
Notas



Los niveles de madurez de la tecnología, más conocidos por sus siglas inglesas originarias *TRLs* o *Technology Readiness Levels*, han empezado a usarse en las convocatorias de ayudas del nuevo Programa Marco de Investigación (2014-2020), más conocido por H2020. En esta breve nota se hace un somero repaso conceptual de los TRLs y de las ventajas que su aplicación y conocimiento podrían aportar a las convocatorias nacionales de I+D+i.

NIVELES DE MADUREZ DE LA TECNOLOGÍA *TECHNOLOGY READINESS LEVELS. TRLS.* UNA INTRODUCCIÓN

En esta breve nota se pretende hacer una revisión de los niveles de madurez de la tecnología, más conocidos por sus siglas inglesas *TRLs*: *Technology Readiness Levels*. Este concepto surge en la NASA pero posteriormente se generaliza para aplicarse a cualquier proyecto y no necesariamente a los proyectos aeronáuticos o espaciales, desde su idea original hasta su despliegue.

Más en concreto un *TRL* es una forma aceptada de medir el grado de madurez de una tecnología. Por lo tanto, si consideramos una tecnología concreta y tenemos información del *TRL* o nivel en el que se encuentra podremos hacernos una idea de su nivel de madurez.

Evidentemente y a efectos prácticos, no se puede considerar el mismo grado o nivel de innovación el que se aborda cuando se realiza un determinado proyecto si se parte para su realización de tecnologías maduras o de tecnologías probadas con éxito en entornos reales (*TRL 8 - TRL 9*) y que pueden encontrarse disponibles de forma libre o mediante licencia, que el que se aborda a partir de tecnologías que se encuentran en fase de desarrollo y validación (*TRL 4-TRL 7*) o el que se aborda a partir de tecnologías que se encuentran todavía en un nivel más básico, a nivel de idea o de prueba de concepto (*TRL 1 - TRL 3*).

LOS *TRLs* O NIVELES DE MADUREZ DE LA TECNOLOGÍA

Se consideran 9 niveles que se extienden desde los principios básicos de la nueva tecnología hasta llegar a sus pruebas con éxito en un entorno real:

- **TRL 1:** Principios básicos observados y reportados.
- **TRL 2:** Concepto y/o aplicación tecnológica formulada.
- **TRL 3:** Función crítica analítica y experimental y/o prueba de concepto característica .

- **TRL 4:** Validación de componente y/o disposición de los mismos en entorno de laboratorio.
- **TRL 5:** Validación de componente y/o disposición de los mismos en un entorno relevante.
- **TRL 6:** Modelo de sistema o subsistema o demostración de prototipo en un entorno relevante
- **TRL 7:** Demostración de sistema o prototipo en un entorno real.
- **TRL 8:** Sistema completo y certificado a través de pruebas y demostraciones.
- **TRL 9:** Sistema probado con éxito en entorno real

Cuando en los (*TRL 4 - TRL 5*) se hace mención a «validación de componente y/o disposición de los mismos» se pretende traducir del inglés *component and/or breadboard validation* y más en concreto *breadboard* que en su traducción literal sería «tabla para cortar el pan» hace referencia en realidad a «*an experimental arrangement of electronic circuits giving access to components so that modifications can be carried out easily*». En definitiva, se hace referencia a que en este nivel se pueden llevar a cabo fácilmente modificaciones a nivel de componente ya que posteriormente en niveles a partir del *TRL 6*, nos encontraremos a nivel de sistema o subsistema. Por lo tanto, desde el punto de vista de las pruebas y la validación, la clasificación por niveles sería la siguiente:

- **TRL 1:** Idea básica.
- **TRL 2:** Concepto o tecnología formulados.
- **TRL 3:** Prueba de concepto.
- **TRL 4:** Validación a nivel de componentes en laboratorio.
- **TRL 5:** Validación a nivel de componentes en un entorno relevante.

- **TRL 6:** Validación de sistema o subsistema en un entorno relevante.
- **TRL 7:** Validación de sistema en un entorno real.
- **TRL 8:** Validación y certificación completa en un entorno real.
- **TRL 9:** Pruebas con éxito en entorno real.

Cuando se habla de entorno relevante se pretende indicar un entorno con unas condiciones que se aproximan o simulan suficientemente a las condiciones existentes en un entorno real o de misión.

