
PROYECTO INVESTIGADOR

JAVIER CÁMARA MORENO



PRUEBA DE ACCESO AL CUERPO DE CATEDRÁTICO DE UNIVERSIDAD
DEL ÁREA DE LENGUAJES Y SISTEMAS INFORMÁTICOS

Málaga, 17 de diciembre de 2025

Preámbulo

Por resolución de 20 de octubre de 2025, BOE núm. 258 de 27 de octubre de 2025, la Universidad de Málaga convocó a concurso de acceso, entre otras, la plaza de Catedrático/a de Universidad cuyos detalles se muestran a continuación. El presente documento se ha elaborado para cumplir parcialmente con las instrucciones establecidas en dicha convocatoria en relación con la documentación a entregar en el acto de presentación del concurso, a saber:

“Proyecto investigador que pretenda desarrollar el candidato o candidata conforme a la actividad investigadora que conste en la convocatoria de la plaza.”

Cuerpo	Catedrático/a de Universidad
Número de plaza	024CUN25
Área de conocimiento	Lenguajes y Sistemas Informáticos
Departamento	Lenguajes y Ciencias de la Computación
Perfil docente	Docencia en Introducción a la Ingeniería del Software, asignatura adscrita al Área de Conocimiento
Perfil investigador	Investigación en <i>software system structures</i> y <i>software verification and validation</i> .

ÍNDICE

PARTE I. CONTEXTO	7
1. Experiencia en el perfil investigador de la plaza.....	7
2. Experiencia en proyectos, propuestas de investigación y liderazgo.....	8
2.1 Participación en proyectos de investigación.....	8
2.2 Participación en propuestas de investigación	9
2.3 Liderazgo	10
3 Modelos de financiación.....	12
4 Proyecto investigador propuesto	14
PARTE II. PROYECTO INVESTIGADOR.....	17
1. Contexto y justificación de la propuesta	17
2. Objetivos, metodología, y plan de trabajo	24
3. Impacto esperado de los resultados	37
4. Justificación del presupuesto solicitado	39

1. Experiencia en el perfil investigador de la plaza

El perfil investigador de la plaza se centra en la investigación en *software system structures* y en *software verification and validation*. Ambos términos se han extraído de la *ACM Computing Classification System*¹ propuesta en 2012.

El primer término, *Software system structures*, se encuentra anidado en la categoría *Software and its engineering* -> *Software organization and properties* -> *Software system structures*. Este término, por tanto, se encuentra directamente relacionado con el diseño y la organización de sistemas software en distintos ámbitos. En el siguiente nivel de anidamiento, bajo *Software system structures*, encontramos términos tales como *Software architectures*, *Software system models* y *Abstraction, modeling and modularity*. Todos estos términos tienen relación con la experiencia investigadora del candidato y con el proyecto de investigación que se presenta en este documento.

Respecto al segundo término del perfil investigador, *Software verification and validation*, éste se encuentra anidado en la categoría *Software and its engineering* -> *Software creation and management* -> *Software verification and validation*. En el siguiente nivel de anidamiento, bajo *Software verification and validation*, encontramos el término *Formal software verification*. Por tanto, el término *Software verification and validation* está directamente relacionado con el uso de técnicas de verificación que son de utilidad para obtener garantías formales sobre la *corrección* del software.

El solicitante tiene una amplia experiencia investigadora tanto en el desarrollo de técnicas de modelado, análisis y síntesis de *arquitecturas software*, así como en la aplicación de *métodos formales* para verificar la corrección de sistemas software. Concretamente, una gran parte de su investigación durante los últimos años se ha centrado en el desarrollo y utilización de técnicas formales de verificación focalizada en los llamados *quantitative aspects of correctness* [He10,CG+12], que abarcan el análisis de propiedades funcionales y no funcionales en *software-intensive systems* tales como sistemas autónomos y adaptativos (*self-adaptive*), sistemas IT complejos, y sistemas ciberfísicos, entre otros.

En cuanto a las publicaciones que respaldan su actividad investigadora, caben destacar los artículos de revista [CL+13, CL+16, CL+16b, CM+16, CP+16, CL+17, MCG+18, CS+18, CGS19, WC+23, CW+23, CW+24, STC24, Cám25], en los que el solicitante ha trabajado

¹ <https://www.acm.org/publications/class-2012>

fundamentalmente en dos líneas de investigación. Por un lado, la de la provisión de garantías formales en *self-adaptive systems*, en la que se ha utilizado fundamentalmente técnicas de análisis basadas en *probabilistic model checking* [KNP07] para dar garantías cuantitativas formales bajo incertidumbre [CL+13, CP+16, CL+16n, CM+16, CS+18, MCG+18, CL+17, WC+23, STC24], combinándolas en algunos casos con técnicas de *testing* [CL+13, CL+17] y de “explicabilidad” (*explainability*) [WC+23]. Además de las anteriores publicaciones en revista, esta línea de investigación ha sido avalada por un *ACM SigSoft Distinguished Paper Award* en la conferencia *Quality of Software Architectures* (QoSA) de 2014 [CC+14], paper que originó la publicación en revista [CL+17]. Por otro lado, otra línea ha explorado el uso combinado de *lightweight formal methods* como *Alloy* [J02] con *probabilistic model checking* para la síntesis de espacios de diseño arquitectónico con garantías estructurales, de comportamiento y cuantitativas [CGS19], que se generalizó más tarde en una herramienta que permite tratar con otros tipos de modelos estructurales no arquitectónicos [Cám20]. Esta última línea de investigación fue respaldada con el *Best Paper Award* en la *European Conference on Software Architecture* de 2017 [CGS17], artículo que dio lugar a las publicaciones de revista [CGS19, Cám25]. Además, esta línea de investigación ha sido extendida en los años recientes con técnicas de explicabilidad, dando lugar a las primeras publicaciones en las que se sistematiza la explicación de espacios de diseño de arquitecturas software en términos cuantitativos, dando origen a las publicaciones de revista [CW+23, CW+24].

2. Experiencia en proyectos, propuestas de investigación y liderazgo

2.1 . Participación en proyectos de investigación

Como aparece reflejado en su CV, el candidato ha participado en 11 proyectos internacionales (3 Reino Unido, 6 en Estados Unidos, 1 Portugal, 1 Francia), seis nacionales del Plan Nacional de I+D+i, y uno regional (Junta de Andalucía). En el ámbito internacional, el candidato ha participado como investigador en seis proyectos estadounidenses financiados por la *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA), la *National Security Agency* (NSA), la *Office of Naval Research* de la *US Navy* (ONR), el *US Department of Defense* (DoD), y la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). En Portugal y Francia, los proyectos en los que participó el candidato fueron financiados por la *Fundação para a Ciência e a Tecnologia* (FCT) y la *Agence Nationale de la Recherche* (ANR), respectivamente. En el Reino Unido, el candidato ha participado en proyectos financiados por el *Defence Science and Technology Laboratory* (Dstl) del *Ministry of Defence* (MoD), la *UK Atomic Energy Authority* (UKAEA), y el *Assuring Autonomy International Programme* (AAIP).

Entre todos estos proyectos, cabe destacar la participación del candidato a nivel nacional, como IP principal del proyecto *SoCUS: Social Computing for Urban Sustainability* (proyectos TED de transición ecológica y digital convocados en 2021). A nivel internacional, cabe destacar su participación como Co-IP en los proyectos *Assured Mission-Critical Applications for Teams of Unmanned Vehicles* (AMCA, financiado por Dstl), *Robotic Assistive Care* (ALMI, financiado por AAIP), y *Multi-Robot Systems for the Inspection and Maintenance of Nuclear Fusion Infrastructure* (financiado por la autoridad de la energía nuclear del Reino Unido UKAEA), todos ellos directamente relacionados con el perfil investigador de la plaza mediante la utilización de descripciones formales de *arquitecturas software* y de *métodos formales* para la obtención de garantías sobre la *corrección* del software de los sistemas construidos.

2.2 . Participación en propuestas de investigación

Desde su regreso a la universidad de Málaga, en el periodo 2021-2025, el candidato ha participado en la redacción de varias propuestas de investigación, entre las que fueron financiadas con éxito las siguientes (* corresponde a proyectos no finalizados):

- SoCUS: Social Computing for Urban Sustainability, Agencia Estatal de Investigación, proyectos TED de Transición Ecológica y Digital, 192,280 EUR (Como IP principal).
- ICIMUC: Plataforma inteligente de gestión de ciberseguridad Multi Cloud en el ámbito de la industria 4.0. Agencia Estatal de Investigación, 454,988 EUR (Como IP).
- IPSCA(*): Including people in smart city applications, Agencia Estatal de Investigación, 167,948 EUR (como Investigador).

Anteriormente, el candidato ha sido profesor (*Lecturer*) en la *University of York* en Reino Unido (2018-2021). Durante este periodo, el candidato participó en la redacción de varias propuestas de proyectos de investigación que fueron financiadas con éxito, y que incluyen:

- AMCA: Assured Mission-Critical Applications for Teams of Unmanned Vehicles, Dstl, £90,768.00 (como Co-IP).
- ALMI: Robotic Assistive Care, LLOYD'S REGISTER FOUNDATION (a través de AAIP), £232,568.80 (como Co-IP).
- Assured and Scalable Self-Adaptation for the Engineering of Trustworthy Autonomous Robotic Teams. Dstl, £99,947.22 (como Co-IP, financiada pero finalmente cancelada por falta de candidatos adecuados para formación del equipo técnico debido a restricciones de nacionalidad).
- RASPBERRY SI: Resource Adaptive Software Purpose-Built for Extraordinary Robotic Research Yields - Science Instruments. NASA, \$249,975.00 (Como investigador colaborador).

- Multi-Robot Systems for the Inspection and Maintenance of Nuclear Fusion Infrastructure, RACE-UKRI, £68,000.00 (Como Co-IP).
- Assurance of Online Learning for Robotic and Autonomous Systems. LLOYD'S REGISTER FOUNDATION (a través de AAIP), £113,577 (Como Co-IP).

Además de las propuestas anteriores, el candidato también envió otra propuesta al *Engineering and Physics Research Council* (EPSRC - organismo de ámbito nacional perteneciente al gobierno que financia los proyectos en ciencia e ingeniería en el Reino Unido) como Co-IP junto a otro equipo de *Imperial College London* que no fue financiada finalmente. El candidato también estuvo contratado como investigador postdoctoral (2013-2015) y (*Senior*) *Systems Scientist* (posición permanente centrada en investigación, 2015-2018) en la *Carnegie Mellon University* (Pittsburgh, Estados Unidos). Durante este periodo, el candidato participó en la redacción de varias propuestas, una de ellas como IP (que no fue finalmente considerada para su financiación) para la *National Science Foundation* (NSF).

2.3 Liderazgo

Supervisión

El candidato ha dirigido, junto con el Prof. Radu Calinescu, tres tesis por la Universidad de York:

- Saud Yonbawi (ahora profesor ayudante en la Universidad de Jeddah, en Arabia Saudí). La tesis fue defendida con éxito en Junio de 2021 y versa sobre el control descentralizado en sistemas adaptativos distribuidos que requieren garantías formales estrictas de calidad de servicio.
- Grisel Vazquez Flores (ahora investigadora postdoctoral en la Universidad de York). Su tesis se enmarca en el área de la planificación automática de tareas con garantías estructurales y cuantitativas en sistemas multi-robot y fue defendida con éxito en Julio de 2024.
- Brendan Devlin-Hill (ahora *Applied Physicist / Engineer for ML* en CERN). La tesis defendida con éxito en septiembre de 2025 se centra en la provisión de garantías formales en sistemas multi-robot heterogéneos que operan en entornos extremos (en concreto, en reactores de fusión nuclear como los planeados en el proyecto *Iter* en el que colaboran más de 35 países <http://www.iter.org>).

Además de las tesis anteriores, el candidato también supervisa actualmente dos tesis doctorales:

- Raquel Sánchez Salas. Universidad de Málaga (junto a Javier Troya Castilla). La tesis versa sobre la planificación automática de tareas de forma adaptativa en sistemas ciber-

físicos con garantías cuantitativas de forma eficiente mediante la combinación de métodos formales y algoritmos genéticos. Esta tesis se encuentra en su segundo año.

- Hamish Zhang. Universidad de York (junto a Radu Calinescu). La tesis versa sobre la provisión de garantías formales en sistemas autónomos y adaptativos que incorporan aprendizaje automático *online*, es decir, que ocurre de forma continua en tiempo de ejecución. Se espera que la tesis se complete a mediados de 2026.

Además de la supervisión de doctorandos, el candidato ha supervisado a tres investigadores postgraduados (Enrique Vilchez, David Eduardo Delgado, Raquel Sánchez) en el contexto del proyecto SoCUS (UMA, 2022-2024). En la Universidad de York, y junto a Radu Calinescu, también supervisó a Jordan Hamilton y Ioannis Stefanakos, ambos investigadores postdoctorales en el contexto del proyecto ALMI.

Con anterioridad a su etapa en York, el candidato también fue supervisor asistente en dos tesis doctorales por la *Carnegie Mellon University* dirigidas por el profesor David Garlan. La primera, del doctorando Gabriel Moreno (ahora *Principal Investigator* en el *CMU Software Engineering Institute*), versa sobre la consideración explícita del tiempo de latencia en sistemas adaptativos y fue defendida con éxito en 2017. La segunda, del doctorando Ashutosh Pandey (ahora *Research Scientist* en Facebook), versa sobre la planificación bajo incertidumbre en sistemas adaptativos y fue defendida con éxito en 2019.

