

---

# *AIDA*<sub>Industry</sub>: CONTRIBUCIONES EN INDUSTRIA 4.0 Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

---

**David Camacho**

Departamento de Sistemas Informáticos  
Universidad Politécnica de Madrid  
Calle de Alan Turing, s/n, 28031 Madrid, Spain

[David.Camacho@upm.es](mailto:David.Camacho@upm.es)

<http://aida.etsisi.upm.es/>

[https://www.researchgate.net/profile/David\\_Camacho](https://www.researchgate.net/profile/David_Camacho)

<https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=fpf6EDAAAAAJ#>

8 de julio de 2020

## **RESUMEN**

Este informe resume las principales contribuciones realizadas por el grupo de investigación de *Inteligencia artificial aplicada y análisis de datos* (AIDA) en el área de lo **Inteligencia Artificial** aplicada a la **Industria 4.0** y la **transferencia de tecnología**. Se describen el conjunto de publicaciones, así como sus principales contribuciones al estado del arte. En concreto, se presentan las contribuciones relativas a las misiones de sistemas aéreos no tripulados (UAS por sus siglas en inglés), la sostenibilidad del tráfico espacial, y el análisis de sistemas IoT. En este resumen se presentan los principales trabajos publicados en las áreas mencionadas, realizándose además una breve descripción de algunas publicaciones seleccionadas por su relevancia.

**Palabras clave:** Multi-Objective Optimization · Constraint Programming · Multiple Criteria Decision Making · Time Series · Hidden Markov Models

**Principales publicaciones:**

- Cristian Ramirez-Atencia, Gema Bello-Orgaz, María D. R-Moreno, David Camacho. "*Solving complex multi-UAV mission planning problems using multi-objective genetic algorithms.*" **Soft Computing**. Vol.21(17): 4883-4900, 2017.
- Cristian Ramirez-Atencia, Javier Del Ser, David Camacho. "*Weighted strategies to guide a multi-objective evolutionary algorithm for multi-UAV mission planning.*" **Swarm and evolutionary computation**. Vol.44: 480-495, 2019.
- Victor Rodriguez-Fernandez, Antonio Gonzalez-Pardo, and David Camacho, "*Modelling Behaviour in UAV Operations Using Higher Order Double Chain Markov Models.*" **IEEE Computational Intelligence Magazine**, vol. 12, no. 4, pp. 28–37, Nov. 2017, doi: 10.1109/MCI.2017.2742738.
- Víctor Rodríguez-Fernández, Antonio Gonzalez-Pardo, David Camacho. "*Automatic procedure following evaluation using Petri net-based workflows.*" **IEEE Transactions on Industrial Informatics**. Vol.14(6): 2748-2759, 2017.
- Massimiliano Vasile, Victor Rodríguez-Fernández, Romain Serra, David Camacho, and Annalisa Riccardi, "*Artificial intelligence in support to space traffic management.*" in **Proceedings of the International Astronautical Congress**, IAC, Adelaide, Australia, 2018, vol. 1, pp. 3843–3856.
- Victor Rodriguez-Fernandez, Agnieszka Trzcionkowska, Antonio Gonzalez-Pardo, Edyta Brzychczy, Grzegorz J Nalepa, David Camacho. "*Conformance Checking for Time Series-aware Processes.*" **IEEE Transactions on Industrial Informatics**. Published 28 February 2020. DOI: 10.1109/TII.2020.2977126.

## 1. Introducción

A continuación, se describe el conjunto más significativo y relevante de publicaciones realizado por el grupo de investigación Applied Intelligence & Data Analysis Group (AIDA<sup>1</sup>), adscrito al Departamento de Sistemas Informáticos de la Universidad Politécnica de Madrid en el área de aplicación al sector industrial y la transferencia de tecnología.

### 1.1. El grupo de investigación

El grupo de investigación tiene su origen en la Universidad Autónoma de Madrid, donde fue creado en 2011 por el Dr. David Camacho. Posteriormente, en septiembre de 2019, el grupo se incorporaría de manera gradual al Departamento de Sistemas Informáticos de la Universidad Politécnica de Madrid, donde actualmente se encuentra desarrollando sus actividades de investigación y desarrollo de proyectos.

