

## **ANEXO I** **MEMORIA JUSTIFICATIVA**

### **1. DATOS BÁSICOS**

<b>1. Universidad solicitante</b>
Universidad Complutense de Madrid
<b>2. Denominación del título</b>
Máster Universitario en Métodos Formales en Ingeniería Informática / Formal Methods in Computer Science por la Universidad Complutense de Madrid y la Universidad Politécnica de Madrid
<b>3. Ámbito de conocimiento</b>
Ingeniería informática y de sistemas
<b>4. En el caso de que se trate de un título interuniversitario, especificar las universidades participantes</b>
Universidad Complutense de Madrid Universidad Politécnica de Madrid
<b>5. Nombre del Centro de impartición y naturaleza del mismo: propio o adscrito</b>
Universidad Complutense de Madrid <ul style="list-style-type: none"> <li>• Facultad de Informática. Centro propio.</li> </ul> Universidad Politécnica de Madrid <ul style="list-style-type: none"> <li>• Escuela Técnica Superior de Ingenieros Informáticos. Centro propio.</li> </ul>
<b>6. Número total de créditos</b>
60
<b>7. Modalidad de enseñanza (presencial, híbrida, virtual)</b>
Presencial
<b>8. En el caso de los másteres, indíquese su orientación: profesional, académica o de investigación</b>
Orientación académica
<b>9. Estructura del plan de estudios (materias, créditos y distribución por cursos/semestres)</b>
<p>El título de Máster en Métodos Formales en Ingeniería Informática / Formal Methods in Computer Science está organizado en tres módulos:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Métodos Formales Fundamentales, que engloba los 12 créditos de materias obligatorias.</li> <li>2. Métodos Formales Complementarios, que engloba los 54 créditos optativos, de los cuales cada alumno habrá de escoger 36.</li> <li>3. Trabajo Fin de Máster, que comprende 12 créditos de carácter TFM.</li> </ol>

El módulo 1 de Métodos Formales Fundamentales desarrolla una única materia con el mismo nombre y se organiza en 2 asignaturas obligatorias de 6 créditos cada una que cubrirán contenidos esenciales sobre lenguajes de programación y análisis y verificación de programas.

El módulo 2 de Métodos Formales Complementarios se desarrolla en cuatro materias:

- 2.1. Análisis de la corrección de los sistemas: 18 créditos. Se organiza en 3 asignaturas de 6 créditos cada una.
- 2.2. Diseño y construcción rigurosa de sistemas: 18 créditos. Se organiza en 3 asignaturas de 6 créditos cada una.
- 2.3. Técnicas especializadas de construcción de sistemas: 12 créditos. Se organiza en 2 asignaturas de 6 créditos cada una.
- 2.4. Prácticas en empresas o grupos de investigación: 6 créditos. Se organiza en 1 asignatura de 6 créditos.

Finalmente, el módulo 3 del Trabajo Fin de Máster consta de una sola materia con el mismo nombre que el módulo y se organiza en una única asignatura de 12 créditos con carácter TFM.

Las asignaturas se distribuyen temporalmente en los dos cuatrimestres de un curso académico. En el primer cuatrimestre se ofertarán las dos asignaturas obligatorias del módulo 1 y 4 optativas del módulo 2 de las materias 2.1, 2.2 y 2.3. En el segundo cuatrimestre se ofertarán las 4 optativas restantes de las materias 2.1, 2.2 y 2.3. En este segundo cuatrimestre se realizarán también los 12 créditos del Trabajo Fin de Máster. La asignatura optativa de Prácticas en empresas o grupos de investigación podrá cursarse en los dos cuatrimestres.

## 10. Calendario de implantación

### Curso de inicio: 2025-2026

El título de Máster Universitario en Métodos Formales en Ingeniería Informática / Formal Methods in Computer Science por la Universidad Complutense de Madrid y la Universidad Politécnica de Madrid se implantará a partir del curso 2025-2026. Al ser un máster de 60 créditos, está pensado para tener un año de duración por lo que se implantará en su totalidad en ese curso.