En cuanto al entorno en el que se desarrolla el proyecto en los cuatro primeros niveles (*TRL 1 - TRL 4*) el entorno de validación de la tecnología es en el laboratorio, en los niveles *TRL5* y *TRL6* la tecnología se está validando en un entorno con características similares al entorno real y los tres últimos niveles (*TRL 7 - TRL 9*) abordan las pruebas y validación de la tecnología en un entorno real. Puede verse de forma gráfica en la figura 1.

Por el tipo de investigación, desarrollo tecnológico e innovación que se está abordando habría que indicar que los tres primeros niveles abordarían la investigación tecnológica más básica hasta llegar a una primera prueba de concepto. El desarrollo tecnológico se llevaría a cabo desde los niveles (*TRL 4 - TRL 7*) hasta llegar a un primer prototipo o demostrador no comercializable. Los proyectos de innovación tecnológica se encontrarían en el *TRL 8*, puesto que la innovación tecnológica requiere la introducción de un nuevo producto o servicio en el mercado y para ello se deben haber superado las pruebas y certificaciones así como todas las homologaciones pertinentes. Finalizada esta fase vendría el despliegue o implantación a gran escala. Mostramos en la figura 2 estos conceptos en el clásico esquema «I+D+i». Y algo más detallado en la figura 3.

Pero más allá de estos conceptos teóricos, la idea sería su aplicación práctica en las convocatorias públicas de ayudas para la realización de proyectos. Evidentemente si nos queremos dirigir al ciclo de vida completo de la tecnología que se pretende desarrollar deberíamos partir desde el *TRL 1*, donde a partir de una primera idea novedosa se llegaría hasta la prueba de concepto en el *TRL 3*. Cuando el alcance del proyecto es a nivel de prueba de concepto a la finalización del mismo se deberá tener la certeza de que el camino emprendido es adecuado para llegar a disponer de un producto comercial, aunque todavía quedará actividades de desarrollo, pruebas e industrialización etc., antes de poder acceder al mercado.

Posteriormente se abordaría el desarrollo tecnológico (*TRL 4 - TRL 7*) hasta su validación y finalmente su puesta en el mercado y despliegue (*TRL 8 - TRL 9*).

Si realmente nos quisiésemos centrar en el desarrollo tecnológico habría que partir de tecnología valida-

FIGURA 1

TRL 9	Entorno real
TRL 8	
TRL 7	
TRL 6	Entorno de simulación
TRL 5	
TRL 4	Entorno de laboratorio
TRL 3	
TRL 2	
TRL 1	

FUENTE: Elaboración propia.

FIGURA 2

TRL 9	Innovación
TRL 8	
TRL 7	
TRL 6	Desarrollo
TRL 5	
TRL 4	Investigación
TRL 3	
TRL 2	
TRL 1	

FUENTE: Elaboración propia.

FIGURA 3

TRL 9	Despliegue
TRL 8	Producto o servicio comercializable Certificaciones pruebas específicas
TRL 7	Prototipo/Demostrador Desarrollo tecnológico
TRL 6	
TRL 5	
TRL 4	Prueba de concepto Investigación industrial
TRL 3	
TRL 2	
TRL 1	

FUENTE: Elaboración propia.

da a nivel de prueba de concepto y centrarse en los niveles (*TRL 4 - TRL 7*), con un desarrollo tecnológico más cercano a mercado según nos vamos aproximando al nivel *TRL 8*. Finalmente, los proyectos de innovación que exigen la introducción del producto o servicio nuevo o mejorado en el mercado se abordarían en los niveles (*TRL 8 - TRL 9*).

Los *TRLs* han comenzado a ser una terminología habitual en el nuevo Programa Marco de Investigación (2014-2020), más conocido por H2020. De hecho, la Comisión Europea clasifica los *TRLs* de la siguiente forma:

- **TRL 1:** Investigación básica.
- **TRL – TRL 4:** Concepto tecnológico. Prueba de concepto. Validación en laboratorio.
- **TRL 5:** Validación en entorno relevante.
- **TRL 6:** Demostración en entorno relevante.
- **TRL 7:** Demostración en entorno operacional (real).
- **TRL 8:** Sistema completo y certificado.
- **TRL 9:** Despliegue.

Por lo tanto, la obtención de la **certificación** de un determinado equipo completo (**System complete and qualified**) se abordaría en el *TRL 8*.

De hecho, en los distintos *topics* o prioridades temáticas de las convocatorias H2020 se incluye un rango del nivel de madurez tecnológica o *TRL* como indicación del tipo de proyecto que financiará ese *topic*:

- **TRL 1:** Investigación básica.
- **TRL 2:** Formulación de la tecnología.
- **TRL 3:** Investigación aplicada. Prueba de concepto.
- **TRL 4:** Desarrollo a pequeña escala (laboratorio).
- **TRL 5:** Desarrollo a escala real.
- **TRL 6:** Sistema/prototipo validado en entorno simulado.
- **TRL 7:** Sistema/prototipo validado en entorno real.
- **TRL 8:** Primer sistema/prototipo comercial.
- **TRL 9:** Aplicación comercial.