El Grupo AIDA está actualmente formado por un total de quince miembros, nueve doctores (tres externos a la Universidad Politécnica de Madrid), cinco estudiantes de doctorado, y un técnico de investigación. El equipo de investigación es un grupo multidisciplinar formado principalmente por Doctores e Ingenieros en Informática (10), Matemáticos (3), Físicos (1), y que cuenta con Psicólogos especializados en Criminología, Pedagogos, y Bioinformáticos, que participan en el desarrollo de diversas líneas de investigación multidisciplinares.

### 1.2. Las líneas de investigación

Las actuales líneas de investigación en AIDA<sub>industry</sub>, pueden dividirse en dos grandes perspectivas: la fundamental, referente a técnicas en el área de las ciencias de la computación, y la de carácter de aplicación a un dominio:

#### **CAMPOS DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN INVESTIGACIÓN:**

- *Aprendizaje Automático para series temporales*: aprendizaje no supervisado en series temporales (Clustering y Modelos Ocultos de Markov), predicción de series temporales con Deep Learning.
- *Computación Evolutiva*: enfocado en Algoritmos Evolutivos (mono y multi-objetivos) y Programación Genética.

<sup>1</sup><http://aida.etsisi.upm.es>

- *Sistemas de Soporte a la Decisión*: orientado al diseño de sistemas de información (man-in-the-loop) para la toma de decisiones complejas en dominios de alta complejidad.
- *Programación con Restricciones*: aplicado al diseño de algoritmos de CSP para planificación y asignación de recursos, combinando estas técnicas con métodos derivados de la Computación Evolutiva y la Inteligencia de Enjambre.
- *Minería de procesos*: extensión de algoritmos de minería de procesos para su funcionamiento con series temporales.

## DOMINIOS DE APLICACIÓN

- Sistemas de vehículos aéreos no tripulados.
- Sistemas IoT, Industria 4.0. En concreto, se aplican las técnicas previamente mencionadas a dominios como la minería de carbón, la fabricación de acero, más.
- Sostenibilidad del tráfico espacial.

## 2. Industria 4.0, Aeronáutica y Aeroespacio

Las contribuciones relacionadas con Industria se refieren principalmente al desarrollo de proyectos de investigación competitivos o de transferencia a empresa privada, donde la aplicación de técnicas de Inteligencia Artificial y la Ciencia de Datos constituyen el eje fundamental de la contribución de AIDA. En concreto, el grupo ha desarrollado actividad relevante en tres grandes áreas relacionadas con la Industria y la transferencia al sector privado:

1. **Sector Industria 4.0.** La aparición de nuevas tecnologías disruptivas como el 5G, los sistemas ciberfísicos y la computación embarcada, entre otras tecnologías, está originando una profunda transformación de los modelos y procesos de producción industriales. El concepto de la Industria 4.0 o las fábricas inteligentes, capaces de una mayor adaptabilidad a las necesidades y a los procesos de producción, así como a una asignación más eficiente de los recursos, ha originado un nuevo boom en la aplicación de técnicas de Inteligencia Artificial y Ciencia de Datos en este dominio. AIDA ha aplicado recientemente sus resultados en el área del aprendizaje automático, la minería de procesos y análisis de series temporales, en diversos casos de uso. Por un lado, se emplean técnicas de IA para la detección de posibles problemas en el funcionamiento de las máquinas extractoras del carbón. Por otro lado, se emplean técnicas de IA para predecir la calidad en los procesos de fabricación de láminas de acero [20, 26].
2. **Sector Aeroespacial.** En colaboración con un amplio consorcio de entidades públicas y privadas (entre las que cabe destacar la Agencia Espacial Europea, la Agencia Espacial Francesa o la Agencia Espacial Alemana), y bajo la coordinación de la Universidad de Strathclyde (UK), el grupo participa en la red H2020-MSCA-ITN donde su principal contribución está centrada en el desarrollo de técnicas de aprendizaje automático y su aplicación en la resolución de problemas relacionados con la sostenibilidad del tráfico espacial. En concreto, se desarrollan técnicas para ayudar a la toma de decisiones en la planificación de operaciones espaciales, o el cálculo de la probabilidad de impactos y colisiones de satélites con basura espacial [?, ?].
3. **Sector Aeronáutico.** En estrecha colaboración con Airbus Defence & Space, y durante más de cinco años, se trabajó en el desarrollo de dos grandes líneas de trabajo relacionada con los sistemas aéreos no tripulados (UASs) [18]:
  - Sistemas de soporte a la decisión para operadores de estaciones de control de tierra. Este tipo de sistemas estaba relacionado principalmente con tres grandes áreas de investigación, la planificación automática (automated planning), la programación basada en restricciones (constraint satisfaction problems) y la computación evolutiva (evolutionary computation). En este área de aplicación se desarrollaron algoritmos inteligentes que permitían la definición de modelos temporales, basados en restricciones (recursos, combustible, aeronaves, riesgo, tiempos de vuelo, etc.) [3, 2, 6, 12], y que generaban un conjunto de soluciones factibles (basadas en la integración de estrategias evolutivas y motores de resolución de restricciones) en tiempos limitados [4, 1, 5, 7, 16, 10, 9, 13, 14, 15]. Estas soluciones eran mostradas a través de un sistema de soporte a la decisión a los operadores de las estaciones de control de tierra (GCS) para la selección de la misión [11, 17]. También se diseñaron algoritmos de replanificación que permitían la inclusión (o la eliminación) de nuevas tareas, eventos, aparición de riesgos, etc. [8].
  - Sistemas de entrenamiento para operadores de GCS. En este caso se emplearon diferentes técnicas de machine learning (como el clustering para la identificación de perfiles), técnicas basadas en modelos ocultos de Markov (hidden Markov models) en combinación con redes de Petri, para la modelización del



Figura 1: Arquitectura del sistema de soporte a la decisión y planificación de misiones desarrollado en uno de los artículos de investigación de esta tesis [11], representando los distintos componentes para la resolución y toma de decisiones, así como la visualización y simulación de los planes resultantes.

proceso de entrenamiento de operadores de vehículos aéreos no tripulados. Como principales contribuciones se implementaron diversos algoritmos inteligentes que permitían la detección de patrones como la el rendimiento, o los perfiles, de estos operadores durante los procesos de entrenamiento. Se desarrollaron temporales que permitían representar las diferentes acciones que debían ser realizadas y que posteriormente eran utilizados para evaluar la progresión de estos operadores durante la ejecución de un procedimiento operativo concreto (por ejemplo en situaciones de emergencia vs normales) [25, 22, 24, 23, 21, 20].

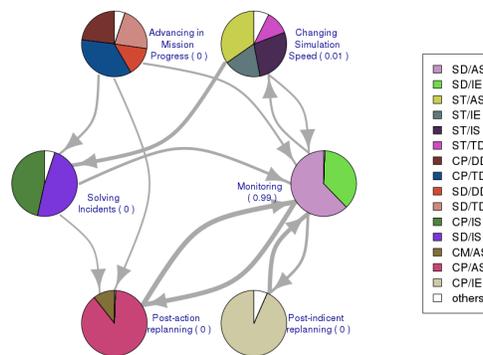


Figura 2: Modelo oculto de Markov obtenido tras la experimentación realizada en uno de los artículos de investigación de esta tesis [19], representando la evolución del comportamiento de un operador en un sistema aéreo no tripulado.

### 3. Principales publicaciones

Del anterior conjunto de publicaciones se describirán brevemente un subconjunto de las mismas debido al impacto obtenido, y a la relevancia de la investigación en el área de la industria:

- Cristian Ramirez-Atencia, Gema Bello-Orgaz, María D. R-Moreno, David Camacho. "Solving complex multi-UAV mission planning problems using multi-objective genetic algorithms." **Soft Computing**. Vol.21(17): 4883-4900, 2017. [9]
  - En este trabajo, se realiza una primera aproximación para resolver el problema de planificación de misiones para múltiples vehículos aéreos no tripulados (UAVs). Dicho problema se modeló como un problema de satisfacción de restricciones (CSP) y se obtuvo una aproximación del frente óptimo de Pareto (POF) usando el algoritmo NSGA-II y un modelo CSP implementado en Gecode para evitar soluciones inviables que no satisfacen las restricciones del problema.
- Cristian Ramirez-Atencia, Javier Del Ser, David Camacho. "Weighted strategies to guide a multi-objective evolutionary algorithm for multi-UAV mission planning." **Swarm and evolutionary computation**. Vol.44: 480-495, 2019. [13]