Además de la supervisión de tesis doctorales y de investigadores pre y postdoctorales, cabe mencionar que el candidato ha supervisado más de 20 trabajos de máster y fin de grado, entre los que cabe destacar el TFM de Álvaro Aparicio Morales (basado en la línea de trabajo planteada en publicaciones como [CGS19, Cám20, Cám25], y que fue ganador del [*Premio SISTEDES al mejor TFM sobre nuevas metodologías y herramientas para el desarrollo de software 2025*](#)), o el trabajo fin de grado por la Universidad de York de Jason Mashinchi (ahora *Managing Director* de *Cambridge Kinetics*) que fue publicado en forma de artículo y ganó el [*Best Tool and Demo Award*](#) en la *European Conference on Software Architecture* (ECSA) en 2020.

Servicio a la comunidad investigadora

El candidato ha sido miembro de más de 50 comités de programa en eventos nacionales e internacionales, desempeñando también papeles clave como *PC Chair*, *Track Chair*, *Publicity Chair*, Organizador de talleres, etc. Estos eventos incluyen, entre otros, FACS (*International Conference on Formal Aspects of Component Software*— *PC Co-Chair* 2023), SEAMS (*International Conference on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems*

- *PC Co-Chair 2022, Artifact Track Chair 2017*), ECSA (*European Conference on Software Architecture - Industry Track Chair 2019, Diversity and Inclusion Chair 2020*) e ICSA (*International Conference on Software Architecture- New Ideas and Emerging Results Chair 2021*). Organizador de dos seminarios *NII Shonan* (Instituto Nacional de Informática Japonés: uno sobre teoría de control y autoadaptación (CaSAS 3) en 2020, y otro sobre interacción de incertidumbres (UNISON - <https://shonan.nii.ac.jp/seminars/232/>, por celebrar en Febrero de 2026). Miembro de los Comités Directivos de FACS (desde 2023) y SEAMS (desde 2022). Miembro representante el Consorcio Europeo de Investigación en Informática y Matemáticas (ERCIM) desde 2023.

Cabe destacar que el candidato es presidente del comité directivo (*Steering Committee Chair*) de la *International Conference on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems* (SEAMS, principal evento científico en ingeniería del software para sistemas autónomos y adaptativos, con calificación ICORE A) desde abril de 2024.

El candidato también ha participado como editor invitado en varios números especiales en *IEEE Software*, *Science of Computer Programming* y *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems*. Revisor habitual de revistas como *IEEE Transactions on Software Engineering*, *Communications of the ACM*, *IEEE Software*, *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, *ACM Transactions on Software Engineering Methodology*, *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems*, *Journal of Systems and Software*, *Science of Computer Programming* e *Information and Software Technology*, entre otras.

3 Modelos de financiación

La financiación es el pilar básico de la investigación en la universidad pública. Sin financiación, no se puede conformar un equipo que lleve a cabo tareas de investigación. La financiación para proyectos tecnológicos proviene de dos fuentes principales: los gobiernos y las empresas. El personal investigador participa en convocatorias para la financiación de sus proyectos. Estas subvenciones requieren un proceso de selección, en el que las agencias consideran el perfil y la trayectoria de los investigadores, las instalaciones y equipamiento necesario, el tiempo involucrado y el potencial de los resultados de la producción científica.

Algunos de los medios de financiación pública de investigación en el sector tecnológico a los que se puede acceder desde las universidades españolas incluyen:

- **Proyectos Europeos.** El próximo programa de inversión en investigación e innovación de la Unión Europea se llama [Horizonte Europa](#). Servirá para financiar proyectos entre 2021 y 2027 por un total aproximado de 93.5 billones de euros. Los proyectos

financiados por la Unión Europea se proponen por consorcios de empresas e instituciones y permiten contratar investigadores postdoctorales, predoctorales y técnicos. Es común que se realicen tesis doctorales en el contexto de un Proyecto Europeo.

- **Proyectos Nacionales.** Se trata de los proyectos financiados por el Gobierno de España (o excepcionalmente, financiados con fondos europeos – como los Next Generation EU- que se instrumentalizan a través de agencias gubernamentales como la Agencia Estatal de Investigación), que suelen ser una vía de financiación común de los grupos de investigación españoles. Comúnmente, estos proyectos ofrecen financiación durante 3 o 4 años y están liderados por uno o dos investigadores principales con una trayectoria investigadora consolidada. Suelen permitir la contratación de personal técnico y también son una vía de acceso a la universidad, pues algunos de estos proyectos llevan asociada la contratación de personal investigador para la realización de la tesis doctoral.
- **Proyectos Regionales.** Dependen de cada comunidad autónoma. En Andalucía tenemos los proyectos relativos al [*sistema andaluz del conocimiento*](#), financiados por la Junta de Andalucía. Su objetivo es similar al de los proyectos nacionales, y en Andalucía es común que distintos grupos de investigación gocen a la vez de proyectos nacionales y regionales. Los proyectos de la Junta de Andalucía también permiten la contratación de personal técnico y también son una vía de acceso a la universidad.
- **Redes Nacionales de Investigación.** Estas redes, financiadas por el Gobierno de España, están destinadas a la colaboración entre grupos de investigación españoles, optimizando recursos existentes, fomentando sinergias y promoviendo la complementariedad de los grupos que trabajan en diversos ámbitos. La financiación recibida es pequeña, y está principalmente destinada a cubrir los gastos de desplazamiento de personal investigador entre distintos centros españoles.
- **Financiación para investigadores.** La financiación descrita en los puntos anteriores está destinada a grupos de investigación. Sin embargo, también hay convocatorias y ayudas destinadas a financiar a un solo investigador, y suelen estar encaminadas a la movilidad internacional e intersectorial y la retención de talento. Algunas de estas convocatorias y ayudas requieren la presentación de un proyecto investigador, mientras que otras no lo requieren. Por ejemplo, La Unión Europea propone las acciones *Marie Skłodowska-Curie* (antes llamadas becas *Marie Curie*), que ofrecen ayudas tanto a investigadores predoctorales como posdoctorales y cuyo objetivo es proporcionar a los investigadores una formación basada en la excelencia y con las mejores oportunidades de desarrollo. La Unión Europea también propone ayudas destinadas a un único investigador, con una trayectoria excelente, para que éste forme un equipo de investigación, tales como las del *European Research Council: ERC Starting Grant*,

Consolidator Grant, o Advanced Grant, a las que pueden concurrir investigadores en distintas etapas de su carrera. Estas ayudas permiten al solicitante conformar, desde cero, un grupo de investigación sólido, y para optar a ellas hay que proponer un proyecto investigador excelente. También se convocan anualmente becas predoctorales, las conocidas ayudas para la formación de profesorado universitario (FPU), y becas postdoctorales, como las ayudas para contratos Juan de la Cierva (JdIC - formación e incorporación) y las ayudas para contratos Ramón y Cajal (RyC).

Además de las ayudas y convocatorias descritas anteriormente, hay otras muchas que intentan acercar el mundo universitario y el empresarial. Ejemplos son:

- **Ayudas para contratos Torres Quevedo (PTQ)**, cuyo objetivo es la contratación laboral de personas con el grado de doctor para promover la realización de proyectos de investigación industrial, de desarrollo experimental o estudios de viabilidad previo.
- **Ayudas para la formación de doctores en empresas “Doctores Industriales”**. Su objetivo es la formación de doctores en empresas mediante la cofinanciación de los contratos laborales del personal investigador en formación que participen en un proyecto de investigación industrial o de desarrollo experimental que se desarrolle en la empresa, en el que se enmarcará su tesis doctoral.

4 Proyecto investigador propuesto

El proyecto investigador presentado en la segunda parte de este documento se podría enmarcar en diferentes convocatorias de las detalladas en el punto anterior. Se presenta en el contexto del grupo de investigación SCENiC (<http://www.scenic.uma.es>), adscrito al Departamento de Lenguajes y Ciencias de la Computación de la Universidad de Málaga y componente del Instituto de Tecnología e Ingeniería del Software (ITIS – <https://itis.uma.es>) de la misma universidad. El proyecto plantea una colaboración entre miembros de ITIS y el Instituto de Investigación Biomédica de Málaga (IBIMA-Bionand - <https://ibima.eu/es>).

El proyecto se plantea en el contexto de los sistemas socio-cíber-físicos (SCPS), que se está extendiendo a diversos ámbitos de aplicación relacionados con las ciudades inteligentes, la agricultura y la industria. Sin embargo, a pesar de los avances en la integración de los aspectos humanos en los CPS, la investigación sobre los SCPS se encuentra todavía en sus primeras fases. Faltan métodos fiables para integrar el componente humano y social junto con los elementos cibernéticos y físicos de los SCPS, a pesar de que su influencia es fundamental en el cumplimiento de los objetivos de estos sistemas. Para lograr sistemas SCPS resilientes, capaces de cumplir con sus objetivos a pesar de la incertidumbre relativa al comportamiento humano y al dinamismo inherente a su entorno de ejecución, es necesario conseguir una integración armoniosa del software, los elementos físicos y las personas.

Es por eso por lo que el proyecto planteado aborda los retos más importantes de este tipo de sistemas, centrándose en la necesidad de los SCPS de adaptarse continuamente para poder seguir cumpliendo sus objetivos, a pesar de condiciones inesperadas que se puedan presentar en su contexto operacional en tiempo de ejecución. Para ello, será necesario abordar también el modelado heterogéneo de los espacios de los SCPS (social, cibernético, físico) y sus dependencias, así como el análisis composicional y la síntesis de planes de actuación bajo incertidumbre. La propuesta plantea aplicar los métodos y herramientas a desarrollar a escenarios en el ámbito de las labores asistenciales del entorno sanitario, en el que se dan situaciones con una alta variabilidad e incertidumbre, y en los que una mejor integración de los componentes en los tres espacios del SCPS puede hacer que se obtengan mejores resultados (salvaguardando la seguridad de las personas involucradas, aumentando las posibilidades de éxito de la actuación asistencial), en menos tiempo y con un coste menor (en desgaste personal, recursos, etc.).

PARTE II. PROYECTO INVESTIGADOR

1. Contexto y justificación de la propuesta

La noción de Sistema Socio-Cíber-Físico (SCPS, de *Socio-Cyber-Physical System*) surgió de la necesidad de comprender el impacto mutuo entre los Sistemas típicamente denominados como cíberfísicos (CPS, de *Cyber-Physical System*) y los seres humanos. En el paradigma de los CPS, las personas se consideran entidades externas que interactúan con estos sistemas. Sin embargo, a medida que los dispositivos inteligentes se han ido incorporando como parte de la vida cotidiana, la estrecha relación que existe entre el correcto funcionamiento de los CPS y el comportamiento de las personas que interactúan con ellos se ha hecho cada vez más evidente. Así, nos encontramos sistemas de este tipo en aplicaciones de ciudades inteligentes, en industria, en sanidad, y en general en todos los que implican una fuerte carga de interacción con personas. En un primer momento, las personas fueron vistas como fuentes multifacéticas de información, o "sensores humanos" [WZY17]. A continuación, el paradigma CPS *Human-in-the-Loop* (HitL) reconoció a los humanos como actores intrínsecos dentro de estos sistemas [MSL13, NZS15]. A lo largo de los años, las personas y sus actividades se han integrado en los CPS de varias formas. Primero como sistemas en los que personas y dispositivos se comunican entre sí (*Cyber-Physical-Human Systems* [SSZ16, QMD16, WRS14]). Más adelante, como sistemas en los que personas y dispositivos pueden controlarse mutuamente (*Human-Cyber-Physical Systems* [LW20]), como sistemas que tienen en cuenta el conocimiento humano, la sociedad y la cultura (*Cyber-Physical-Social-Thinking hyperspace* [ZTL15]) y, por último, sistemas que tienen en cuenta interacciones socio-técnicas complejas (utilizados en la literatura como *Cyber-Physical Social Systems*, *Social-Cyber-Physical Systems* o *Socio-Cyber-Physical Systems* [CCP19, Hor12, XLX17]).

El modelado de SCPS es imprescindible para el desarrollo de aplicaciones y el razonamiento sobre las mismas (en términos de satisfacción de propiedades, validación de requisitos, comprobación de la corrección de los sistemas, prevención de errores, etc.). Por otro lado, gran parte de los CPS no funcionan de forma aislada, sino que interactúan con personas o con dispositivos controlados e influenciados por personas.

Esta propuesta se centra en dos casos de estudio en el ámbito de la salud digital. Concretamente, se enmarca en el Entorno de Especialización Inteligente “Sociedad inteligente, resiliente y saludable” (E1) de la estrategia para la Sostenibilidad de Andalucía 2021-2027, S4Andalucía (<https://s4andalucia.es/>). En efecto, la explotación de las sinergias entre los componentes sociales, cibernéticos y físicos de un mismo sistema dotará al mismo de una resiliencia basada en garantizar los requisitos especificados y prever errores mediante un análisis exhaustivo de sus propiedades. Por otro lado, la aplicación al ámbito de la salud, como se exhibe en el estudio de casos propuestos, demostrará cómo estas técnicas pueden contribuir a mejorar la atención sanitaria. Más concretamente, en el subentorno “Salud y bienestar social” (E1.S1) se pretende que en las Administraciones Públicas se logren las condiciones que favorezcan una mayor coordinación entre los agentes que configuran los sistemas de salud, bienestar y hábitat. Este tipo de sistemas son un ejemplo donde los componentes antes mencionados (incluido el componente humano) necesitan interactuar para

conseguir herramientas realmente innovadoras, lo que contribuye a responder al reto E1.S1.R4.

El subentorno “Sector de las Tecnologías de la Información, Comunicaciones y Contenidos (TICC)” (E1.S3) es el que más responde a los logros esperados de este proyecto. Aunque el proyecto trasciende a los gemelos digitales, mencionados específicamente entre las actuaciones de este subentorno, los resultados que se obtengan podrían aplicarse también a aquellos. Además, la gestión de la incertidumbre que se desarrollará en el proyecto dotará a estos sistemas de una mejor capacidad de respuesta. Todo ello contribuirá al reto E1.S3.R4.

