentes a la preferencia y manejar las estructuras comunes en los modelos. Ejemplo: Genetic Miner.

Cada uno de estos algoritmos tiene sus fortalezas, sus debilidades y su dominio de aplicación. La calidad de los modelos que proporcionan estos algoritmos depende en gran medida de la naturaleza del proceso.

Algunos modelos se pueden evaluar a simple vista. Los modelos que no consideran todos los estados del proceso o contienen estados que están aislados no son válidos. Tampoco son válidos los modelos en flor, que permiten cualquier transición entre estados y, por tanto, no son útiles para controlar o monitorizar los procesos.

Sin embargo, otros modelos requieren una evaluación de la conformidad con los registros de eventos. Con este fin se utilizan cuatro criterios de calidad del modelo [7]: aptitud (el modelo representa el comportamiento del registro), simplicidad (el modelo es fácil de comprender), precisión (el modelo evita el subentrenamiento), generalización (el modelo evita el sobrentrenamiento). Estos criterios se pueden determinar midiendo la alineación entre los modelos y los registros.

A partir del registro de eventos completo de la misión multi-robot de transporte de mercancías (tabla 1), se ha generado el modelo de estados y transiciones que se muestra en la figura 3. Este modelo ha sido generado con el programa *Fluxicon Disco* y representa un paso intermedio en el modelado de la misión. El color de los estados representa su frecuencia: el más claro es el menos frecuente y el más oscuro es el más frecuente. El grosor de las transiciones también representa su frecuencia, de manera que a mayor grosor hay mayor frecuencia.

Por su parte, se ha utilizado el Alpha-Miner del programa *PROM 6* para descubrir la red de Petri que representa el registro de eventos. Esta red de Petri se encuentra en la figura 4 y representa adecuadamente todos los estados y las transiciones de la misión. En este caso el Alpha-Miner funciona correctamente porque las relaciones de precedencia entre los estados son claras y no existen bucles con dos o más estados. En el caso contrario habría que pasar a algoritmos más robustos ante estas situaciones como el Heuristic-Miner o el Inductive-Miner.

4. ANÁLISIS DE MISIONES

Hasta ahora se han abordado las misiones robóticas desde un punto de vista operacional. A partir

ISBN 978-84-15914-12-9 © 2015 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