- En este artículo se extendió el trabajo anterior mediante la modificación del algoritmo NSGA-II. Considerando misiones más complejas, los tiempos de ejecución y convergencia de NSGA-II resultaban demasiado altos, y por ello se aplicaron estrategias heurísticas basadas en las características del terreno de la misión para la modificación de los operadores de inicialización y mutación de NSGA-II que aceleraran la búsqueda de soluciones óptimas.
- Victor Rodriguez-Fernandez, Antonio Gonzalez-Pardo, and David Camacho, “*Modelling Behaviour in UAV Operations Using Higher Order Double Chain Markov Models*,” **IEEE Computational Intelligence Magazine**, vol. 12, no. 4, pp. 28–37, Nov. 2017, doi: 10.1109/MCI.2017.2742738. [21]
  - En este trabajo, se amplía el estudio del modelado de comportamiento en las operaciones en UASs mediante el uso de modelos de doble cadena de Markov (DCMM), que proporcionan un marco de modelado flexible en el que se combinan dos cadenas de Markov de orden superior (una oculta y otra visible).
- Víctor Rodríguez-Fernández, Antonio Gonzalez-Pardo, David Camacho. "Automatic procedure following evaluation using Petri net-based workflows." **IEEE Transactions on Industrial Informatics**. Vol.14(6): 2748-2759, 2017. [20]
  - En este artículo, los procedimientos operativos se modelan como flujos de trabajo basados en redes de Petri. Éstos interactúan con el registro de datos del sistema para permitir una evaluación automática del progreso y el tiempo dedicado a seguir el procedimiento operativo. Para ilustrar las contribuciones de este artículo, se realiza un caso de estudio diseñando y modelando un procedimiento operativa de emergencia para un UAS, y se evalúa el enfoque propuesto con una conjunto de datos sintético.
- Massimiliano Vasile, Victor Rodríguez-Fernández, Romain Serra, David Camacho, and Annalisa Riccardi, “*Artificial intelligence in support to space traffic management*,” in **Proceedings of the International Astronautical Congress**, IAC, Adelaide, Australia, 2018, vol. 1, pp. 3843–3856. [27]
  - Este artículo presenta un sistema de soporte a la decisión basado en Inteligencia Artificial para ayudar a los operadores de satélites a planificar e implementar maniobras para evitar colisiones. Cuando se espera una nueva colisión, el sistema proporciona al operador una maniobra óptima y un análisis de los posibles resultados.
- Victor Rodriguez-Fernandez, Agnieszka Trzcionkowska, Antonio Gonzalez-Pardo, Edyta Brzychczy, Grzegorz J Nalepa, David Camacho. "Conformance Checking for Time Series-aware Processes." **IEEE Transactions on Industrial Informatics**. Published 28 February 2020. DOI: 10.1109/TII.2020.2977126. [26]
  - Este artículo aborda el problema de verificar la conformidad entre un modelo de proceso y los datos producidos por su ejecución en situaciones en que los datos no se proporcionan como un registro de eventos, sino como un conjunto de series temporales que contienen la evolución de las variables involucradas en el proceso. Esto provoca un cambio de paradigma en la verificación de conformidad (y la minería de procesos en un nivel más general), y debido a esto, la formalización de los datos, el modelo de proceso y los algoritmos se rediseñan y adaptan de cara a esta nueva perspectiva. Para ilustrar la efectividad del enfoque propuesto, se lleva a cabo una evaluación experimental en un registro de series temporales real, más concretamente, en un registro de un sistema de minería de carbón de tajo largo.