Por otro lado, dos de los ejes de apoyo de la Estrategia de Especialización Inteligente se ven interpelados transversalmente por los objetos de esta propuesta. Se trata de las denominadas “Generación y Transferencia de conocimiento” (T1), en su desafío T1.D1, y “Transformación digital” (T2), en su desafío T2.D1. Así, en el paquete de trabajo para la difusión y explotación de los resultados del proyecto se promoverá la transferencia y aplicación del conocimiento que se generará durante la ejecución del mismo. También se espera aumentar la interacción entre grupos de distintos ámbitos y pertenecientes a diferentes agentes del Sistema Andaluz del Conocimiento como son los institutos universitarios de investigación IBIMA-Bionand (<https://ibima.eu/es/>) e ITIS Software (<https://itis.uma.es/>).

1.1 Motivación de la propuesta en el contexto científico-técnico

El uso de los SCPS se está extendiendo a diversos ámbitos de aplicación, como las ciudades inteligentes, los hogares inteligentes, la agricultura y la industria a mediana y gran escala [ZCL20, YPN19, YNP19, PQZ20, ZWZ20]. Sin embargo, a pesar de los avances en la integración de los aspectos humanos en los CPS, la investigación sobre los SCPS se encuentra todavía en sus primeras fases. Faltan métodos fiables para modelar el componente social junto con los elementos cibernéticos y físicos. La naturaleza inherentemente impredecible y compleja de los seres humanos añade nuevos retos al sistema. Los humanos son seres sociales, y el término "social" abarca una amplia gama de aspectos emocionales, cognitivos y de comportamiento [YPN19]. Para lograr una integración armoniosa del software, los elementos físicos y las personas, la investigación de los SCPS debe adoptar un enfoque que haga hincapié en la sinergia entre los distintos elementos que componen el SCPS. Sin embargo, las conceptualizaciones actuales de los SCPS a menudo sólo captan parcialmente el conjunto de características clave de la componente humana que influyen en el funcionamiento de los SCPS, y que están relacionadas con el rol, responsabilidad, experiencia o intencionalidad de las personas involucradas (véase la figura 1) [CCP19].

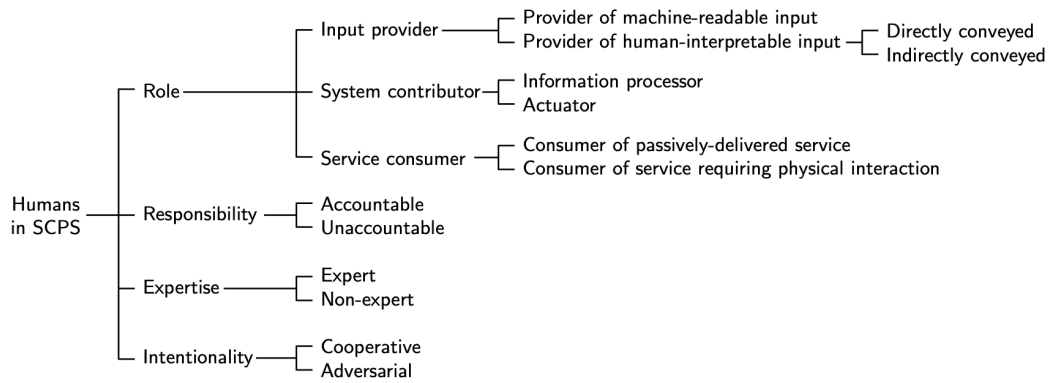


Figura 1: Características clave de involucramiento humano en SCPS (de [CCP19]).

Para poder cumplir satisfactoriamente sus objetivos, los SCPS se enfrentan a varios retos que los métodos de ingeniería existentes se esfuerzan por abordar, y que están relacionados con: (I) las interacciones entre espacios digitales, físicos y sociales; (II) la necesidad de formalismos de modelado heterogéneos; (III) la cooperación de componentes en distintos espacios para alcanzar los objetivos del sistema en contextos específicos; (IV) la incertidumbre generalizada; (V) los elementos humanos inherentes; y (VI) la necesidad de adaptación continua a nuevas situaciones.

Una de las motivaciones principales de la propuesta surge de la necesidad de una mejor respuesta a las labores asistenciales en el entorno sanitario. En concreto, nos planteamos utilizar como ejes que guíen los desarrollos de la presente propuesta los siguientes dos escenarios:

[E1] *Atención domiciliaria de emergencias.* Equipos de atención avanzada se desplazan al domicilio de un paciente crónico al recibir un aviso, por ejemplo, por un fuerte dolor en el pecho. El equipo que se desplaza consta de un conductor y un enfermero que se comunican con el coordinador médico a través de una *tablet*. Durante el trayecto, el enfermero recibe información relativa al historial médico del paciente desde el Centro Coordinador de Emergencias y se prepara para la intervención. A su llegada al domicilio, realiza una valoración inicial de nivel de prioridad del caso según algoritmos de *triage* y procede a medición de constantes vitales y monitorización cardiovascular (ECG, presión arterial) y respiratoria (frecuencia respiratoria y saturación periférica de oxígeno). Tras la valoración y obtención de información clínica, el enfermero y el coordinador médico deciden sobre el tratamiento *in situ*. Durante el tratamiento se mantiene la monitorización del paciente para comprobar si hay cambios eléctricos sugestivos de empeoramiento o mejoría. Si el proceso revierte sin complicaciones y se descarta *etiología cardiogénica*, se registra toda la actuación llevada a cabo en historia clínica electrónica y se genera un informe que puede ser consultado posteriormente por el equipo de Atención Primaria que habitualmente atiende al paciente en su Centro de Salud. Si la situación clínica no se estabiliza, el médico coordinador y el enfermero deciden traslado al servicio de Urgencias hospitalarias en ambulancia medicalizada.

[E2] *Urgencias hospitalarias.* Durante la transferencia en Urgencias, los equipos de monitorización de la ambulancia se intercambian por los del hospital que, habitualmente,

son compatibles (electrodos, sonda de pulsioximetría, bomba de fluidoterapia, etc.) con los del hospital. En Urgencias, se procede a clasificación según sistema de triage. Al tratarse de un síndrome coronario agudo, se le otorga prioridad 1 o 2 dependiendo del nivel de gravedad y deterioro de funciones vitales. En este punto, el equipo médico debe confirmar si se trata de un Síndrome Coronario Agudo con o sin Elevación del Segmento ST (SCACEST), que vendrá determinado por los datos del ECG y de los parámetros analíticos de biomarcadores cardiosensibles. Se confirma SCACEST y desde Urgencias se activa al equipo de Hemodinámica para traslado a Unidad de Hemodinámica y realización de cateterismo para angioplastia primaria para revascularización miocárdica. Este traslado hay que realizarlo preferentemente antes de transcurridos 90-120 minutos desde el primer contacto con el equipo de Emergencias en el domicilio. La realización del procedimiento de angioplastia es un procedimiento mínimamente invasivo, a través de arterias periféricas que permiten llegar al árbol vascular coronario, pero que requiere una monitorización muy avanzada y exhaustiva (ECG, saturación de oxígeno ...), debido a las complicaciones que pueden surgir durante el procedimiento. Tras el procedimiento, el paciente es trasladado a UCI con monitorización portátil acompañado de la enfermera de Hemodinámica para su control al menos durante las 24 horas posteriores.

En estos escenarios, los distintos espacios que conforman nuestros SCPS incluyen:

- *Espacio social o humano*: integra a los distintos actores. Por ejemplo, en el escenario E1 tenemos conductor, enfermero, coordinador sanitario y paciente. Cada uno de ellos puede adoptar diversos roles, tales como proveedores de información (por ejemplo, el enfermero puede aportar información sobre los síntomas observados en el paciente), actuador (el conductor traslada al equipo médico y paciente entre distintos puntos, el enfermero realiza el procedimiento *in situ*), procesador de información (el coordinador médico gestiona la información recibida desde distintas fuentes para llevar a cabo la coordinación de los distintos equipos médicos), o consumidor (el paciente recibe atención médica). En el escenario E2 tenemos, entre otros, varios médicos y enfermeros, con distintos roles, responsabilidades y jerarquía entre ellos.
- *Espacio digital o “ciber”*: integra el software que da soporte a los procesos del SCPS. En los casos de estudio tenemos los controladores de los sensores de saturación de oxígeno, ECG y equipamiento médico asociado, software de gestión para la consulta de historiales médicos desde tablet y coordinación de los equipos médicos, etc. Además, podemos tener sistemas de soporte a las decisiones, sistemas de recomendación de tratamiento u otro tipo de sistemas.
- *Espacio físico*: formado por los espacios físicos en los que se desarrolla la actividad del SCPS (domicilio del paciente, vías de comunicación, entorno clínico), así como por los elementos físicos integrados en estos espacios. Estos elementos físicos pueden estar íntimamente relacionados con el software en algunos casos (tales como los sensores para monitorizar el estado del paciente) y en otros pueden simplemente formar parte del ámbito de operación del sistema (ambulancia y otros vehículos en la carretera, camillas, sillas de ruedas, etc.).

1.2 Hipótesis de partida y novedad en relación con el estado del arte

Los espacios social, cibernético y físico en los SCPS son de naturaleza fundamentalmente diferente: los ciberespacios implican aplicaciones, configuraciones de red e infraestructura; los espacios físicos se refieren a elementos que operan bajo las leyes de la física; y los espacios sociales abarcan los roles humanos, el conocimiento y la estructura organizativa. Como se sugiere en [WBC21], la mezcla inherente de componentes de los tres espacios exige un enfoque de ingeniería multidisciplinar nuevo, y abordar los aspectos no cibernéticos de los SCPS requerirá nuevos avances.

La consideración integral de los aspectos sociales junto con el resto de los espacios CPS dentro de los SCPS plantea una serie de retos de en relación con una mejor utilización del conocimiento y recursos:

- I. *Interacciones entre espacios digitales, físicos y sociales.* De cara a cumplir satisfactoriamente los objetivos del SCPS, es necesario considerar de forma explícita las interacciones entre elementos en distintos espacios. Por ejemplo, la interacción entre un conductor poco experimentado (o con altos niveles de estrés y/o cansancio) y una carretera muy concurrida (elementos pertenecientes al espacio humano y físico del SCPS, respectivamente) puede afectar de forma significativa al tiempo de respuesta del equipo médico, así como elevar el riesgo en el transporte, comprometiendo la integridad física del paciente y del propio equipo médico. Por otro lado, interacciones entre los fallos en el software (por ejemplo, del software de comunicación con el coordinador médico remoto) y un enfermero poco experimentado pueden dar lugar a situaciones en las que se determine de forma errónea administrar el tratamiento en el domicilio (o retrasar su decisión), cuando en realidad lo más adecuado sería trasladar al paciente al centro hospitalario de forma inmediata.
- II. *Necesidad de formalismos de modelado heterogéneos.* Analizar el comportamiento y determinar la mejor forma de gestionar un SCPS para satisfacer sus objetivos requerirá poder representar los espacios digitales, físicos y sociales, así como sus interacciones, de una forma adecuada. Para ello será necesario recurrir a distintos tipos de modelos, tales como los basados en grafos para representar la topología del espacio físico (por ejemplo, sistemas de información geográfica o mapas de carreteras y otras vías de comunicación entre los centros hospitalarios y domicilios), basados en máquinas de estados que permitan representar el comportamiento de los elementos físicos (vehículos y otros obstáculos en la carretera [PT21]), del software durante su ejecución (interacción y flujo de información entre componentes como pueden ser la aplicación de coordinación hospitalaria y la utilizada en la tablet del equipo médico que se desplaza al domicilio [LMP08]), o de los atributos característicos de los humanos que están involucrados en el sistema (por ejemplo, oportunidad, voluntad y capacidad de actuación de los enfermeros, conductores y coordinadores disponibles para atender la emergencia [ES11]).
- III. *Cooperación de componentes en distintos espacios para alcanzar los objetivos del SCPS.* Las tareas a realizar en el sistema necesitan de la cooperación entre personas, software y elementos físicos. Estas tareas pueden llevarse a cabo mediante múltiples

formas correspondientes a distintas combinaciones alternativas de los elementos disponibles. Por ejemplo, distintos equipos de atención domiciliaria que se encuentran en diferentes puntos de la ciudad pueden ser seleccionados para atender una urgencia específica, dependiendo de su cercanía, grado de preparación y disponibilidad. Una vez que el equipo llega al domicilio, se pueden utilizar diferentes combinaciones de sensores que requieren diferentes tiempos de configuración y proporcionan distintos tipos de información que puede ser más o menos valiosa, dependiendo de la urgencia específica que se esté atendiendo. Si es necesario el traslado a un centro hospitalario, puede haber múltiples alternativas, cada una de ellas con más o menos cercanía al domicilio, nivel de equipamiento y disponibilidad de personal cualificado para el tipo de emergencia a atender. En general, determinar cuál es la mejor combinación para optimizar los objetivos del sistema (por ejemplo, tiempo de respuesta para atender la urgencia, seguridad del paciente en el transporte si fuera necesario y nivel de éxito en el tratamiento suministrado) no es sencillo debido a la explosión combinatoria de elementos disponibles.