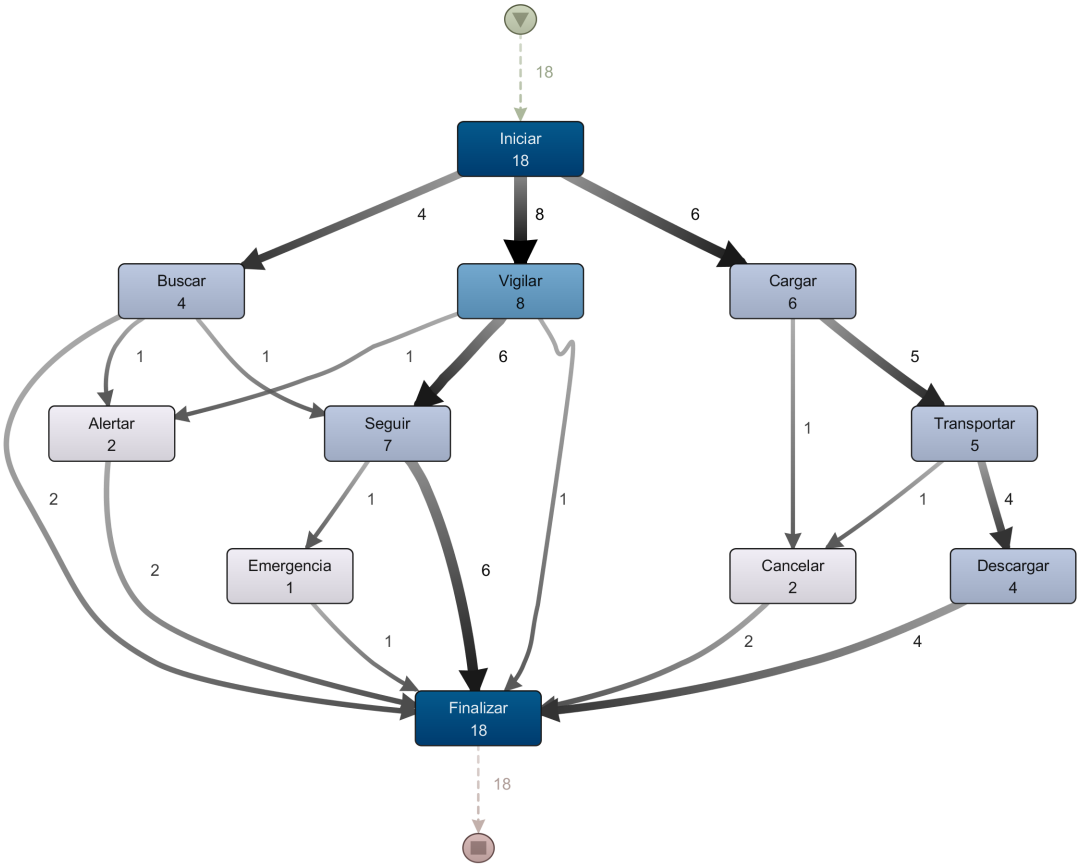

Figura 3: Diagrama de estados del registro de eventos.

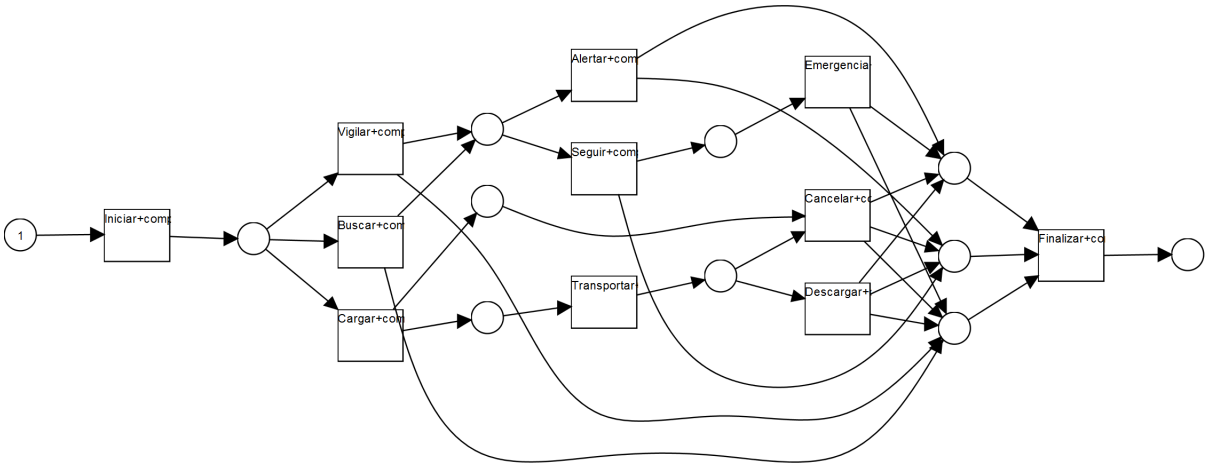

Figura 4: Red de Petri del registro de eventos.

de los registros de eventos se pueden generar modelos para facilitar el control y la monitorización de las misiones. Sin embargo, la minería de procesos integra otras herramientas que pueden ser útiles para analizar las misiones robóticas.

Una misión robótica también puede ser analizada desde otras perspectivas como el tiempo o los recursos. A continuación se analiza la misión multi-robot de transporte de mercancías desde estas perspectivas para mostrar sus posiblidades.

Un análisis temporal de la misión es interesante para determinar y comparar las duraciones de las tareas. En el diagrama de la figura 5 se muestran las duraciones medias de las diferentes transiciones de la misión. Este análisis permite determinar qué tareas son más o menos eficaces y detectar los cuellos de botella de la misión. Gracias a esta información se pueden realizar cambios en las tareas o volver a asignar los recursos de modo que mejore la eficacia de la misión. En la misión de transporte de mercancías, la tarea de transporte es el cuello de botella para el robot terrestre, mientras que el seguimiento de esta operación y la vigilancia de la carga y descarga son las tareas más costosas para los robots aéreos. Además, las tareas de incialización y finalización también consumen un tiempo significativo.