Además, la Comisión Europea hace una distinción específica cuando se trata de las *Key Enabling Technologies* o tecnologías facilitadoras esenciales:

- **TRL 1:** Principios básicos observados.
- **TRL 2:** Concepto tecnológico formulado.
- **TRL 3:** Prueba de concepto experimental.
- **TRL 4:** Tecnología validada en laboratorio.

- **TRL 5:** Tecnología validada en entorno relevante (entorno industrial relevante si se trata de las Tecnologías facilitadoras esenciales)
- **TRL 6:** Tecnología demostrada en entorno relevante (entorno industrial relevante si se trata de las Tecnologías facilitadoras esenciales)
- **TRL 7:** Demostración de prototipo de sistema en entorno operativo
- **TRL 8:** Sistema completo y certificado
- **TRL 9:** Sistema probado en entorno operativo o misión real, lo que se traduce en fabricación competitiva en el caso de las tecnologías facilitadoras esenciales o probado en entorno espacial.

Refiriéndonos someramente a las *Key Enabling Technologies (KETs)*, un grupo de expertos creado por la Comisión Europea concluyó que la industria europea perdería competitividad si no consiguiese desarrollar y aprovechar con éxito estas seis tecnologías:

- ✓ Micro y nanoelectrónica.
- ✓ Materiales avanzados.
- ✓ Biotecnología industrial.
- ✓ Fotónica.
- ✓ Nanonotecnología.
- ✓ Sistemas de Fabricación Avanzados.

En EEUU se hizo también un estudio llegándose a conclusiones semejantes que en Europa. De hecho, el anterior Director del Centro de Investigación de Xerox en Silicon Valley, John Seely Brown, comentaba recientemente «*We really have to get back to building things, we can't just design things*».

Ejemplos de la importancia de estas tecnologías serían los siguientes:

- Un teléfono móvil incorpora *chips* microelectrónicos para las comunicaciones, una cámara y ópticas basadas en la fotónica, materiales avanzados para nuevas pantallas táctiles, etc.
- Un instrumento de análisis de la gripe aviar en tiempo real incorpora marcadores biotecnológicos, *chips* microelectrónicos, detección fotónica basada en láser y superficies optimizadas mediante nanotecnología para tratamiento de líquidos.

En definitiva, el nuevo paradigma tecnológico: **Nano-Bio-Info-Cogno** parece confirmarse, paradigma que no es otro que las propias *Key Enabling Technologies*.

Pero volviendo a los *TRLs*, si consideramos la escala de cada uno de los niveles de madurez tecnológica,

entendiendo por escala la relación entre las dimensiones del modelo y las dimensiones del prototipo final, tendríamos la siguiente clasificación que se indica en la figura 4.

Según el grado de disponibilidad (*readiness*) de la tecnología la clasificación, sería la propia clasificación donde *TRL 1* significa mínima disponibilidad o madurez de la tecnología y *TRL 9* significa la máxima.

- **TRL 1:** Idea básica. Mínima disponibilidad.
- **TRL 2:** Concepto o tecnología formulados.
- **TRL 3:** Prueba de concepto.
- **TRL 4:** Componentes validados en laboratorio.
- **TRL 5:** Componentes validados en entorno relevante.
- **TRL 6:** Tecnología validada en entorno relevante.
- **TRL 7:** Tecnología validada en entorno real
- **TRL 8:** Tecnología validada y certificada en entorno real.
- **TRL 9:** Tecnología disponible en entorno real. Máxima disponibilidad.

Cabría también considerar los resultados que conllevaría cada uno de los niveles de madurez:

- **TRL 1:** Artículos científicos publicados sobre los principios de la nueva tecnología.
- **TRL 2:** Publicaciones o referencias que subrayan las aplicaciones de la nueva tecnología.
- **TRL 3:** Medida de parámetros en laboratorio.
- **TRL 4:** Resultados de las pruebas realizadas en laboratorio.
- **TRL 5:** Componentes validados en entorno relevante.
- **TRL 6:** Resultados de las pruebas realizadas a nivel de prototipo en entorno relevante.
- **TRL 7:** Resultado de las pruebas a nivel de prototipo realizadas en entorno operativo.
- **TRL 8:** Resultados de las pruebas del sistema en su configuración final.
- **TRL 9:** Informes finales en condiciones de funcionamiento o misión real.