## 2. CRITERIOS GENERALES

Líneas estratégicas	Justificación
<p><b>Justificación académica. Criterios diferenciadores que justifiquen la implantación del título para la atracción del talento, tanto para estudiantes como profesorado.</b></p> <p><i>La Universidad deberá justificar las características del programa en el contexto de la enseñanza universitaria, su idoneidad y adecuación al nivel académico establecido por el MECES, así como los objetivos y medidas innovadoras que puedan atraer a los estudiantes y su interés científico, académico y profesional.</i></p>	
<p>Este máster es una revisión del Máster Universitario en Métodos Formales en Ingeniería Informática / Formal Methods in Computer Science que se imparte actualmente en la UCM con la UPM y hasta el curso 2023-2024 con la participación de la UAM. Dado que esta Universidad ha decidido dejar de ofertar el máster, se presenta esta revisión con los cambios mínimos necesarios para mantener su viabilidad en las dos universidades que formarán el nuevo consorcio y asegurar la formación académica que se proponía en el máster que se oferta actualmente. Por esta razón la justificación académica que se detalla a continuación es la misma que la de la titulación que se revisa.</p> <p>Dentro de la Ingeniería Informática hay muchas materias que no se tocan durante los estudios de grado, o se tocan muy superficialmente, y que tampoco tienen cabida en un máster oficial de Ingeniería Informática que habilite para el ejercicio de la profesión.</p> <p>Sin embargo, forman el núcleo principal de un amplio número de congresos internacionales, existen muchos grupos de investigación que los estudian, y las grandes empresas de software como Google y Microsoft dedican amplios recursos a su</p>	

estudio y desarrollo. Las englobamos bajo el nombre genérico de métodos formales y su característica es que hacen un uso intensivo de las matemáticas.

Consideramos incluidas en ellas a todas las relacionadas con el análisis, la especificación, el diseño y la verificación de programas, de sistemas informáticos y de circuitos hardware, las relacionadas con el análisis y uso de la red global de comunicación y las matemáticas computacionales.

Hay un tipo de alumnos con una fuerte vocación investigadora o innovadora, al que interesan estos temas y a los que no se ofrecen estudios de este tipo, no solo en Madrid, sino tampoco en ninguna universidad española. La consecuencia es que los buscan y encuentran en otros países de nuestro entorno, y se corre el riesgo de que se pierdan estos alumnos para los grupos y empresas investigadoras nacionales.

El público ideal para nutrir este máster son los alumnos de los grados simples o dobles en Ingeniería Informática y en Matemáticas, de las universidades madrileñas, así como de las de otras regiones españolas e incluso del espacio europeo o internacional en general, dada la carencia de este tipo de estudios en el panorama nacional y su escasez en el panorama internacional.

El objetivo del máster es atraer a estudiantes con buenos expedientes académicos y con gran interés tanto por la informática como por las matemáticas, que estén dispuestos a formarse en temas que están en auge tanto en el mundo académico como en la mayoría de empresas tecnológicas y nuevas start-ups.

A su vez, las materias tratadas en el máster unido al perfil de los estudiantes que atrae, hacen que el máster sea también muy atractivo para el profesorado. Eso nos ha permitido contar con profesorado muy prestigioso además de una plantilla estable y de gran calidad.

Considerando el carácter minoritario de los mismos con respecto a los de otras ramas de la Informática más demandadas, estimamos que no tiene sentido dispersar los esfuerzos, ni los recursos, creando un máster de estas características en varias universidades. Por eso, el máster que se propone nace con una clara vocación interuniversitaria desde el principio. Esta vocación incluye tanto a los alumnos potenciales que han de nutrirlo, como a los profesores que han de impartir los distintos módulos.

Para mejorar su capacidad de atracción y conseguir aumentar la cantidad y calidad de sus alumnos, la impartición de todos los módulos será en inglés y se ofertará el máster internacionalmente. Una referencia extranjera similar al máster que se propone es la del Parisian Master of Research in Computer Science (<https://wikimpri.dptinfo.ens-cachan.fr/>), que se impartió por primera vez en el curso 2012-13, y en el que participan la Universidad de Paris Diderot, la Universidad de París Saclay y la Escuela Normal Superior de Ulm.

El idioma de impartición será el inglés y se ofertarán 30 plazas de nuevo ingreso cada curso.