- IV. *Incertidumbre generalizada.* Ahondando en el reto descrito en el anterior apartado, existen distintas fuentes de incertidumbre en el entorno operacional de los SCPS, relacionadas con los efectos emergentes de interacciones entre elementos físicos y software (por ejemplo, un sensor ECG mal calibrado puede dar lecturas erróneas o imprecisas), el comportamiento de las personas, que es con frecuencia poco predecible (el mismo enfermero puede llevar a cabo dos juicios diferentes sobre la necesidad de trasladar al paciente ante las mismas observaciones, dependiendo de si se encuentra en una situación de estrés o cansancio), e incluso derivado de la variabilidad del entorno físico (tiempo de llegada variable al domicilio, dependiendo de las condiciones del tráfico, o directamente por la respuesta del paciente a la medicación administrada, monitorizada continuamente). Todas estas fuentes de incertidumbre dificultan aún más el determinar cuáles son las mejores combinaciones de elementos disponibles para llevar a cabo de forma satisfactoria los objetivos del sistema.
- V. *Elementos humanos inherentes.* Relacionado con el apartado anterior, una de las categorías de fuente de incertidumbre más relevantes en los SCPS es la relativa al comportamiento humano. Sesgos, distintos niveles de estrés o carga cognitiva, e incluso distintos niveles de experiencia o capacidad/destreza en la realización de distintas tareas (por ejemplo, un enfermero con una formación avanzada en la utilización de dispositivos de monitorización del paciente puede tener una experiencia más limitada en técnicas de reanimación), pueden resultar en altos niveles de variabilidad en el correcto desempeño de las funciones y el cumplimiento de los objetivos del sistema, dependiendo del contexto concreto. Además, el funcionamiento de los sistemas SCPS se rige mediante un delicado equilibrio entre los objetivos técnicos del sistema y limitaciones sociotécnicas más amplias. Mientras que los diseñadores de sistemas por lo general priorizan objetivos como seguridad, disponibilidad, costo, eficiencia y puntualidad, las implementaciones en el mundo real también deben adherirse a los principios éticos, las regulaciones legales y el cumplimiento de estándares, denominados SLEEC (*Social, Legal, Ethical, Empathetic and Cultural*) [TP+22]. La interacción entre estos dos tipos de objetivo es potencialmente conflictiva, ya que la

optimización de la una dimensión puede ir en detrimento de otra. Por ejemplo, optimizar el tiempo de respuesta mediante el acortamiento del viaje de una ambulancia podría implicar el uso de una ruta que atravesase un espacio restringido, lo que podría entrar en conflicto con la regulación legal vigente. Por ello, los compromisos entre estas distintas dimensiones en los objetivos del SCPS deben gestionarse cuidadosamente.

- VI. *Necesidad de adaptación continua a nuevas situaciones.* El entorno operacional de un SCPS está en constante cambio: la presentación de los signos y síntomas no siempre es totalmente definitoria, hay casos en los que incluso la descripción que hace el paciente de los síntomas genera confusión, y en el caso de entradas de señales de monitorización, puede haber artefactos (temblor del paciente, cambios de temperatura, sudoración, etc.) que dificultan la interpretación correcta de los datos ofrecidos. Por otra parte, la respuesta fisiológica del paciente puede variar en función de condiciones clínicas previas, antecedentes, tratarse de un paciente polimedicado, etc. Además, coexisten otros factores que tienen que ver con la gestión y organización de los recursos estructurales y humanos. Por una parte, los servicios de emergencias han de gestionar a veces una concurrencia de demandas simultáneas que obligan a priorizar recursos y seleccionar a dónde enviarlos en primer lugar, con arreglo a los protocolos de triaje, que no siempre tienen una capacidad clasificatoria exacta. También los equipamientos y dispositivos están sometidos a la incertidumbre del fallo, aunque se intentan minimizar en lo posible con los protocolos de revisión de equipamientos. Además, la composición de los equipos asistenciales está sometida a la variabilidad de la práctica clínica que se deriva de distintos niveles de formación y actualización en los profesionales, experiencia, período del año (en períodos estivales aumentan las sustituciones con personal contratado o eventual), e incluso factores motivacionales y de clima laboral que también condicionan el rendimiento de los profesionales. Este alto nivel de dinamismo en el contexto operacional del SCPS crea una necesidad de adaptación constante para satisfacer los objetivos del sistema, a pesar de los cambios. Este reto no es exclusivo de los SCPS, y la ingeniería de sistemas autónomos y adaptativos [LGG+13] proporciona una serie de principios básicos y técnicas que permiten desarrollar mecanismos efectivos de adaptación en sistemas ciberfísicos, incluyendo aquellos en los que hay humanos involucrados (Human-in-the-Loop o HitL) en dominios tales como la ciberseguridad [CGM17] o la gestión de plantas de energías renovables [CMG15], para los que ya hay pruebas de concepto disponibles.

Para abordar de una forma efectiva estos retos, los SCPS se tienen que adaptar y evolucionar, mejorando continuamente sus capacidades y aprendiendo capacidades nuevas para gestionar la incertidumbre, manejar condiciones inesperadas y adaptarse a los cambios a lo largo de su vida útil [WAC21]. En estos sistemas, el software desempeña un papel fundamental la supervisión y el control de todo el sistema con garantías de resiliencia. Debido a su estrecha relación con los contextos operativos físicos y sociales, los SCPS incorporan perspectivas de ingeniería de sistemas y sistemas de sistemas en el proceso de ingeniería del software. Estos procesos de ingeniería de sistemas deben tener en cuenta componentes cibernéticos, físicos y sociales (humanos) como elementos de primer nivel.

2. Objetivos, metodología, y plan de trabajo

2.1 Objetivos técnicos fundamentales

El objetivo global de la propuesta es *proporcionar métodos de modelado, análisis y desarrollo de sistemas SCPS que permitan explotar de forma adecuada las sinergias entre los componentes de los espacios social, cibernético y físico de un mismo sistema*. Nuestro planteamiento general es explotar el conocimiento y experiencia de los miembros del equipo investigador en distintas áreas, incluyendo CPS, sistemas adaptativos, modelado de procesos y personas, y técnicas avanzadas de análisis e incertidumbre, para avanzar en el estudio de los SCPS contribuyendo en los retos planteados en la sección II.1.2. Como eje principal partimos de la convicción de que los SCPS tienen que estar preparados para adaptarse y evolucionar, mejorando continuamente sus capacidades globales y desarrollando nuevas capacidades que les permitan manejar la incertidumbre de forma más adecuada, enfrentándose mejor a situaciones conocidas y no conocidas. Aunque las soluciones que desarrollaremos se plantearán de forma genérica y aplicable a distintos ámbitos, nos centraremos en los dos casos de estudio en el ámbito sanitario descritos anteriormente en la motivación de la propuesta (sección II.1.1). Estos escenarios plantean situaciones con una alta variabilidad e incertidumbre, en los que una mejor integración de los componentes en los tres espacios del SCPS puede hacer que se obtengan mejores resultados, en menos tiempo y con un coste menor (en desgaste personal, recursos, etc.).

Al estar formulado el objetivo global del proyecto en términos muy amplios, nos centraremos en los siguientes objetivos concretos:

[G1] *Modelado heterogéneo de SCPS*. En este objetivo consideramos el modelado de los espacios social, cibernético y físico, así como de las dependencias e interacciones entre ellos. Los SCPS funcionan en entornos complejos que abarcan espacios cibernéticos, físicos y sociales, caracterizados por estrechas interacciones entre ellos. Aunque podemos encontrar en la literatura algunos intentos de desarrollar formalismos y herramientas de modelado que tengan en cuenta la naturaleza heterogénea y la estrecha interacción entre estos espacios (véase, por ejemplo, [LFW16]), hay retos que no están resueltos adecuadamente. Propondremos extensiones de los formalismos y herramientas de modelado existentes para considerar la naturaleza heterogénea y la estrecha interacción de los espacios cibernéticos, físicos y sociales. Como primer intento, describiremos el SCPS y su entorno como modelos híbridos que integran tanto la descripción de la estructura del sistema y las relaciones entre espacios en forma de grafos (por ejemplo, topología de la red de carreteras, relaciones de colaboración entre miembros de la organización, estructura de la red de comunicaciones), así como el comportamiento de los distintos componentes físicos, digitales y humanos, incluyendo sus propiedades, como

procesos estocásticos (véase, por ejemplo, [Cám20, Cám25, YPN21]). Por ejemplo, en nuestro escenario de atención domiciliaria, cada equipo de atención médica y domicilio tiene una posición, y existe una serie de vías de comunicación disponibles entre ellos y distancias asociadas. En el ciberespacio, existen aplicaciones que comunican la posición de los vehículos de emergencia al software que se maneja desde la central de coordinación. En el espacio social, hay una jerarquía y relación de colaboración entre los coordinadores de emergencias y los equipos de atención que son supervisados por ellos.

[G2] *Modelado de las personas*. En los SCPS, los seres humanos son componentes funcionales de los sistemas. Al tratarlos como partes integrantes en el modelado global de un SCPS, podemos incorporar el comportamiento humano al considerar los sistemas y sus adaptaciones a los cambios en el contexto de ejecución. Aunque los seres humanos no pueden ser controlados directamente y su verdadero estado sigue siendo desconocido (aunque puede deducirse de las observaciones y sus acciones pueden verse influidas por la información suministrada), la inclusión y modelización explícita de los seres humanos permite estimar el impacto de su comportamiento en los objetivos del SCPS (por ejemplo, mediante la representación de atributos de los individuos correspondiente a su experiencia, capturada en modelos probabilísticos [CMG15]). Además, este enfoque permite considerar cómo las tecnologías pueden afectar al comportamiento humano y cómo las relaciones de las personas con los componentes computacionales podrían crear fallos latentes (por ejemplo, el manejo de una aplicación software por una persona poco experimentada en su uso puede crear problemas que no se darían en un caso en el que la persona tiene un mayor nivel de experiencia). La integración del comportamiento de los seres humanos en los SCPS como entidades de primer orden ayuda a garantizar que los errores humanos conocidos no coincidan con fallos del sistema que, si no se prevén, podrían comprometer la integridad de los SCPS y los servicios críticos que prestan. Para llevar a cabo la representación de las personas que se integran en el sistema, proponemos instanciar el modelo OWC (*Opportunity-Willingness-Capability*) [ES11] en el contexto de los SCPS, modelando a las personas con roles análogos a sensores, actuadores y procesadores de información (por ejemplo, en la toma de decisiones). Cuando desempeñan estos roles, las personas realizan sus tareas con cierto grado de incertidumbre que depende de qué se encuentren haciendo (*opportunity*), su grado de estrés o disposición a realizar una tarea (*willingness*), o el grado de formación en la tarea que están realizando (*capability*). El modelo OWC es un marco de trabajo genérico que puede ser instanciado y especializado para distintos ámbitos. Existen diversos trabajos que han explorado su uso en el contexto de sistemas ciberfísicos y auto-adaptativos [CGM17, CMG15, GAF+20] que apuntan a su idoneidad de uso en el contexto de SCPS.

[G3] *Análisis composicional y síntesis de planes bajo incertidumbre*. Para poder analizar el impacto de los elementos en los distintos espacios del SCPS, así como de sus

interacciones y dependencias en la satisfacción de los objetivos del sistema, será necesario integrar múltiples técnicas de análisis. Esto requerirá explorar el uso de verificación composicional, incluyendo, entre otras técnicas *assume-guarantee* [KNP+10, PBU09], así como la integración directa de otros mecanismos de análisis heterogéneos que permiten el análisis del comportamiento del sistema bajo distintas fuentes de incertidumbre (por ejemplo, de incertidumbre estructural y comportamiento estocástico [Cám20, CCG+17]). Más allá de este análisis, proponemos también la síntesis automática de planes para optimizar la realización de tareas de la forma más adecuada posible respecto a los objetivos técnicos del SCPS (todo ello, respetando requisitos SLEEC que pueden venir derivados del marco regulatorio legal, estándares, etc. [CB25]). Por ejemplo, en el ámbito de la atención domiciliaria descrito anteriormente en el escenario E1 (sección II.2), esto supondría el poder sugerir planes a los coordinadores de emergencias que, entre otras cosas, asignen los equipos más adecuados para desplazarse a los distintos domicilios atendiendo a criterios de cercanía, disponibilidad o experiencia de las personas involucradas.

- [G4] *Autoadaptación*. Proponemos el uso de la autoadaptación [GCH04, LGG+13, Wey21] para hacer frente a los cambios en el contexto operacional del SCPS en tiempo de ejecución. Esto permitirá aumentar la resiliencia del sistema y mantener sus objetivos, a pesar de las incertidumbres en tiempo de ejecución que se puedan dar en el propio sistema, su entorno y sus requisitos [AGK19, CMP20]. Concretamente, proponemos basarnos en propuestas existentes de auto-adaptación en dos categorías distintas. Por un lado, están las que han considerado de forma explícita la latencia (o el tiempo de adaptación) para optimizar el tiempo de respuesta y el rendimiento de los sistemas (proporcionando también la posibilidad de adaptación *proactiva* o *anticipatoria* a situaciones que puedan requerir adaptación) [MCG+18]. Por otro lado, están las que involucran componentes humanos (por ejemplo, en los roles de procesadores de información o actuadores) en las tareas [CGM17, CMG15]. Mientras que la primera categoría no ha sido aplicada a sistemas que incluyen aspectos humanos y físicos como los que pueden darse en los SCPS, la segunda no considera de forma explícita el tiempo de adaptación ni la posibilidad de anticiparse a situaciones que requieran de adaptación. Para conseguir la adaptación satisfactoria que mantenga los objetivos del SCPS, proponemos combinar ambos tipos de propuesta y aplicarlas a los SCPS, instanciando un proceso de auto-adaptación en el ámbito de la asistencia domiciliaria, en el que optimizar el tiempo de respuesta y anticiparse a situaciones que requieran acciones urgentes de las personas involucradas es esencial (por ejemplo, preparando a celadores y otras personas involucradas de forma proactiva mediante el envío de notificaciones para la recepción inmediata de un paciente que está siendo trasladado al centro hospitalario).