Algunas de las ventajas del uso de *TRLs* serían:

- ✓ Proporcionan una comprensión común del estado de madurez de una tecnología
- ✓ La gestión del riesgo de un determinado proyecto podrá tener en cuenta el grado de madurez de la tecnología

FIGURA 4

TRL 9	Escala Real = 1
TRL 8	
TRL 7	
TRL 6	Ingeniería (<i>Engineering Scale</i>) 1/10 < Escala < 1
TRL 5	
TRL 4	Laboratorio. Banco. (<i>Laboratory/Bench Scale</i>) Escala < 1/10
TRL 3	
TRL 2	
TRL 1	

FUENTE: Elaboración propia.

Se puede utilizar para realizar decisiones de financiación de proyectos en función de los diferentes niveles de madurez tecnológica que se pretenda considerar.

La mayor ventaja de la utilización de los *TRLs* sería conocer el punto de partida de un nuevo proyecto a financiar y cuál sería su alcance, es decir hasta que *TRL* se llegaría. Esta aproximación podría ser más realista que el denominado «efecto incentivador» del Marco Comunitario de Ayudas de I+D+i que exige que la fecha de solicitud de ayuda de un proyecto sea anterior al inicio del mismo. En la práctica, las empresas innovadoras realizan de una forma sistemática actividades de I+D+i pero formalizar la realización de un nuevo proyecto requiere en realidad saber cuál es su punto de partida. En cualquier caso, ambos enfoques pueden ser complementarios solicitándose un nuevo proyecto antes de su inicio en alguno de los diferentes niveles de madurez tecnológica, pero el enfoque de los *TRLs* es más realista porque permite definir un nuevo proyecto a partir de un determinado nivel de madurez tecnológica.

LOS *TRLs* EN LOS PROYECTOS DE TI

En este apartado vamos a contestar a la siguiente pregunta: ¿Cómo se definen los *TRLs* para los proyectos de *software*?

- **TRL 1:** Nivel más bajo de la disponibilidad de la tecnología *software*. Se está investigando un nuevo dominio *software* por parte de la comunidad científica a nivel de investigación básica. Este nivel comprende el desarrollo de los usos básicos así como las propiedades básicas de la arquitectura *software*, las formulaciones matemáticas y los algoritmos generales.
- **TRL 2:** Se comienza a investigar las aplicaciones prácticas del nuevo *software* aunque las posibles aplicaciones son todavía especulativas.
- **TRL 3:** Se comienza una actividad intensa de I+D y se comienza a demostrar la viabilidad del nuevo *software* a través de estudios analíticos y de laboratorio.

- **TRL 4:** Se comienzan a integrar los diferentes componentes de *software* básico para demostrar que pueden funcionar conjuntamente.
- **TRL 5:** En este nivel la nueva tecnología *software* se encuentra preparada para integrarse en sistemas existentes y los algoritmos pueden ejecutarse en procesadores con características similares a las de un entorno operativo.
- **TRL 6:** En este nivel se pasaría de las implementaciones a nivel de prototipo de laboratorio a implementaciones completas en entornos reales.
- **TRL 7:** En este nivel la tecnología *software* está preparada para su demostración y prueba con sistemas HW/SW operativos.
- **TRL 8:** En este nivel todas las funcionalidades del nuevo *software* se encuentran simuladas y probadas en escenarios reales.
- **TRL 9:** En este nivel la nueva tecnología *software* se encuentra totalmente disponible y se puede utilizar en cualquier entorno real.

CONCLUSIONES

La utilización de los TRLs es una ayuda importante para definir el grado de madurez tecnológica al que nos estamos refiriendo cuando se quiere financiar una determinada línea temática que se quiere fomentar. Apoyar un proyecto en el que se abordarían los 9 TRLs significaría fomentar el desarrollo de una nueva tecnología desde su idea básica hasta su despliegue en el mercado. Si el foco se quiere poner en la investigación básica, la convocatoria de ayudas se debería referir fundamentalmente a los tres primeros niveles (TRL 1 - TRL 3), mientras que si se pretenden abordar proyectos de desarrollo tecnológico se deberá insistir más en los cuatro siguientes (TRL 4 - TRL 7). Finalmente, los proyectos de innovación más cercanos al mercado y los proyectos de implantación y despliegue se contemplarían en los dos últimos (TRL 8 - TRL 9).