Por su parte, un análisis centrado en los recursos es interesante para evaluar y mejorar la eficiencia de la misión. Este análisis permite conocer qué recursos están sobreutilizados y cuáles están infrautilizados, además de descubrir sinergias entre los recursos. Una construcción bastante común en estos análisis es la red social, que representa a los diferentes recursos y sus relaciones en los diferentes casos o tareas. La figura 6 muestra la red social de la misión con los tres robots (dos UAVs y un UGV) y las colaboraciones entre ellos en los casos. En este caso, la red social muestra que cada robot colabora con todos los demás en los diferentes casos. Sin embargo, en otro caso donde haya más robots o más casos la red social cobra interés y permite mejorar la eficiencia de la misión.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se analiza la aplicación de la minería de procesos en el ámbito de las misiones multi-robot. Esta disciplina puede ampliar la perspectiva desde la que se suelen analizar estas misiones y contribuir a mejoras en la ejecución de la misión, la duración de las tareas o la asignación de los recursos.

Con este fin, se presentan las principales aportaciones de la minería de procesos: el descubrimiento de modelos a partir de registros de eventos de procesos, la reproducción de modelos de procesos para generar registros de eventos y la evaluación de la conformidad entre los modelos y los registros de eventos.

A partir de allí, se sugieren dos caminos para aplicar esta disciplina a las misiones de robots. Por un lado, se propone el modelado automático de las misiones a partir de la experiencia. En primer lugar, se genera un modelo simple con estados y transiciones y, en segundo lugar, se transforma en una red de Petri utilizando herramientas como el Alpha-Algorithm. Por otro lado, se sugiere el estudio de las misiones desde las perspectivas del tiempo y los recursos. Estos análisis permiten la detección y solución de los cuellos de botella y la asignación eficiente de los recursos.

En futuros trabajos se aplicarán estas técnicas a misiones multi-robot más complejas, donde se disponga de un mayor número de robots, un conjunto de objetivos más variado y una serie de tareas más diferenciadas. Estas misiones se realizarán en simulación o experimentos de campo y permitirán sacar todo el partido a las herramientas de la minería de procesos.

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*.

ISBN 978-84-15914-12-9 © 2015 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