2.2 Indicadores y cuantificación del cumplimiento de los objetivos técnicos

Para cuantificar el cumplimiento de los objetivos técnicos del proyecto, utilizaremos los siguientes indicadores (*Key Performance Indicators* o KPIs):

- G1. *Modelado heterogéneo de SCPS.*
 - KPI-G1-1: Cobertura en el modelado superior al 80% de los elementos, atributos y relaciones relevantes en los espacios sociales, digitales y físicos relacionados con las tareas descritas en los casos de estudio.
 - KPI-G1-2: Minimización de solapamiento/redundancia (<20%) en los elementos, atributos y relaciones de los modelos correspondientes a los distintos espacios del SCPS.
 - KPI-G1-3: El modelado heterogéneo de sistemas SCPS puede dar lugar a, al menos, dos publicaciones en congresos internacionales y posiblemente un artículo en revista internacional.
- G2. *Modelado de las personas.*
 - KPI-G2-1: Reducción por encima del 30% en el esfuerzo requerido para la especificación de atributos humanos rol/tarea, respecto al estado de la práctica.
 - KPI-G2-2: Modelado de atributos humanos que permitan el descubrimiento de al menos dos tipos de fallos latentes (por ejemplo, en interacción persona-software) que se den en la práctica en los casos de estudio planteados.
 - KPI-G2-3: El modelado de las personas puede dar lugar, al menos, a una publicación en congreso internacional y un artículo en revista internacional.
- G3. *Análisis composicional y síntesis de planes bajo incertidumbre.*
 - KPI-G3-1: Reducción del coste computacional por encima del 30% del análisis composicional de propiedades con respecto al estado de la práctica.
 - KPI-G3-2: Incremento de la efectividad por encima del 30% en el cumplimiento los objetivos del sistema respecto al estado de la práctica en la síntesis de planes bajo incertidumbre (respecto a propuestas que no incorporan el espacio humano del SCPS, incluyendo requisitos SLEEC).
 - KPI-G3-3: Aceptación más alta por parte de los coordinadores médicos (incremento por encima del 30%) de los planes generados por las técnicas de síntesis propuestas, respecto al estado de la práctica.
 - KPI-G3-4: Este objetivo puede dar lugar a 2-3 publicaciones en congresos internacionales y 1-2 en revistas internacionales.
- G4. *Autoadaptación.*
 - KPI-G4-1: Reducción por encima del 30% en el tiempo requerido para adaptar el sistema a un nuevo plan de actuación cuando se produzcan cambios significativos en el contexto de ejecución (por ejemplo, una complicación en la respuesta del paciente, un corte de una carretera cercana al domicilio, un fallo en servidores del software de gestión).
 - KPI-G4-2: Adaptación satisfactoria a cambios en el contexto de ejecución (con una degradación mínima en el mantenimiento de los objetivos del sistema) al menos en un 25% más de ocasiones respecto al estado actual de la práctica.

- KPI-G4-3: Este objetivo puede dar lugar a 2-3 publicaciones en congresos internacionales y al menos una publicación en revistas internacionales.

2.3 Descripción detallada de la metodología propuesta

Como veremos en la sección II.2.6, el proyecto se organiza en 6 paquetes de trabajo (WP). El proyecto seguirá un enfoque iterativo e incremental, en el que los WP se solapan entre sí para permitir la retroalimentación y la adaptación a la evolución del proyecto y al estado del arte. Las iteraciones tendrán distinta duración en función de su complejidad. Internamente, cada una de las tareas implementará iteraciones más cortas, en *sprints*, de una o dos semanas dependiendo de la tarea. Se asignará un conjunto de requisitos a la iteración siguiendo un enfoque orientado al riesgo. Cada iteración tendrá las siguientes fases:

- *Análisis de riesgos y selección de requisitos.* Antes de comenzar cada iteración, se analizará el alcance del proyecto para seleccionar aquellas áreas de trabajo en las que se debe poner el foco en esa iteración.
- *Planificación de la iteración.* Se desarrollará un plan de trabajo detallado para la duración de la iteración, incluyendo sólo aquellas áreas de trabajo que puedan ser desarrolladas durante dicho periodo.
- *Desarrollo.* Durante esta fase se seguirá un ciclo convencional de análisis-diseño-implementación. En las primeras iteraciones, las fases de análisis y diseño tendrán mayor importancia, ya que los desarrollos estarán orientados a aclarar requisitos y a construir los diferentes componentes.
- *Validación.* Al final de cada iteración se llevará a cabo una fase de validación. Las actividades de validación se desarrollarán en paralelo al desarrollo, de forma que los posibles problemas puedan descubrirse lo antes posible.

Validaremos nuestras contribuciones a lo largo del proyecto utilizando dos casos de estudio (véase sección II.1.1), ambos en el ámbito sanitario, que guiarán el desarrollo de técnicas y herramientas. En lo que respecta a la metodología, seguiremos un proceso iterativo que utilizará retroalimentación periódica de las tareas dentro de los WP y entre ellos, lo que permitirá revisar las soluciones lo antes posible (si fuera necesario). Todos los modelos y técnicas se desarrollarán sin suposiciones sobre el contexto y el dominio en el que se utilizarán, de modo que, aunque se probarán en casos de estudio específicos, todos los desarrollos serán tan generales como sea posible.

Las soluciones desarrolladas en el proyecto se pondrán en práctica mediante el desarrollo de prototipos de acceso abierto disponibles en el sitio web del proyecto y en repositorios *git* públicos. La integración de las distintas herramientas se garantizará mediante un modelado común de los elementos (procesos, tareas y eventos) manipulados en el proyecto, y un repositorio común para la integración continua del software. Se proporcionará una plataforma para la experimentación y herramientas de despliegue. Está previsto hacer públicos todos los datos utilizados y recopilados durante el proyecto.

2.4 Plan de contingencia

El desarrollo del proyecto seguirá una metodología orientada al riesgo siempre que sea posible. Así, las actividades más críticas se han planificado en las fases iniciales del proceso, de forma que puedan tomarse las medidas adecuadas lo antes posible si se detectan problemas. En cualquier caso, se han identificado los siguientes problemas como riesgos principales:

- (i) *La rápida evolución de las tecnologías subyacentes.* Los CPS en general, y los SCPS en particular, evolucionan rápidamente. Es probable que en los próximos años surjan nuevos sistemas, estándares y herramientas que pueden afectar a las metodologías y herramientas desarrolladas en este proyecto. La implicación de algunos de los miembros del equipo del proyecto en organizaciones internacionales de normalización y la estrecha relación del grupo con industrias líderes en el área tratarán de minimizar estos efectos.
- (ii) *Dificultades para encontrar candidatos adecuados para los contratos de personal.* El papel de los contratados en el desarrollo del proyecto es fundamental, pues se prevé desarrollar herramientas con una fuerte carga de desarrollo y experimentación. Aunque parte del desarrollo pudiera ser asumido por alguno de los miembros del equipo de investigación, los objetivos relacionados con el desarrollo de herramientas y su puesta en práctica tendrían que ser drásticamente reducidos si no se pudiera contratar al personal necesario. En cualquier caso, los puestos se ofertarán con la mayor difusión posible, y la oferta se realizará de forma que resulte lo más atractiva posible. Afortunadamente el equipo de investigación cuenta con un amplio número de estudiantes en su ámbito de influencia, y esperamos tener suficientes candidatos, si no fuera de nuestro grupo más cercano, sí entre recién egresados o alumnos de últimos cursos o alumnos de máster.
- (iii) *Incapacidad para definir modelos que representen los distintos espacios del SCPS.* El proyecto incorpora investigación teórica de vanguardia, cuyo éxito absoluto no se puede predecir. Aunque creemos firmemente que es totalmente factible encontrar lenguajes y modelos abstractos para el tipo de conceptos y mecanismos que queremos expresar, la naturaleza intrínseca de los objetivos de investigación hace imposible asegurar que dichos lenguajes y modelos puedan encontrarse en el contexto del proyecto. Si esto sucede, los resultados del proyecto se informarán adecuadamente a la comunidad científica para que la comunidad pueda beneficiarse del proyecto. Con el fin de reducir el riesgo, intentaremos reutilizar y adaptar los modelos existentes en los dominios relacionados (véase, p.ej., [ES11, CGM17, CMG15]), tratando de evitar la creación de especificaciones completamente nuevas desde cero.
- (iv) *Escalabilidad de las técnicas de análisis y síntesis propuestas a escenarios reales.* Aunque las herramientas de análisis y síntesis que planeamos usar para cimentar nuestra propuesta están probadas en múltiples casos de estudio, existe un riesgo de escalabilidad asociado a la complejidad y número de tareas, así como de componentes involucrados en los casos de uso a los que van a ser aplicadas. En ese sentido, el coste computacional más alto de todas las tecnologías que planteamos usar está en el *model checking* probabilístico [KNP07]. Para mitigar este riesgo, consideraremos la posibilidad de sustituir el *model checking* probabilístico por el *model checking* estadístico [LDB10]

(funcionalmente equivalente aunque algo menos preciso, pero mucho menos costoso computacionalmente al estar basado en simulaciones estilo *Monte Carlo*). Por otro lado, las herramientas de síntesis que planteamos usar están basadas en algoritmos genéticos [STC24], lo que hace que el riesgo de escalabilidad en este aspecto sea bajo.

- (v) *Dificultad en la sensorización necesaria para la monitorización del sistema en tiempo de ejecución.* Recopilar información en tiempo real del sistema para su auto-adaptación puede requerir instalar sensores en vehículos e incorporar *wearables* en los actores involucrados en las tareas que no siempre pueden estar dispuestos a utilizarlos, instrumentalizar software existente que puede ser de difícil modificación, etc. Estos riesgos serán mitigados mediante la incorporación de mecanismos de redundancia en la monitorización que permitirán obtener la información necesaria por distintas vías alternativas.

2.5 Materiales, infraestructuras, y equipamientos singulares disponibles para la ejecución del proyecto

El grupo cuenta con un laboratorio de investigación en las instalaciones de la ETSI Informática de la Universidad de Málaga, y otro laboratorio en las instalaciones del instituto de software ITIS. Estos laboratorios servirían perfectamente para acoger al nuevo personal que solicitamos en esta propuesta (2 contratos). La mayor parte del material necesario en este proyecto ya existe, procedente de proyectos anteriores y en curso. ITIS Software dispone de servidores e infraestructuras computacionales suficientes. No consideramos necesario ningún equipamiento singular. Sin embargo, para llevar a cabo las tareas propuestas necesitaremos adquirir el nuevo hardware fungible, principalmente varios ordenadores, tablets y material de sensorización.

2.6 Cronograma de las fases e hitos previstos

El plan propuesto tiene una duración de 3 años. El gráfico de la figura 2 muestra la planificación prevista para WPs y tareas, así como las iniciales de los participantes en el proyecto que trabajarán en cada una de ellas:

- IP se refiere al proponente (Javier Cámara, investigador principal)
- IT1-IT5 se refiere a miembros del equipo investigador de ITIS
- IB1 e IB2 se refiere a miembros del equipo investigador de IBIMA
- C1 y C2 se refieren a las dos personas contratadas.

A continuación, describimos cada uno de los paquetes de trabajo del plan.

		Año 1												Año 2												Año 3														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
WP0. Gestión del proyecto	IP																																							
	IP																																							
	IP																																							
	all																																							
WP1. Métodos de modelado de SCPS	IT3																																							
	IT1, IT2, IT3																																							
	IT1, IT3, IT5																																							
T1.3. Instanciación del marco de trabajo con los casos de estudio	IB1, IB2, IT5, C1																																							
WP2. Métodos de modelado de personas en SCPS	IT1																																							
	IT2, IT3, C1																																							
	IT2, IT3, IT5																																							
	IP, IT1, IT4																																							
T2.4. Modelos OWC para los casos de estudio	IT2, IB1, IB2, C2																																							
WP3. Métodos de composición de análisis y síntesis de planes	IP, IT3																																							
	IP, IT3, IT1, IT5, IB2, C1																																							
	IT1, IT3, IT4, IT5, C1, C2																																							
	IP, IT1, IT2, IT5, C1, C2																																							
	IT1, IT2, IB1, IB2, IT5, C1, C2																																							
WP4. Desarrollo de métodos de auto-adaptación anticipatoria	IP																																							
	IT1, IT5, C1																																							
	IT1, IT4, IT5, C1																																							
	IT1, IT2, IB2, IT4, C1, C2																																							
WP5. Difusión y explotación	IP, IT3																																							
	IP, all																																							
	IT3, all																																							
	IT3, all																																							

Figura 2: Cronograma de la propuesta.

WP0: Gestión del proyecto

Objetivos: Este WP es responsable de coordinar los esfuerzos de los investigadores durante la ejecución del proyecto, asegurando el progreso adecuado del plan de trabajo para alcanzar de forma satisfactoria los hitos planteados y generar los entregables en tiempo y forma. El seguimiento periódico del avance de cada tarea del paquete de trabajo hacia los objetivos se llevará a cabo en el contexto de este paquete de trabajo. También pertenecen a este paquete la evaluación de riesgos y de la calidad, así como la preparación de los informes intermedios y finales del proyecto.

Tareas:

T0.1. Coordinación del proyecto. Esta tarea abarca las cuestiones administrativas.

T0.2. Gestión del proyecto. Esta tarea se ocupa de cuestiones como asegurar la comunicación entre las distintas tareas y WPs, observar los procesos de gestión de la calidad y los plazos.