Habría que distinguir también entre un proyecto centrado en el desarrollo de una tecnología genérica, que se puede concretar después en múltiples proyectos para el desarrollo de un producto o servicio nuevo o mejorado, o en el desarrollo de un producto o servicio nuevo o mejorado que se encuentre basado en una tecnología cuyo grado de madurez se encuentre en alguno de los 9 niveles. Este último caso es en el que más frecuentemente nos encontraremos puesto que generalmente los proyectos abordan la realización de productos o servicios nuevos o mejorados y se desarrollan a partir de tecnologías que tienen un mayor o menor grado de madurez o disponibilidad (*readiness*).

En efecto, cuando se evalúa el carácter innovador de un proyecto habría que distinguir bien entre estos dos conceptos:

1. Por una parte y como no se trata de reinventar la rueda habría que tener en cuenta el grado de madurez de las tecnologías que se utilizan o que directamente se incorporan durante el ciclo de vida del proyecto.
2. Por otra parte, es necesario tener en cuenta los niveles de madurez que se abarcan durante el propio desarrollo tecnológico que se aborda en el proyecto.

Evidentemente, el riesgo que se afronta y por lo tanto el grado de innovación tecnológica y su valoración no pueden ser los mismos si los desarrollos se abordan a partir de tecnologías maduras o disponibles (*mature or ready technologies*) que si se abordan a partir de tecnologías incipientes (*emerging technologies*) o de vanguardia (*breakthrough technologies*) o si el propio proyecto consiste en el desarrollo desde el TRL 1 de una nueva tecnología rompedora (*disruptive technology*) hasta el TRL 9. Y por lo tanto hasta su despliegue en el mercado.

Además, existe una interrelación entre las tecnologías que se usan durante el ciclo de vida del proyecto y el propio desarrollo tecnológico que se realiza durante la ejecución del mismo. En general, cuanto más inmaduras sean las tecnologías que se utilizan más riesgo se afrontará y más desarrollo tecnológico propio se requerirá para llegar a la consecución de los objetivos planteados, por lo que el riesgo del proyecto será mayor y en consecuencia también será mayor su carácter innovador.

A efectos prácticos, en las convocatorias se podrían realizar dos enfoques:

- **TRLs bottom-up approach:** el solicitante indica el TRL de partida y el TRL final al que se llegará una vez finalice el proyecto.
- **TRLs top-down approach:** la propia convocatoria establece, en general o para cada línea temática, los TRLs que se deberían abordar.

En general en H2020 las prioridades temáticas o *topics* especifican un rango de TRLs. Se espera que la mayor parte de las actividades de cada proyecto se encuentren dentro del rango indicado, y que el TRL (*objetivo*) final se alcance al finalizar el proyecto.

Para las prioridades temáticas en las que únicamente se indica el TRL final del proyecto, también se espera que las actividades del proyecto abarquen un rango de TRLs, dependiendo del estado de la técnica.

En definitiva, la idea que se pretende transmitir es que sería muy conveniente distinguir entre el grado de madurez de la tecnología que se incorpora o se utiliza en el marco de un proyecto y la tecnología que efectivamente se desarrolla como consecuencia del mismo y si el proyecto más allá del desarrollo de un producto, servicio o proceso nuevo o mejorado apor-

ta algún valor añadido sobre el estado actual del arte en ese campo.

La mayoría de proyectos se centran en el desarrollo de un nuevo producto, proceso o servicio más que en el desarrollo de una tecnología específica. Sin embargo, conocer el grado de madurez de la tecnología que se utiliza en el desarrollo es una métrica del riesgo que se afronta en el desarrollo del proyecto y de la envergadura del desarrollo tecnológico que se acomete.

En general, cuanto más maduras sean las tecnologías que se utilizan menor será el riesgo y también menor

el grado de desarrollo tecnológico y cuánto más inmaduras sean las tecnologías que se incorporan mayor grado de desarrollo tecnológico propio y mayor riesgo tecnológico será necesario. Por lo tanto, conocer el punto de inicio y el punto de finalización en términos de *TRL* de un determinado proyecto significa mayor conocimiento del alcance del proyecto susceptible de financiación.

■ Juan Miguel Ibáñez de Aldecoa Quintana

BIBLIOGRAFÍA

HORIZON 2020 – WORK PROGRAMME 2014-2015 General Annexes
Development of Technology Readiness Level (TRL) Metrics and Risk Measures. U.S. Department of Energy
Technology Readiness Assessment Guide. U.S. Department of Energy
Technology Readiness Levels Handbook for Space Applications. ESA