#### 4. Proyectos de investigación

El grupo desarrolla, o ha desarrollado recientemente, diferentes proyectos de investigación competitivos tanto nacionales como internacionales en este área. En concreto se mencionarán los siguientes proyectos:

- "Stardust Reloaded (Stardust-R)". Unión Europea (813644-H2020-MSCA-ITN-2018).2019-2022.
- "Process-aware Analytics Support based on Conceptual Models for Event Logs (PACMEL)". Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (PCI2019-103623). 2019-2021.
- "SAVIER – Situational Awareness Virtual Environment. Communication and Interaction with UAS Open Innovation Project". Airbus Defence & Space. 2013-2017.
- "Nuevos Modelos de Cómputo Bioinspirado para Entornos Masivamente Complejos (DeepBio)". Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (Excelencia). TIN2017-85727-C4-3-P. 2018-2021.
- "Bioinspired Algorithms in Complex Ephemeral Environments (EphemeCH)". Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (Excelencia). TIN2014-56494-C4-4-P. 2015-2018.

## Biografía

David Camacho es Profesor Titular en el Departamento de Sistemas Informáticos de la Universidad Politécnica de Madrid (España) y dirige el Grupo de Inteligencia Aplicada y Análisis de Datos (AIDA). Recibió su doctorado en Ingeniería Informática por la Universidad Carlos III de Madrid en 2001. Sus intereses de investigación incluyen la inteligencia artificial, el aprendizaje automático, la minería de datos, la computación evolutiva, el análisis de redes sociales, la inteligencia de enjambre, entre otros. Ha publicado más de 300 artículos de investigación (revistas, conferencias, capítulos de libro, etc.), participado en más de 40 proyectos de investigación competitivos (tanto de carácter nacional como internacional), ha impartido más de 50 charlas invitadas y editado decenas de números especiales en revistas y actas de congresos. Actualmente forma parte del consejo editorial de diversas revistas internacionales, entre las que se mencionarán: [Information Fusion](#), [Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing](#), [International Journal of Bio-Inspired Computation](#), [Expert systems](#), o [Evolutionary Intelligence](#), entre otras.

## Referencias

- [1] Gema Bello-Orgaz, Cristian Ramirez-Atencia, Jaime Fradera-Gil, and David Camacho. Gampp: Genetic algorithm for uav mission planning problems. In *Intelligent Distributed Computing IX*, pages 167–176. Springer, Cham, 2016.
- [2] Cristian Ramirez-Atencia, Gema Bello-Orgaz, Maria D R-Moreno, and David Camacho. Branching to find feasible solutions in unmanned air vehicle mission planning. In *International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning*, pages 286–294. Springer, Cham, 2014.
- [3] Cristian Ramirez-Atencia, Gema Bello-Orgaz, Maria D R-Moreno, and David Camacho. A simple csp-based model for unmanned air vehicle mission planning. In *2014 IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA) Proceedings*, pages 146–153. IEEE, 2014.
- [4] Cristian Ramirez-Atencia, Gema Bello-Orgaz, Maria D R-Moreno, and David Camacho. Solving uav mission planning based on temporal constraint satisfaction problem using genetic algorithms. In *proceedings of the 20th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, pages 65–71, 2014.
- [5] Cristian Ramirez-Atencia, Gema Bello-Orgaz, Maria D R-Moreno, and David Camacho. A hybrid moga-csp for multi-uav mission planning. In *Proceedings of the Companion Publication of the 2015 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, pages 1205–1208, 2015.
- [6] Cristian Ramirez-Atencia, Gema Bello-Orgaz, Maria D R-Moreno, and David Camacho. Performance evaluation of multi-uav cooperative mission planning models. In *Computational Collective Intelligence*, pages 203–212. Springer, Cham, 2015.
- [7] Cristian Ramirez-Atencia, Gema Bello-Orgaz, Maria D. R-Moreno, and David Camacho. A Weighted Penalty Fitness for a Hybrid MOGA-CSP to solve Mission Planning Problems. In *XI Congreso Español de Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados (MAEB 2016)*, pages 305–314, 2016.
- [8] Cristian Ramirez-Atencia, Gema Bello-Orgaz, Maria D R-Moreno, and David Camacho. Mogamr: A multi-objective genetic algorithm for real-time mission replanning. In *2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, pages 1–8. IEEE, 2016.
- [9] Cristian Ramirez-Atencia, Gema Bello-Orgaz, María D R-Moreno, and David Camacho. Solving complex multi-uav mission planning problems using multi-objective genetic algorithms. *Soft Computing*, 21(17):4883–4900, 2017.
- [10] Cristian Ramírez Atencia and David Camacho. Planificación automática de misiones para drones mediante computación evolutiva. In *V Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad (DESEi+d 2017)*, pages 1–8. <https://www.researchgate.net/publication> , 2017.
- [11] Cristian Ramirez-Atencia and David Camacho. Extending qgroundcontrol for automated mission planning of uavs. *Sensors*, 18(7):2339, 2018.
- [12] Cristian Ramirez-Atencia and David Camacho. Constrained multi-objective optimization for multi-uav planning. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(6):2467–2484, 2019.
- [13] Cristian Ramirez-Atencia, Javier Del Ser, and David Camacho. Weighted strategies to guide a multi-objective evolutionary algorithm for multi-uav mission planning. *Swarm and evolutionary computation*, 44:480–495, 2019.
- [14] Cristian Ramirez-Atencia, Sanaz Mostaghim, and David Camacho. A knee point based evolutionary multi-objective optimization for mission planning problems. In *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pages 1216–1223, 2017.