T0.3. Seguimiento del progreso del proyecto y gestión de riesgos. Esta tarea se dedicará a asegurar que el proyecto progresa adecuadamente, siguiendo la metodología establecida, y aplicando medidas correctoras en el caso de cuestiones no contempladas en el plan del proyecto. Esta tarea establecerá métodos de revisión interna, creará y mantendrá un plan de calidad que definirá los procedimientos de control de calidad.

Líder del WP: IP

Participantes: Todos los miembros

Resultados:

D0.1. Informe provisional de actividades (M12)

D0.2. Segundo informe provisional de actividades (M24)

D0.3. Informe final de actividad y gestión del proyecto (M36)

WP1: Desarrollo de métodos de modelado de espacios SCPS, dependencias e interacciones

Objetivos: El objetivo de este paquete de trabajo es obtener métodos para la descripción del SCPS y su entorno como modelos híbridos que integren la descripción de: (i) la estructura del sistema, modelando las relaciones entre espacios físico, ciber, y humano (por ejemplo, topología de la red de carreteras, relaciones de colaboración entre miembros de la organización, estructura de la red de comunicaciones), y (ii) el comportamiento de los distintos componentes físicos, digitales, y humanos, incluyendo sus propiedades, como procesos estocásticos. Para el desarrollo de los modelos estructurales se adaptará el uso de técnicas basadas en especificación formal de relaciones y restricciones sobre ellas, tales como Alloy [J02], que definen de forma implícita el conjunto de configuraciones estructurales (descritas como grafos) válidas del sistema. Para la especificación del comportamiento de los componentes en los distintos espacios del SCPS (personas, software, físicos), se explorarán los lenguajes utilizados para verificación cuantitativa de sistemas mediante técnicas de *model checking* tanto probabilístico como estadístico [KNP07, LDB10], haciendo hincapié en el estándar de facto PRISM [KNP11]. Las relaciones entre los aspectos de los distintos espacios se basarán parcialmente

en la especialización de herramientas desarrolladas previamente por miembros del equipo investigador y que son capaces de aunar especificaciones estructurales basadas en relaciones y restricciones, así como de comportamiento basadas en procesos estocásticos [Cám20, Cám25].

Tareas:

- T1.1. Definición de conceptos fundamentales y análisis de requisitos. Esta tarea se dedicará a definir las características que los modelos de los espacios de los SCPS tienen que exhibir para satisfacer las necesidades de los casos de estudio (Sección II.2).
- T1.2. Construcción del marco de trabajo conceptual para la descripción de espacios físicos, digitales y humanos. Implementación de la arquitectura de referencia e infraestructura básica para satisfacer los requisitos obtenidos en T1.1. Para ello, se planea especializar el marco de referencia y la herramienta descrita en [Cám20, Cám25].
- T1.3. Instanciación del marco de trabajo conceptual para el modelado de los SCPS de los casos de estudio. Esta tarea consistirá en el desarrollo de un prototipo del conjunto de modelos necesarios para modelar los distintos espacios SCPS correspondientes a los casos de estudio.

Líder del WP: IT3

Participantes: IT1, IT2, IT3, IT5, IB1, IB2, C1

Resultados:

- D.1.1 Especificación de requisitos del marco de trabajo conceptual de modelado (M4, M14, M25)
- D.1.2. Prototipo del marco de trabajo conceptual de modelado (M7, M16, M26)
- D.1.3. Prototipo del conjunto de modelos de SCPS para los casos de estudio (M12, M19, M30)

WP2: Desarrollo de métodos de modelado de personas en SCPS

Objetivos: El objetivo de este paquete de trabajo es desarrollar los métodos necesarios para el modelado de personas en el ámbito de los SCPS. Para ello proponemos instanciar el modelo OWC (*Opportunity-Willingness-Capability*) [ES11], modelando a las personas que participan en el sistema con roles análogos a sensores, actuadores, y procesadores de información (ver Figura 1). Cuando desempeñan estos roles, las personas realizan sus tareas con cierto grado de incertidumbre que depende de qué se encuentren haciendo (*opportunity*), su grado de estrés o disposición a realizar una tarea (*willingness*), o grado de formación en la tarea que están realizando (*capability*).

Tareas:

- T.2.1 Análisis de requisitos del modelado de atributos humanos en el dominio de aplicación. El equipo analizará los protocolos de actuación establecidos en el dominio de aplicación de los casos de estudio. Siguiendo experiencias previas del equipo de trabajo en otras especializaciones de OWC [CMG15, CGM17], se identificará primero el conjunto de tareas y objetivos del sistema. A continuación, se identificarán los roles involucrados en la realización de las tareas y, por último, los atributos relevantes de los roles que participan en las tareas, relativos a su impacto potencial en el cumplimiento satisfactorio de los objetivos del sistema.

- T.2.2. Instanciación del modelo OWC. Basándose en los resultados de T2.1, se desarrollará una especificación que determine el contenido y formato necesario para una descripción genérica de los atributos del SCPS en el dominio de aplicación.
- T.2.3. Formalización e integración del modelo OWC (D.2.3) en el conjunto de modelos SCPS (D1.3). En esta tarea, se formalizará el modelo OWC desarrollado en T.2.2, en base a los lenguajes de descripción utilizados en T.1.2. Dicha formalización se integrará en el prototipo de marco de trabajo conceptual de modelado (D.1.2.).
- T2.4. Desarrollo del conjunto de modelos OWC para los casos de estudio.

Líder del WP: IT1

Participantes: IP, IT1, IT2, IT3, IT4, IT5, IB1, IB2, C1, C2

Resultados:

- D.2.1. Especificación de requisitos del modelo de atributos humanos (M6, M22, M27)
- D.2.2. Instancia del modelo OWC en el ámbito SCPS de los casos de estudio (M9, M24)
- D.2.3. Especificación formal del modelo OWC para el SCPS de los casos de estudio (M12, M26)
- D.2.4. Prototipos de modelos OWC para los casos de estudio (M18, M30).

WP3: Desarrollo de métodos de composición de análisis y síntesis de planes para SCPS

Objetivos: El objetivo de este paquete de trabajo es desarrollar métodos de verificación composicional que sean capaces de realizar un análisis combinado de propiedades que abarquen aspectos relativos a los distintos espacios del SCPS. Para ello, se explorarán técnicas composicionales tales como *assume-guarantee* (haciendo énfasis en el análisis cuantitativo) [KNP+10, PBU09], así como la integración directa de otros mecanismos de análisis heterogéneos que permiten el análisis del comportamiento del sistema bajo distintas fuentes de incertidumbre (por ejemplo, de incertidumbre estructural y comportamiento estocástico [Cám20, Cám25, CCG+17]). Además del análisis composicional del SCPS, este paquete de trabajo también estará dedicado a desarrollar métodos de síntesis automática de planes para optimizar la realización de tareas de la forma más adecuada posible respecto a los objetivos del SCPS. Para ello, nos basaremos en técnicas de síntesis automática de planes bajo incertidumbre para sistemas ciberfísicos desarrolladas en trabajos previos del equipo de trabajo [STC24], que necesitarán ser extendidas para los SCPS.

Tareas:

- T.3.1. Análisis de requisitos para la composición de técnicas de análisis y síntesis de planes correspondientes a los distintos espacios del SCPS. En esta tarea se identificarán el tipo de propiedades a analizar en sistemas SCPS en base a los objetivos de estos, así como los requisitos para su análisis.
- T.3.2. Desarrollo de prototipo de marco de trabajo de análisis composicional para SCPS bajo incertidumbre. En esta tarea desarrollaremos un marco de trabajo de análisis composicional para las clases de propiedades identificadas en T.3.1, partiendo de la base de herramientas de análisis como las descritas en [Cám20, Cám25], que será especializado para SCPS.

- T.3.3 Desarrollo de prototipo de marco de trabajo de síntesis de planes bajo incertidumbre para SCPS. Se implementará un prototipo de marco de trabajo de síntesis de planes, partiendo de los algoritmos y el prototipo descrito en [STC24], que incorpora algoritmos genéticos para generar planes capaces de mantener los objetivos del sistema, pese a niveles prescritos de incertidumbre en el entorno de ejecución de un sistema ciberfísico. Para ello, será necesario extender los algoritmos para tener en cuenta los factores relativos a las personas involucradas en el SCPS ([STC24] sólo considera factores físicos y del software por el momento).
- T3.4. Desarrollo de prototipos de herramientas de análisis composicional y síntesis de planes en los casos de estudio. Basándonos en los marcos de trabajo desarrollados en T3.2 y T.3.3, desarrollaremos prototipos de herramientas para el análisis composicional, y la síntesis de planes bajo incertidumbre para los casos de estudio.

Líder del WP: IP, IT3

Participantes: IP, IT1, IT2, IT3, IT4, IT5, IB1, IB2, C1, C2

Resultados:

- D.3.1. Especificación de requisitos de herramientas de análisis composicional y síntesis de planes (M8, M18, M27)
- D.3.2. Prototipo de marco de trabajo de análisis composicional para SCPS (M12, M24, M30)
- D.3.3. Prototipo de marco de trabajo de síntesis de planes para SCPS (M12, M24, M30)
- D.3.4. Prototipo de herramienta de análisis composicional para casos de estudio (M9, M18, M36)
- D.3.5. Prototipo de herramienta de síntesis de planes para casos de estudio (M9, M18, M36)

WP4: Desarrollo de métodos de auto-adaptación anticipatoria para SCPS

Objetivos: Este paquete está orientado a desarrollar métodos de auto-adaptación para SCPS para hacer frente a los cambios en su contexto operacional en tiempo de ejecución. Esto permitirá aumentar la resiliencia del sistema y mantener sus objetivos [AGK19, CMP20]. Para ello, nos basaremos en propuestas existentes de auto-adaptación que consideran de forma explícita la latencia (o el tiempo de adaptación) para optimizar el tiempo de respuesta y el rendimiento del sistema (proporcionando también la posibilidad de adaptación *proactiva* o *anticipatoria* a situaciones que puedan requerir adaptación) [MCG+18], así como en las que involucran componentes humanos [CGM17, CMG15]. Para conseguir la adaptación satisfactoria que mantenga los objetivos del SCPS, proponemos combinar ambos tipos de propuesta a fin de conseguir mecanismos de auto-adaptación en el ámbito de los SCPS que permitan optimizar el tiempo de respuesta y anticiparse a situaciones que requieran respuesta urgente. El determinar la mejor forma de adaptar el sistema en tiempo de ejecución requerirá hacer uso de las técnicas de síntesis de planes desarrolladas en D3.3, e instanciadas en D3.5.

Tareas:

- T.4.1. Análisis de requisitos de adaptación en SCPS del dominio de aplicación. Esta tarea determinará las necesidades de adaptación de los sistemas SCPS (posibles cambios relevantes en el contexto de operación del sistema, fuentes de incertidumbre).

T.4.2. Desarrollo de mecanismos de adaptación anticipatoria en SCPS. Esta tarea implicará la extensión de técnicas de adaptación proactiva o anticipatoria basadas en PLA [MCG+18] con elementos relacionados con el espacio humano de los SCPS. Para ello, se utilizarán como referencia propuestas de autoadaptación (no anticipatoria) que incorporan modelos OWC [CGM17, CMG15] y será necesario integrar PLA con las técnicas de análisis composicional y síntesis de planes desarrolladas en el WP3.

T.4.3. Instanciación de mecanismos de adaptación en los casos de estudio.

Líder del WP: IP

Participantes: IT1, IT2, IT4, IT5, IB1, IB2, C1, C2

Resultados:

D.4.1. Especificación de requisitos de adaptación en SCPS (M8, M20)

D.4.2. Prototipo de marco de trabajo para adaptación anticipatoria en SCPS (M12, M26)

D.4.3. Prototipo de mecanismos de adaptación anticipatoria para los casos de estudio (M18, M36)

WP5: Difusión y explotación

Objetivos: Aunque se trata de un proyecto fundamentalmente aplicado, esperamos obtener resultados generales extrapolables a distintos ámbitos. Además de un impacto directo en el funcionamiento de los centros sanitarios colaboradores, esperamos que las técnicas sean suficientemente generales y aplicables, no sólo a otras unidades asistenciales hospitalarias, sino también a otros dominios, como las ciudades inteligentes, entornos industriales, agricultura, etc. El proyecto seguirá políticas de acceso abierto para todos los artefactos, resultados y publicaciones producidos.

Tareas:

T5.1. Difusión académica: La forma básica de difusión académica será a través de artículos de alta calidad en revistas y conferencias. Los miembros del grupo del proyecto tienen un historial previo de publicaciones de primera categoría. También tenemos previsto organizar y participar en talleres y reuniones de trabajo internacionales sobre los temas del proyecto, aprovechando la relación de este proyecto con otros proyectos e iniciativas en los que también participa nuestro grupo. Estos eventos nos permitirán no sólo difundir los resultados del proyecto, sino también recopilar e integrar información de fuentes externas. Los principales logros del proyecto y su progreso se documentarán en una página web dedicada al proyecto.

T5.2. Explotación y relación con la industria: Esta tarea se dedicará a hacer visibles a la industria los resultados del proyecto. Los sistemas SCPS se presentan en ámbitos muy diversos, y hay aplicaciones interesantes en ciudades inteligentes, industria avanzada, agricultura y otros. Por la orientación del proyecto nuestro objetivo principal estará centrado en el ámbito sanitario: 061, hospitales y otras instituciones socio-sanitarias.

T5.3. Actividades de estandarización. Es importante que los esfuerzos y resultados del proyecto se ajusten plenamente a las normas internacionales existentes y futuras, y también que nuestros resultados y conclusiones puedan influir y contribuir a nuevas normas o a la

revisión de las existentes. La participación y asistencia a reuniones y foros de normalización forman parte de nuestro plan de difusión.