#### **Posibilidades y expectativas que promuevan el desarrollo profesional o investigador del título.**

*Características del título relacionadas con el desarrollo de la carrera profesional o investigadora, tanto en el ámbito nacional como internacional*

El título ofrece una formación especializada en el área de los métodos formales en la informática. Esta área de la informática está en auge tanto en investigación como en implantación en el tejido industrial y en especial en las empresas tecnológicas. Respecto al desarrollo investigador las metodologías formales han atraído durante muchos años la atención de investigadores de todo el mundo. La investigación en esta área cubre desde investigación básica a investigación aplicada a problemas industriales concretos, pasando por el desarrollo de herramientas generales y especialidades. Respecto al desarrollo profesional las empresas tecnológicas buscan el perfil de experto en métodos formales para los equipos de desarrollo de sistemas informáticos, ya sean sistemas empotrados, dispositivos inteligentes o aplicaciones software en general. Si se realiza un búsqueda en portales internacionales especializados de ofertas de empleo en que se soliciten conocimientos de “métodos formales”, aparecen grandes empresas como Microsoft, Amazon, Apple, Intel, ARM, Deutsche Bahn AG, IO Global, Capgemini, entre otras, pero también *startups* que basan su apuesta tecnológica en la aplicación de tecnologías disruptivas a sus productos, tales como Protocol Labs, Nomadic Labs, AlgoRand, DevelopAir, GrammaTech, Semmle, Lurtis Rules, BugsEng y otras.

#### **Demanda potencial e interés social del título:**

- Para empresas e instituciones si es de orientación profesional.
- Aportación a la investigación y viabilidad para la producción científico-tecnológica y de transferencia del conocimiento a la sociedad y específicamente al tejido institucional y empresarial (si es de carácter investigador).

*Perfiles a los que se dirige el Título propuesto y justificación de la demanda e impacto socioeconómico (si es de orientación profesional) o líneas de investigación de la Universidad a la que se vincula el título (en caso de ser de orientación investigadora).*

Los perfiles a los que se dirige el máster son profesionales y jóvenes investigadores cuya misión es asegurar la integridad del software que está destinado a hacerse cargo de las funciones más delicadas y esenciales en un sistema de IT.

El software actual se ocupa cada vez de más tareas en la sociedad, lo que lleva a que haya una dependencia cada vez más clara de este software: en el momento actual se puede afirmar, sin lugar a dudas, que el software es el tejido que sostiene y da consistencia a la sociedad actual, basada en la información y el conocimiento. Por esta razón se vuelve cada vez más esencial garantizar que está ausente de fallos, ya que se ocupa de misiones que se han vuelto críticas, y que puede *escalar* para atacar cometidos cada vez más ambiciosos que tienen dimensiones planetarias. Por otro lado, la necesidad creciente de interactuar a nivel global incrementa exponencialmente la complejidad del software, al crecer de igual manera las posibilidades que tiene de fallos.

Por ello, el desarrollo moderno y económicamente viable de software seguro y escalable requiere de un rigor que no estaba presente de manera tan patente y generalizada en momentos anteriores de la historia de la computación. Para asegurar que se cumplen estas propiedades positivas, se está acudiendo cada vez más a métodos y herramientas con raíces bien fundamentadas en técnicas rigurosas derivadas de las ramas de las matemáticas más cercanas a la computación. Esta es una tendencia que se está siguiendo no solamente en las grandes empresas punteras de software y servicios complejos basados en software (Amazon, Google, Facebook, Apple, Microsoft, Netflix, IBM,..., que tienen importantes divisiones dedicadas al uso de los métodos formales para asegurar la integridad de sus productos y herramientas, tanto internos como externos) sino también en empresas medianas y *startups* que requieren que sus propuestas emprendedoras compitan en calidad con las de otros miembros del ecosistema que cuentan con más solera.

Por otra parte, esta creciente demanda de profesionales con este perfil hace necesario que las capacidades necesarias, que no son normalmente proporcionadas por los títulos de grado, se tengan que adquirir a nivel de máster y con frecuencia a nivel de doctorado. Las *startups* en los ecosistemas que precisan de productos de alta calidad están continuamente a la caza de recientes doctorados con conocimientos avanzados en las temáticas anteriormente mencionadas, aparte de financiar privadamente proyectos de investigación.