- [15] Cristian Ramirez-Atencia, Sanaz Mostaghim, and David Camacho. skpns-ga-ii: Knee point based moea with self-adaptive angle for mission planning problems. *arXiv preprint arXiv:2002.08867*, 2020.
- [16] Cristian Ramirez-Atencia, Maria D R-Moreno, and David Camacho. Handling swarm of uavs based on evolutionary multi-objective optimization. *Progress in Artificial Intelligence*, 6(3):263–274, 2017.
- [17] Cristian Ramirez-Atencia, Víctor Rodríguez-Fernández, and David Camacho. A multi-criteria decision support system for multi-UAV mission planning. In *Data Science and Knowledge Engineering for Sensing Decision Support*, pages 1083–1090. World Scientific Proceedings Series on Computer Engineering and Information Science, 2018.
- [18] Cristian Ramirez-Atencia, Víctor Rodríguez-Fernández, Antonio Gonzalez-Pardo, and David Camacho. New artificial intelligence approaches for future uav ground control stations. In *2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, pages 2775–2782. IEEE, 2017.
- [19] Víctor Rodríguez-Fernández, Antonio Gonzalez-Pardo, and David Camacho. Finding behavioral patterns of uav operators using multichannel hidden markov models. In *2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, pages 1–8. IEEE, 2016.
- [20] Víctor Rodríguez-Fernández, Antonio Gonzalez-Pardo, and David Camacho. Automatic procedure following evaluation using petri net-based workflows. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(6):2748–2759, 2017.
- [21] Víctor Rodríguez-Fernández, Antonio Gonzalez-Pardo, and David Camacho. Modelling behaviour in uav operations using higher order double chain markov models. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 12(4):28–37, 2017.
- [22] Víctor Rodríguez-Fernández, Héctor D Menéndez, and David Camacho. Design and development of a lightweight multi-uav simulator. In *2015 IEEE 2nd International Conference on Cybernetics (CYBCONF)*, pages 255–260. IEEE, 2015.
- [23] Víctor Rodríguez-Fernández, Héctor D Menéndez, and David Camacho. Analysing temporal performance profiles of uav operators using time series clustering. *Expert Systems with Applications*, 70:103–118, 2017.
- [24] Víctor Rodríguez-Fernández, Héctor D Menéndez, and David Camacho. A study on performance metrics and clustering methods for analyzing behavior in uav operations. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 32(2):1307–1319, 2017.
- [25] Víctor Rodríguez-Fernández, Cristian Ramirez-Atencia, and David Camacho. A multi-uav mission planning videogame-based framework for player analysis. In *2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, pages 1490–1497. IEEE, 2015.
- [26] Víctor Rodríguez-Fernández, Agnieszka Trzcionkowska, Antonio Gonzalez-Pardo, Edyta Brzychczy, Grzegorz J Nalepa, and David Camacho. Conformance checking for time series-aware processes. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020.
- [27] Massimiliano Vasile, Víctor Rodríguez-Fernández, Romain Serra, David Camacho, and Annalisa Riccardi. Artificial intelligence in support to space traffic management. 2018.