Líder del WP: IP

Participantes: Todos los miembros

Resultados:

D5.1. Página web del proyecto (M3)

D5.2. Informe intermedio de explotación (M18)

D5.3. Informe final de explotación (M36)

3. Impacto esperado de los resultados

3.1 Impacto científico-técnico

A nivel científico y técnico, prevemos que los resultados de este proyecto tendrán un amplio impacto en la organización sanitaria y en la ingeniería de software. En el contexto asistencial creemos que las técnicas de modelización, análisis y síntesis de planes y adaptación permitirán una mejora en la organización y respuesta de los sistemas considerados. En el contexto de la ingeniería del software, mostrando cómo la combinación de distintas técnicas de modelado, síntesis, y análisis de sistemas (solución de restricciones, *model checking* probabilístico y estadístico) con un modelo OWC puede aumentar el conjunto de herramientas disponibles para abordar la verificación de aspectos de corrección en sistemas SCPS cada vez más complejos que involucran personas en roles clave para el cumplimiento de los objetivos del sistema, y que operan en condiciones incertidumbre. Tal combinación de técnicas ha sido en gran medida inexplorada, aunque creemos que tiene un potencial de impacto significativo. La capacidad de sintetizar y verificar sistemáticamente planes alternativos y diseños de planes de actuación bajo incertidumbre a gran escala puede tener un impacto significativo y de gran alcance en la calidad de los sistemas socio-ciber-físicos en los que confiamos cada vez más. Además, nuestros resultados tienen el potencial de ser utilizados como un modelo para diseñar sistemas SCPS que puedan contribuir a otras áreas que van más allá del dominio de aplicación de la atención médica domiciliaria y de urgencias, tales como la sostenibilidad, la gestión de crisis o desastres naturales, y la seguridad pública, entre otros.

3.2 Impacto social y económico

En cuanto al impacto social y económico de nuestra propuesta, esta investigación tiene el potencial de sentar las bases para proporcionar a los responsables de la toma de decisiones en posiciones de responsabilidad (coordinadores de urgencias, fuerzas de seguridad del estado) las herramientas necesarias para tomar decisiones informadas en su rutina diaria que aumenten la eficiencia y minimicen los riesgos en el desempeño de sus funciones, dentro del marco de los protocolos de actuación establecidos. Aunque en el caso que nos ocupa, estos protocolos se encuadran en las labores asistenciales dentro del entorno sanitario, los resultados de nuestra propuesta podrán ser adaptados e instanciados en otros ámbitos que involucren toma de

decisiones en sistemas SCPS que coordinen personas, software y elementos físicos en la realización de tareas estructuradas mediante protocolos de actuación.

En particular, planeamos enmarcar nuestras dos instancias de prueba de concepto correspondientes a los casos de estudio descritos en la Sección II.1.1, en el ámbito concreto de las Urgencias del Hospital Regional Universitario de Málaga, supervisada actualmente por uno de los miembros del equipo de IBIMA.

3.3 Plan de comunicación y divulgación de los resultados del proyecto

Para difundir los beneficios y buenas prácticas derivadas de este proyecto, utilizaremos una estrategia que tendrá en cuenta diversos canales de comunicación destinados a involucrar a la comunidad académica, sanitaria, y a la sociedad en general. Concretamente, nos centraremos en: (i) Publicaciones científicas en revistas indexadas (JCR) tanto en áreas de la salud como en informática, y conferencias en ranking internacionales (ICORE), (ii) Eventos presenciales y virtuales que incluirán seminarios y webinars, así como un workshop que involucre tanto a académicos como a profesionales del ámbito de la atención médica y otros dominios afines, y (iii) Notas de prensa y publicaciones en redes sociales (Twitter/X, LinkedIn, YouTube) que mantengan informado al público en general sobre los avances del proyecto.

4. Justificación del presupuesto solicitado

La siguiente tabla resume el presupuesto de la propuesta.

		<i>Descripción</i>	<i>Coste imputable</i>
<i>Gastos de personal</i>	<i>Licenciado, Ingeniero, Arquitecto o Graduado</i>	<i>36 meses de contratación de graduado o equivalente</i>	<i>93,904.53 €</i>
	<i>Licenciado, Ingeniero, Arquitecto o Graduado</i>	<i>18 meses de contratación de graduado o equivalente</i>	<i>46,952.27 €</i>
<i>Gastos de ejecución</i>	<i>Viajes y dietas</i>	<i>Asistencia a seminarios, conferencias y reuniones. Estancias cortas.</i>	<i>49.780,50 €</i>
	<i>Otros gastos</i>	<i>Informe de auditoría</i>	<i>1.500,00 €</i>
		<i>Inscripciones a congresos</i>	<i>22.200,00 €</i>
		<i>Organización de reunión de difusión con responsables de entidades sanitarias de Andalucía (salas de reuniones, medios audiovisuales, catering...)</i>	<i>5.000,00€</i>
	<i>Adquisición de inventariable</i>	<i>Ordenadores de sobremesa</i>	<i>3.000,00 €</i>
		<i>Ordenadores portátiles</i>	<i>4.000,00 €</i>
	<i>Fungible y similares</i>	<i>Material fungible</i>	<i>2.500,00 €</i>
			<i>228.837,30 €</i>

La partida más importante del presupuesto solicitado está dedicada a la contratación de personal (93,904.53€ y 46,952.27€). En concreto, consideramos necesaria la contratación de dos graduados en informática o ingeniería del software (o título equivalente, ingeniero en informática, licenciado en informática, etc.). El hecho de que el proyecto requiera el desarrollo de herramientas implica grandes esfuerzos de programación, desarrollo, integración y depuración, que son para los que solicitamos personal. En concreto,

solicitamos fondos para la contratación de una persona durante toda la duración del proyecto, con idea de que participe en tareas de los paquetes WP1-4, incluidas su participación en la instanciación del marco de trabajo con los casos de uso (T1.3), el análisis de requisitos del modelado de atributos humanos (T2.1), todas las tareas de los paquetes WP3 y WP4, donde se incluye el desarrollo de herramientas para el análisis composicional y la síntesis de planes, todas ellas con una fuerte carga en desarrollo de herramientas y su aplicación en los casos de estudio. Igualmente, el contratado 2 tendrá una fuerte participación en las tareas de desarrollo y aplicación de los resultados a los casos de estudio, aunque en este caso en tareas de apoyo durante los periodos de mayor intensidad. Es por esto por lo que se considera que 18 meses de contratación puede ser suficiente.

La segunda partida de mayor cuantía es la dedicada a asistencia a seminarios, conferencias y reuniones de carácter científico, y estancias de investigación relacionadas con el proyecto. Hemos dividido esta partida en la dedicada a viajes y dietas (49.780,50€) y las inscripciones a congresos (22.200,00€). En este apartado consideramos 5 viajes por año dentro de España para asistencias a congresos y seminarios y 7 viajes por año para difusión de resultados en congresos y reuniones internacionales. Aunque es imposible en este momento conocer exactamente el lugar de celebración de estos congresos, nuestra intención es continuar asistiendo a los congresos a los que venimos acudiendo asiduamente (SEAMS, ICSOC, ETAPS, MODELS...), y hemos estimado que, de los 21 viajes, 11 serían a algún país europeo (hemos tomado Reino Unido como referencia) y 10 como extraeuropeo (hemos tomado Estados Unidos como referencia, con costes similares a Japón, Corea y otros países habituales). Estos viajes son necesarios para presentar los resultados del proyecto, hacer difusión en congresos nacionales e internacionales y publicar en ellos. Además, consideramos 6 estancias cortas (hasta 2 semanas) del personal adscrito al proyecto en otros laboratorios y grupos de investigación para realizar tareas relacionadas con el mismo, durante la duración del proyecto. Actualmente mantenemos relaciones muy estrechas con diversos grupos internacionales, y queremos aprovechar nuestras relaciones para visitar sus grupos y continuar trabajando con ellos en temas relacionados con el proyecto. Hemos presupuestado 3 viajes a Reino Unido y otros 3 a Estados Unidos, donde están localizados nuestros colaboradores habituales (por ejemplo, D. Garlan en Estados Unidos y R. Calinescu y en Reino Unido).

La propuesta se plantea como una colaboración de investigadores de IBIMA-Bionand e ITIS Software con una amplia experiencia y conocimiento de las necesidades de los servicios implicados y de las posibilidades de mejora, fundamentalmente en los casos de estudio planteados en la propuesta. Creemos que los resultados que se obtengan del proyecto serán de interés no sólo para las entidades y hospitales en la que estos investigadores desarrollan su actividad, sino que creemos que los resultados serán de interés para otros hospitales e instituciones sanitarias. Es por ello por lo que consideramos prioritario habilitar mecanismos de difusión de nuestros resultados. Entre estos mecanismos de difusión planeamos organizar una reunión con responsables de entidades sanitarias de Andalucía, para lo que hemos presupuestado una cantidad de 5.000€, que se dedicarán principalmente al alquiler de salas de reuniones y medios audiovisuales, contratación de catering y otras cuestiones relacionadas.

En cuanto al material inventariable solicitamos presupuesto para dos ordenadores de sobremesa (para las dos personas contratadas) y otros dos para portátiles, para posibilitar la movilidad de algunos de los investigadores participantes en la propuesta.

Como se ha descrito en la memoria, la comunicación de las unidades desplazadas con los centros de control se realiza utilizando tablets, y es necesario la sensorización y preparación adecuada de los dispositivos. Aunque tanto en ITIS Software como en IBIMA-Bionand disponemos de un amplio material a nuestra disposición, hemos incluido en el presupuesto 2.500€ para la adquisición del material imprescindible del que no disponemos.

Por último, se incluye una partida de 1.500€ para el informe de auditoría, que deberá aportarse en la justificación económica final.

REFERENCIAS

- [AGK19] J. Aldrich, D. Garlan, C. Kästner, C. Le Goues, A. Mohseni-Kabir, I. Ruchkin, S. Samuel, B. R. Schmerl, C. S. Timperley, M. Veloso, I. Voysey, J. Biswas, A. Guha, J. Holtz, **J. Cámara**, and P. Jamshidi, “Model-based adaptation for robotics software,” *IEEE Software* 36(2):83–90, 2019. DOI: [10.1109/MS.2018.2885058](https://doi.org/10.1109/MS.2018.2885058)
- [BDT21] K. Bellman, A. Diaconescu, S. Tomforde, Special issue on “self-improving self integration”, *Future Generation Computer Systems* 119:136-139, 2021 DOI: 10.1016/j.future.2021.02.010.
- [Cám20] **J. Cámara**: “HaiQ: Synthesis of Software Design Spaces with Structural and Probabilistic Guarantees.” *FormaliSE@ICSE 2020*: 22-33
- [Cám25] **J. Cámara**: “Exploring the interaction of design variability and stochastic operational uncertainties in software-intensive systems through the lens of modeling”. *Softw. Syst. Model.* 24(3): 629-650, 2025.
- [CB25] **J. Cámara**, L. Burgueño, “Towards First-Class Human Involvement in Digital Twin-Enabled Socio-Cyber-Physical Systems”. *International Workshop on Digital Twin-enabled Autonomous Systems and Agents (DAT'25). Tokyo, Japan, September 29 2025*.
- [CC+14] **J. Cámara**, P. Correia, R. de Lemos, and M. Vieira, “Empirical resilience evaluation of an architecture-based self-adaptive software system,” in *QoSA'14, Proceedings of the 10th International ACM SIGSOFT Conference on Quality of Software Architectures (part of CompArch 2014), Marcq-en-Baroeul, Lille, France, June 30 - July 04, 2014*, 2014, pp. 63–72. doi: 10.1145/2602576.2602577.
- [CCG+17] R. Calinescu, M. Ceska, S. Gerasimou, M. Kwiatkowska, and N. Paoletti. “Designing robust software systems through parametric markov chain synthesis”. In *Proc. of ICSE'17*, pages 131–140. IEEE Computer Society, 2017.
- [CCP19] R. Calinescu, **J. Cámara**, C. Paterson: “Socio-cyber-physical systems: models, opportunities, open challenges”, in *SEsCPS@ICSE 2019*: 2-6, DOI: <https://doi.org/10.1109/SEsCPS.2019.00008>
- [CG+12] R. Calinescu, C. Ghezzi, M. Kwiatkowska, and R. Mirandola, “Self-Adaptive Software Needs Quantitative Verification at Runtime,” *Commun. ACM*, vol. 55, no. 9, pp. 69–77, Sep. 2012, doi: 10.1145/2330667.2330686.
- [CGM17] **J. Cámara**, D. Garlan, G.A. Moreno, B. Schmerl. “Evaluating trade-offs of human involvement in self-adaptive systems”. In *Managing Trade-Offs in Adaptable Software Architectures*, 2017: 155-180. Morgan Kaufmann.
- [CGS17] **J. Cámara**, D. Garlan, and B. R. Schmerl, “Synthesis and Quantitative Verification of Tradeoff Spaces for Families of Software Systems,” in *Software Architecture - 11th European Conference, ECSA 2017, Canterbury, UK, September 11-15, 2017, Proceedings*, 2017, vol. 10475, pp. 3–21.