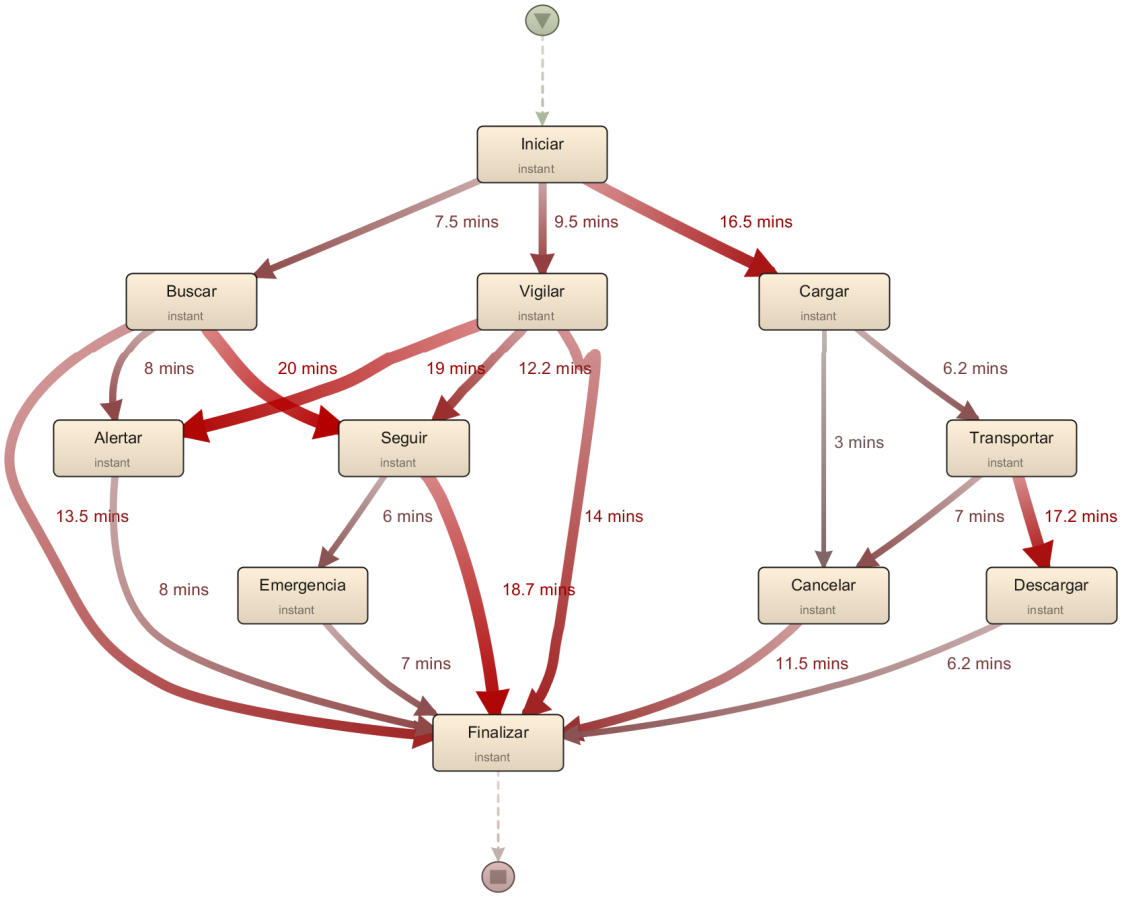

Figura 5: Estudio temporal de la misión.

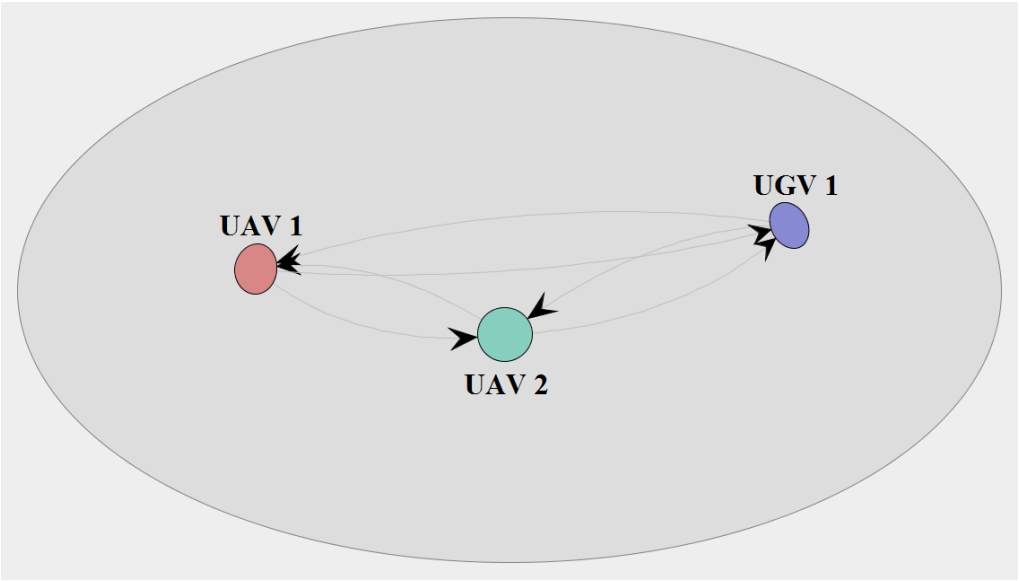

Figura 6: Red social de la misión.

ISBN 978-84-15914-12-9 © 2015 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC)

Referencias

[1] Leo van Breda. Supervisory control of multiple uninhabited systems-methodologies and enabling human-robot interface technologies (commande et surveillance de multiples systemes sans pilote-methodologies et technologies habilitantes dínterfaces homme-machine). Technical report, DTIC Document, 2012.

[2] Mary L Cummings, Sylvain Bruni, S Mercier, and PJ Mitchell. Automation architecture for single operator, multiple uav command and control. Technical report, DTIC Document, 2007.

[3] Mary L Cummings and Paul J Mitchell. Predicting controller capacity in supervisory control of multiple uavs. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 38(2):451–460, 2008.

[4] Joaquín López, Diego Pérez, Roberto Pinillos, Salvador Dominguez, Eduardo Zalama, and Jaime Gómez-García-Bermejo. Diseño y desarrollo de un sistema de transporte reconfigurable para entornos hospitalarios. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 9(1):57–68, 2012.

[5] Juan Jesús Roldán, Jaime del Cerro, and Antonio Barrientos. A proposal of methodology for multi-uav mission modeling. In *MED 2015: 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation*. IEEE, 2015.

[6] Wil Van Der Aalst. *Process mining: discovery, conformance and enhancement of business processes*. Springer Science & Business Media, 2011.

[7] Wil Van der Aalst, Arya Adriansyah, and Boudewijn van Dongen. Replaying history on process models for conformance checking and performance analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 2(2):182–192, 2012.

[8] Boudewijn F van Dongen, AK Alves De Medeiros, and Lijie Wen. Process mining: Overview and outlook of petri net discovery algorithms. In *Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency II*, pages 225–242. Springer, 2009.