Entre las capacidades avanzadas requeridos por las empresas en los ámbitos citados podemos mencionar, agrupándolas en grandes compartimentos, las siguientes:

- P1. Métodos formales aplicados al desarrollo de software
- P2. Teoría y diseño de lenguajes de programación
- P3. Modelización y diseño de sistemas
- P4. Verificación y prueba de sistemas
- P5. Criptografía
- P6. Computación cuántica

Como mencionamos anteriormente, estos perfiles son adecuados tanto para seguir unos estudios de doctorado como para trabajar en empresas tecnológicas.

#### **Grupos de investigación ligados al máster**

Grupos de investigación de la UCM como Diseño y análisis formal de sistemas de software (FADOSS), Complutense group on program analysis and transformation (COSTA), Testing y evaluación del rendimiento (TER) o Mathematics and quantum information (MathQI) realizan investigación en estos perfiles y están implicados en la impartición del máster, ya que los estudiantes que lo cursan son siempre candidatos a iniciar una carrera como investigadores de calidad y de este modo incrementar el impacto y el prestigio de la universidad.

Del mismo modo, los grupos de la UPM implicados en la impartición del máster tienen una larga historia de investigación de muy alta calidad en métodos formales y lenguajes de programación. Estos son el grupo de investigación en Computación lógica, implementación y paralelismo (CLIP) y el grupo de investigación en Lenguajes de especificación y programación (BABEL). Asimismo, el Instituto IMDEA Software, que colabora asiduamente con los grupos antedichos de la UCM y la UPM, tiene la mayoría de sus líneas de trabajo completamente alineadas con el desarrollo y aplicación de métodos formales en la ingeniería informática, así como uno de los equipos de criptografía más potentes de Europa. Adicionalmente, investigadores del Instituto han colaborado en el pasado en la impartición de asignaturas del máster dentro de sus especialidades.

Existe además un extenso historial --que se extiende hasta la actualidad-- de colaboración investigadora entre estos grupos, a través de proyectos de investigación conjuntos, habiendo además organizado de manera también conjunta cursos de posgrado altamente especializados, aunque no reglados, en temáticas cercanas a las de este máster.

**Carácter innovador y diferencial del título dentro de las líneas estratégicas y de investigación de la universidad y, en su caso, en consonancia con el Sistema Madrileño de Universidades, Ciencia e Innovación (SMUCI).**

*Indicación de los rasgos diferenciales con otras titulaciones similares y aportación al mapa universitario y de líneas de investigación.*

Como ya se ha mencionado, no existe ningún otro máster de estas características en el panorama nacional y, aunque universidades muy prestigiosas sí que ofrecen másteres similares, la oferta no es muy extensa. Por esta razón, unido a que suele atraer a estudiantes de gran talento, la existencia de unos estudios así en Madrid, desarrollados por dos universidades de gran prestigio como la Universidad Complutense de Madrid y la Universidad Politécnica de Madrid, puede ser de gran valor estratégico, para nutrir a centros de investigación y empresas de la Comunidad de Madrid.

**Declaración responsable garantizando el cumplimiento de los principios rectores en el diseño de los planes de estudio de los títulos universitarios oficiales, así como de los principios y valores democráticos establecidos en el artículo 4 del Real Decreto 822/2021, de 28 de septiembre.**

La Universidad Complutense de Madrid, garantiza el rigor académico del proyecto formativo, la concordancia con el carácter generalista o especializado del ciclo donde se inscribe el título, la coherencia de sus objetivos formativos, las competencias que se persiguen, los sistemas de evaluación establecidos y su comprensibilidad social.

Del mismo modo, velará por el compromiso hacia los valores democráticos, la cultura de la paz y de la participación, la igualdad efectiva entre hombres y mujeres, la igualdad de oportunidades y de trato sin discriminación por razón de nacimiento, origen nacional o étnico, religión, convicción u opinión, edad, discapacidad, orientación sexual, identidad o expresión de género, características sexuales, enfermedad, situación socioeconómica o cualquier otra condición o circunstancia personal o social, tal y como se recogen en los Estatutos de la Universidad y en las Competencias Transversales de todas nuestras titulaciones.

**Declaración responsable que recoja el compromiso de respeto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), de conformidad al artículo 35.2 de la Ley 7/2021, de 20 de mayo.**

La Universidad Complutense de Madrid, garantiza el compromiso de respeto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), de conformidad con lo dispuesto en el artículo 35.2 de la Ley 7/2021, de 20 de mayo, de Cambio Climático y Transición Energética.