- [CGS19] **J. Cámara**, D. Garlan, and B. R. Schmerl, “Synthesizing tradeoff spaces with quantitative guarantees for families of software systems,” *J. Syst. Softw.*, vol. 152, pp. 33–49, 2019, doi: 10.1016/j.jss.2019.02.055.
- [CMG15] **J. Cámara**, G. A. Moreno, D. Garlan: Reasoning about Human Participation in Self-Adaptive Systems. SEAMS@ICSE 2015: 146-156
- [CL+13] **J. Cámara**, R. de Lemos, M. Vieira, R. Almeida, and R. Ventura, “Architecture-based resilience evaluation for self-adaptive systems,” *Computing*, vol. 95, no. 8, pp. 689–722, 2013, doi: 10.1007/s00607-013-0311-7.
- [CL+16] **J. Cámara et al.**, “Incorporating architecture-based self-adaptation into an adaptive industrial software system,” *J. Syst. Softw.*, vol. 122, pp. 507–523, 2016, doi: 10.1016/j.jss.2015.09.021.
- [CL+16b] **J. Cámara**, A. Lopes, D. Garlan, and B. R. Schmerl, “Adaptation impact and environment models for architecture-based self-adaptive systems,” *Sci. Comput. Program.*, vol. 127, pp. 50–75, 2016, doi: 10.1016/j.scico.2015.12.006.
- [CL+17] **J. Cámara**, R. de Lemos, N. Laranjeiro, R. Ventura, and M. Vieira, “Robustness-Driven Resilience Evaluation of Self-Adaptive Software Systems,” *IEEE Trans. Dependable Secur. Comput.*, vol. 14, no. 1, pp. 50–64, 2017, doi: 10.1109/TDSC.2015.2429128.
- [CM+16] **J. Cámara**, G. A. Moreno, D. Garlan, and B. R. Schmerl, “Analyzing Latency-Aware Self-Adaptation Using Stochastic Games and Simulations,” *ACM Trans. Auton. Adapt. Syst.*, vol. 10, no. 4, pp. 23:1–23:28, 2016, doi: 10.1145/2774222.
- [CMP20] R. Calinescu, R. Mirandola, D. Perez-Palacin, and D. Weyns, "Understanding Uncertainty in Self-adaptive Systems," In ACSOS 2020, pp. 242-251, DOI: [10.1109/ACSOS49614.2020.00047](https://doi.org/10.1109/ACSOS49614.2020.00047).
- [CP+16] **J. Cámara**, W. Peng, D. Garlan, and B. R. Schmerl, “Reasoning about sensing uncertainty and its reduction in decision-making for self-adaptation,” *Sci. Comput. Program.*, vol. 167, pp. 51–69, 2018, doi: 10.1016/j.scico.2018.07.002.
- [CS+18] **J. Cámara**, B. R. Schmerl, G. A. Moreno, and D. Garlan, “MOSAICO: offline synthesis of adaptation strategy repertoires with flexible trade-offs,” *Autom. Softw. Eng.*, vol. 25, no. 3, pp. 595–626, 2018, doi: 10.1007/s10515-018-0234-9.
- [CTV22] **J. Cámara**, J. Troya, A. Vallecillo, N. Bencomo, R. Calinescu, B. Cheng, D. Garlan, and B. Schmerl. 2022. The uncertainty interaction problem in self-adaptive systems. *Softw. Syst. Model.* 21(4): 1277–1294, 2022. DOI: [10.1007/s10270-022-01037-6](https://doi.org/10.1007/s10270-022-01037-6)
- [CW+23] **J. Cámara**, R. Wohlrab, D. Garlan, B. Schmerl: “ExTrA: Explaining architectural design tradeoff spaces via dimensionality reduction”. *J. Syst. Softw.* 198: 111578. 2023.

- [CW+24] **J. Cámara**, R. Wohlrab, D. Garlan, B. Schmerl: “Focusing on What Matters: Explaining Quality Tradeoffs in Software-Intensive Systems Via Dimensionality Reduction.” *IEEE Softw.* 41(1): 64-73 (2024)
- [CDE+07] M. Clavel, F. Durán, S. Eker, P. Lincoln, N. Martí-Oliet, J. Meseguer, C. L. Talcott: *All About Maude - A High-Performance Logical Framework, How to Specify, Program and Verify Systems in Rewriting Logic. Lecture Notes in Computer Science 4350*, Springer 2007.
- [DM12] F. Durán, J. Meseguer: On the Church-Rosser and coherence properties of conditional order-sorted rewrite theories. *J. Log. Algebraic Methods Program.* 81(7-8): 816-850 (2012)
- [DMR20] F. Durán, J. Meseguer, C. Rocha: Ground confluence of order-sorted conditional specifications modulo axioms. *J. Log. Algebraic Methods Program.* 111: 100513 (2020)
- [ES11] D. Eskins and W. H. Sanders. The multiple-asymmetric-utility system model: A framework for modeling cyber-human systems. In *Eighth International Conference on Quantitative Evaluation of Systems, QEST 2011, Aachen, Germany, 5-8 September, 2011*, pages 233–242. IEEE Computer Society, 2011
- [GCH04] D. Garlan, S.-W. Cheng, A.-C. Huang, B. Schmerl, P. Steenkiste: *Rainbow: Architecture-Based Self-Adaptation with Reusable Infrastructure*. *Computer* 37(10): 46-54 (2004) DOI: [10.1109/MC.2004.175](https://doi.org/10.1109/MC.2004.175)
- [GAF+20] M. Gil, M. Albert, J. Fons, V. Pelechano: “Engineering human-in-the-loop interactions in cyber-physical systems.” *Inf. Softw. Technol.* 126: 106349 (2020)
- [He10] T. A. Henzinger, “From Boolean to Quantitative Notions of Correctness,” in *Proceedings of the 37th Annual ACM SIGPLAN-SIGACT Symposium on Principles of Programming Languages*, 2010, pp. 157–158. doi: 10.1145/1706299.1706319.
- [Hor12] I. Horvath, Beyond advanced mechatronics: New design challenges of social-cyber-physical systems, in *ACCM*, 2012, pp. 1–20.
- [J02] D. Jackson, “Alloy: a lightweight object modelling notation,” *ACM Trans. Softw. Eng. Methodol.*, vol. 11, no. 2, pp. 256–290, 2002.
- [KNP+10] M. Kwiatkowska, G. Norman, D. Parker, and H. Qu. “Assume-guarantee verification for probabilistic systems.” In *Proc. of TACAS’10*, volume 6015 of LNCS, pages 23–37. Springer, 2010.
- [KNP07] M. Z. Kwiatkowska, G. Norman, and D. Parker, “Stochastic Model Checking,” in *Formal Methods for Performance Evaluation, 7th International School on Formal Methods for the Design of Computer, Communication, and Software Systems, SFM, 2007*, vol. 4486, pp. 220–270.

- [KNP11] M. Z. Kwiatkowska, G. Norman, and D. Parker, “PRISM 4.0: Verification of Probabilistic Real-Time Systems,” in *Computer Aided Verification - 23rd International Conference, CAV, 2011*, vol. 6806, pp. 585–591.
- [LDB10] A. Legay, B. Delahaye, and S. Bensalem “Statistical model checking: An overview. In *International conference on runtime verification*” 2010: 122-135. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [LFW16] P. Larsen, J. Fitzgerald, J. Woodcock, P. Fritzson, J. Brauer, C. Kleijn, T. Lecomte, M. Pfeil, O. Green, S. Basagiannis, A. Sadovykh: Integrated tool chain for model-based design of Cyber-Physical Systems: The INTO-CPS project. *CPS Data* 2016: 1-6
- [LGG+13] R. de Lemos, D. Garlan, C. Ghezzi, et al: “Software Engineering for Self-Adaptive Systems: Research Challenges in the Provision of Assurances”. *Software Engineering for Self-Adaptive Systems* 2013: 3-30
- [LMP08] Lorenzoli, D., Mariani, L., & Pezzè, M. “Automatic generation of software behavioral models”. In *Proceedings of the 30th international conference on Software engineering*, 2008: 501-510
- [LW20] Z. Liu, J. Wang, Human-cyber-physical systems: concepts, challenges, and research opportunities, *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering* 21 (11):1535–1553, 2020. DOI: [10.1631/FITEE.2000537](https://doi.org/10.1631/FITEE.2000537)
- [MCG+18] G. Moreno, **J. Cámara**, D. Garlan, B. Schmerl: “Flexible and Efficient Decision-Making for Proactive Latency-Aware Self-Adaptation.” *ACM Trans. Auton. Adapt. Syst.* 13(1): 3:1-3:36 (2018)
- [MSL13] S. Munir, J. A. Stankovic, C.-J. M. Liang, S. Lin, Cyber physical system challenges for human-in-the-loop control, in *Feedback Computing*, 2013, pp. 363–369. URL: <https://www.usenix.org/conference/feedbackcomputing13/workshop-program/presentation/munir>
- [NZS15] D. Nunes, P. Zhang, J. Silva, A survey on human-in-the-loop applications towards an internet of all, *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 17 (2) (2015) 944–965.
- [PBU09] E. Pavese, V. Braberman, and S. Uchitel. “Probabilistic environments in the quantitative analysis of (non-probabilistic) behaviour models.” In *Proc. of FSE’09*, pages 335–344. ACM, 2009
- [PQZ20] K. Peng, X. Qian, B. Zhao, K. Zhang, Y. Liu, A New Cloudlet Placement Method Based on Affinity Propagation for Cyber-Physical-Social Systems in Wireless Metropolitan Area Networks, *IEEE Access* 8:34313–34325, 2020. doi:10.1109/ACCESS.2020.2974895.
- [PT21] R. Pincirolì, C. Trubiani: “Model-based Performance Analysis for Architecting Cyber-Physical Dynamic Spaces”. *ICSA 2021*: 104-114

- [QMD16] J. Quintas, P. Menezes, J. Dias, Information model and architecture specification for context awareness interaction decision support in cyber-physical human-machine systems, *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 47 (3) (2016) 323–331.
- [RSI18] I. Ruchkin, J. Sunshine, G. Iraci, B. Schmerl, D. Garlan: IPL: An Integration Property Language for Multi-model Cyber-physical Systems. *FM 2018*: 165–184
- [SSZ16] S. Sowe, E. Simmon, K. Zettsu, F. De Vault, I. Bojanova, Cyber-Physical-Human Systems: Putting People in the Loop, *IT Professional* 18 (1) (2016) 10–13. DOI:10.1109/MITP.2016.14.
- [STC24] R. Sanchez, J. Troya, **J. Cámara**: “Automated Planning for Adaptive Cyber-Physical Systems under Uncertainty in Temporal Availability Constraints.” *SEAMS@ICSE 2024*: 14–24
- [TP+22] B. A. Townsend, C. Paterson, T. T. Arvind, G. Nemirovsky, R. Calinescu, A. Cavalcanti, I. Habli, and A. Thomas, “From pluralistic normative principles to autonomous-agent rules,” *Minds Mach.*, vol. 32, no. 4, pp. 683–715, 2022.
- [WC+23] R. Wohlrab, **J. Cámara**, David Garlan, Bradley R. Schmerl: “Explaining quality attribute tradeoffs in automated planning for self-adaptive systems”. *J. Syst. Softw.* 198: 111538, 2023.
- [WZY17] S. Wang, A. Zhou, M. Yang, L. Sun, C.-H. Hsu, F. Yang, Service Composition in Cyber-Physical-Social Systems, *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing* 1, 2017. DOI: [10.1109/TETC.2017.2675479](https://doi.org/10.1109/TETC.2017.2675479).
- [Wey21] D. Weyns: *An Introduction to Self-Adaptive Systems: A Contemporary Software Engineering Perspective*. Wiley, 2021. DOI:10.1002/9781119574910
- [WAC21] D. Weyns, J. Andersson, M. Caporuscio, F. Flammini, A. Kerren, and W. Löwe: A Research Agenda for Smarter Cyber-Physical Systems, *Journal of Integrated Design & Process Science* 25(2):27–47, 2021.
- [WBC21] D. Weyns, T. Bures, R. Calinescu, B. Craggs, J. Fitzgerald, D. Garlan, B. Nuseibeh, L. Pasquale, A. Rashid, I. Ruchkin, B. Schmerl: Six Software Engineering Principles for Smarter Cyber-Physical Systems. *ACSOS-C 2021*: 198–203
- [WRS14] P.-L. Wu, D. Raguraman, L. Sha, R. Berlin, J. Goldman, A treatment validation protocol for cyber-physical-human medical systems, in *EUROMICRO 2014*, pp. 183–190.
- [XLX17] J. Xu, A. Liu, N. Xiong, T. Wang, Z. Zuo, Integrated collaborative filtering recommendation in social cyber-physical systems, *International Journal of Distributed Sensor Networks* 13 (12), 2017. DOI: 10.1177/1550147717749745.
- [YNP19] B. Yilma, Y. Naudet, H. Panetto, Introduction to personalisation in cyber-physical-social systems, in: *Lecture Notes in Computer Science*, LNCS 11231:25–35, 2019. DOI:10.1007/978-3-030-11683-5_3.

- [YPN19] B. Yilma, H. Panetto, Y. Naudet, A Meta-Model of Cyber-Physical-Social System: The CPSS Paradigm to Support Human-Machine Collaboration in Industry 4.0, in: IFIP Advances in Information and Communication Technology 568:11–20, 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-28464-0_2.
- [YPN21] B. Yilma, H. Panetto, and Y. Naudet, “Systemic formalisation of Cyber-Physical-Social System (CPSS): A systematic literature review,” *Computers in Industry* 129:103458, 2021.
- [ZCL20] W. Zhang, X. Chen, Y. Liu, Q. Xi, A Distributed Storage and Computation k-Nearest Neighbor Algorithm Based Cloud-Edge Computing for Cyber-Physical-Social Systems, *IEEE Access* 8:50118–50130, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2974764.
- [ZTL15] Y. Zhu, Y. Tan, R. Li, X. Luo, Cyber-Physical-Social-Thinking Modeling and Computing for Geological Information Service System, in *IIKI 2015*, pp. 193–196. DOI: 10.1109/IIKI.2015.48.
- [ZWZ20] Z. Zhu, Y. Wen, Z. Zhang, Z. Yan, S. Huang, X. Xu, Accurate position estimation of mobile robot based on cyber-physical-social systems (CPSS), *IEEE Access* 8:56359–56370, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2980558.