### 3. CRITERIOS ECONÓMICOS

**Universidades Públicas: memoria que recoja los costes en materia de personal e inversiones en nuevas infraestructuras necesarias para la implantación completa del título.**

*Propuesta de memoria económica.*

#### **Personal docente e investigador**

La especialización que se espera en enseñanzas de posgrado en relación con las de grado requiere de una selección de profesorado acorde con ese nivel de especialización. Adicionalmente a las materias que cada profesor puede impartir, hay que añadir que todos ellos pueden dirigir trabajos de fin de máster, así como ejercer en su caso la labor de tutorización de prácticas en empresas o grupos de investigación. Asimismo, todos los profesores están capacitados para impartir clase en inglés.

El actual número de docentes permite cumplir con las necesidades del título. Estos estudios son una revisión del Máster Universitario en Métodos Formales en Ingeniería Informática / Formal Methods in Computer Science que se imparte actualmente entre la Universidad Complutense de Madrid, la Universidad Politécnica de Madrid y la Universidad Autónoma de Madrid.

Respecto a la carga docente asociada al Máster, a continuación se detalla los créditos asociados tanto al profesorado UCM como al profesorado UPM.

Cada curso se ofertarán un total de 10 asignaturas presenciales de 6 créditos y se deberán dirigir un máximo de 30 Trabajos Final de Máster, 15 en cada centro.

Las asignaturas presenciales suponen por tanto una carga de 60 créditos, que se reparten en 40 impartidos por la UCM y 20 por la UPM. Esto supone un incremento respecto a la carga actual por la impartición del mismo máster de 4 créditos para la UCM y de 8 créditos para la UPM, manteniendo la calidad del máster y una oferta atractiva de asignaturas. Por otro lado, la carga esperada por dirección de TFM estará repartida a partes iguales (50% cada una) entre la UCM y la UPM.

También existe la posibilidad de cursar la asignatura de Prácticas en Empresa o Grupos de Investigación pero, considerando que en media la mitad de los estudiantes cursarán esta asignatura, el responsable de cada centro deberá gestionar 7 u 8 prácticas lo que supondrá una carga nula o inferior a un crédito.

En términos porcentuales, la participación de las dos universidades en los tres módulos indicados en el apartado 1.9 es como sigue:

1. Métodos Formales Fundamentales: UCM (83%), UPM (17%)
2. Métodos Formales Complementarios: UCM (60%), UPM (40%)
3. Trabajo Fin de Máster: UCM (50%), UPM (50%)

En total (juntando asignaturas y TFMs) la carga se repartirá aproximadamente en un 60% para la UCM y un 40% para la UPM.

### **Personal de Administración y Servicios**

La implantación del máster no supondrá la necesidad de incrementar el personal de administración y servicios de ninguno de los dos centros implicados en su gestión.

### **Recursos materiales**

Los estudiantes admitidos cada año en el máster (ver Apartado 1) cabrán en una sola aula, y también en un laboratorio dotado de ordenadores. Las necesidades estimadas de recursos materiales se reducen pues a un aula y un laboratorio dedicados al máster en cada uno de los centros. No se necesita un hardware especial, si bien es preferible que los ordenadores tengan gran capacidad de cálculo debido a la naturaleza de las herramientas que se pretende ejecutar en ellos, que en general serán intensivas en cómputo. Dichas herramientas serán, o bien compiladores y editores convencionales de los que disponen todas las facultades y escuelas de informática, o bien herramientas especializadas que están disponibles como software libre para toda la comunidad científica.

Estas necesidades pueden ser cubiertas tanto la Facultad de Informática de la UCM como la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Informáticos de la UPM con las infraestructuras (aulas, laboratorios, aulas de seminarios, biblioteca, etc) que disponen actualmente, sin que eso suponga un incremento en la inversión a realizar.

Ambos centros tienen amplios recursos bibliográficos y de documentación, en la forma de bibliotecas físicas y suscripción a recursos *online*, a disposición de los estudiantes. Tanto la UCM como la UPM están dotadas de campus virtuales que extienden los servicios y funciones del campus universitario por medio de las nuevas tecnologías de la información y la comunicación. El uso de estos recursos por parte de los estudiantes del máster no supondrá un incremento de sus costes asociados.