

The CTN logo is displayed in a large, light blue, sans-serif font. A thick, curved blue line sweeps across the bottom of the letters. The background of the entire page is a photograph of a large industrial facility, likely a hydroacoustic laboratory, with a complex metal frame and various equipment. A digital overlay of binary code (0s and 1s) is visible in the upper left corner of the image.

CTN

TWIN-LAB

Informe de Vigilancia Tecnológica

Investigación de técnicas de visualización, ingeniería y ciencia de datos para el desarrollo de un gemelo digital de un laboratorio de hidroacústica, que habilite la caracterización avanzada de equipos y materiales submarinos



Este informe ha sido elaborado por la Asociación Empresarial de Investigación Centro Tecnológico Naval y del Mar gracias al Convenio suscrito con el Instituto de Fomento de la Región de Murcia con el apoyo del fondo FEDER.



Autores: M^a Ángeles García, Isabel Hernández

Más info: www.ctnaval.com



**Fondo Europeo de
Desarrollo Regional**

**"Una manera de
hacer Europa"**

© CTN, 2022

Todos los derechos están reservados. Se autoriza la reproducción total o parcial de este informe con fines educativos, divulgativos y no comerciales citando la fuente. La reproducción para otros fines está expresamente prohibida sin el permiso de los propietarios del copyright.

1. Introducción.....	4
2. Metodología.....	5
3. Sustainable Blue Economy	8
4. Estado del arte	8
4.1. La transformación digital en la acuicultura	9
4.2. Sistemas IoT para granjas de acuicultura off-shore	10
4.3. Modelos para la predicción del apetito para el diseño de estrategias de alimentación en acuicultura	13
4.4 Nivel de innovación para el sector	15
5. Tendencias.....	16
5.1. Literatura científica	16
5.1.1. Análisis de tendencias en la literatura	36
5.2. Proyectos.....	43
5.2.1. Análisis gráfico de la financiación	50
6. Bibliografía.....	52

1. Introducción

Este informe, elaborado por el equipo del Centro Tecnológico Naval y del Mar, tiene como finalidad ofrecer al tejido empresarial una mejora en el conocimiento del entorno, que permita detectar tendencias y desarrollar estrategias adecuadas basadas en niveles superiores de certidumbre a través de la captación y divulgación de información y conocimiento de importancia estratégica en los ámbitos social, tecnológico y económico, que incidan en la detección de nuevas oportunidades de desarrollo regional.

Los contenidos de este informe están estrechamente relacionados con el desarrollo del proyecto *Investigación de técnicas de visualización, ingeniería y ciencia de datos para el desarrollo de un gemelo digital de un laboratorio de hidroacústica, que habilite la caracterización avanzada de equipos y materiales submarinos*.

En este proyecto se pretende acercar distancias entre las **tecnologías 4.0** y el contexto de laboratorio, mediante el desarrollo de un gemelo digital del tanque de hidroacústica, que permitirá el análisis de datos e incorporará el aprendizaje automático. Para ello, CTN dispone de una infraestructura que permite el posicionamiento de los equipos empleados para el ensayo (Ayudas INFO Infraestructuras 2020) que ha sido programado en convocatorias anteriores (Ayudas INFO CCTT 2020 – MetroCal) pero cuya integración digital aun dista de considerarse un Gemelo Digital.

Para la ejecución de TwinLab se desplegarán técnicas de sensorización, herramientas de análisis inteligente de datos e indicadores visuales. Con ello CTN persigue dotar de inteligencia al proceso complejo de medición hidroacústica mediante el desarrollo de su simulación digital, con el valor añadido que aportan el **análisis inteligente de**

GEMELOS DIGITALES



MONITORIZACIÓN DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN:

Recopilación de gran cantidad de datos sobre un objeto o proceso y su entorno. Información relativa al ciclo de vida de un producto, especificaciones de diseño, proceso de producción, materiales, piezas...

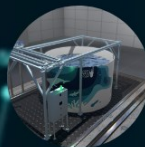
INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS:

La cantidad de datos recogidos determinarán la precisión con la que modelo digital simula la versión física. Los algoritmos de 'Machine Learning', procesan los datos recogidos por los sensores reales para obtener predicciones de tiempo.



SIMULACIÓN DIGITAL DEL PROCESO:

El gemelo digital crea un modelo de simulación que puede actualizarse junto con el objeto o proceso real o en lugar de este. Los sensores instalados en la versión real permiten a la versión digital imitar en todo momento lo que está sucediendo.



TOMA DE DECISIONES OPTIMIZADA:

El gemelo digital utiliza datos del mundo real para predecir cómo funcionará un producto o proceso. Así, se pueden evitar fallos en objetos físicos y realizar funciones avanzadas de análisis, monitorización y predicción.



los datos y la generación de paneles de visualización de indicadores.

Para la realización de este informe se han aplicado técnicas de Vigilancia Tecnológica, una herramienta al servicio de las empresas y organizaciones que permite detectar oportunidades y amenazas aportándoles ventajas competitivas y fundamentos para la toma de decisiones estratégicas mediante la selección y análisis de información de diversos tipos (científica, tecnológica, comercial, de mercado, social...).

Para ello se parte de una introducción metodológica sobre las técnicas y fases de la Vigilancia Tecnológica que se han aplicado para el desarrollo del informe. A continuación, se introduce la Economía Azul como iniciativa europea con el fin de contextualizar los contenidos temáticos del informe. Seguidamente se realiza un análisis del estado de la técnica, proyectos y literatura científica.

Por último, se incluyen las fuentes que se han manejado para la realización de este informe.

2. Metodología

La vigilancia tecnológica se entiende como una “forma organizada, selectiva y permanente de captar información del exterior sobre tecnología, analizarla y convertirla en conocimiento para tomar decisiones con menor riesgo y poder anticiparse a los cambios” [1]. Su finalidad última es generar ventajas competitivas para la empresa ya que le proporciona datos para:

Para el desarrollo de la Vigilancia Tecnológica el primer paso es plantear los aspectos básicos [2]: ¿Cuál es el objeto de la vigilancia? ¿Qué debemos vigilar? ¿Qué información buscar? ¿Dónde localizarla?

Cuando el objetivo de la VT está claramente delimitado, se procede a planificar la estrategia de búsqueda. Para el despliegue de esta fase conviene tener en cuenta que la información puede presentarse de dos formas: estructurada y no estructurada. La primera es propia de las bases de datos, conjuntos de datos homogéneos, ordenados de una forma determinada, que se presenta

en forma legible por ordenador [3]. Su unidad es el registro –o ficha de un artículo científico o una patente- que presenta la información ordenada en campos: autor, título, fecha de publicación, titular de la patente, inventores, etc. En cambio, la información no estructurada se presenta en textos sin un formato determinado (noticias de periódicos, sitios web, blogs, correos electrónicos) cuyo tratamiento requerirá de nuevas herramientas capaces de “leer” y analizar estos textos. Estas herramientas son útiles también para analizar la información de textos completos de artículos científicos o de patentes. Hoy se considera que el texto es la mayor fuente de información y conocimiento para las empresas [4].

La finalidad de la Vigilancia Tecnológica es generar ventajas competitivas para la empresa

Tras la selección de palabras clave se automatiza la búsqueda en función de las diferentes tipologías de fuentes a utilizar, se lanza la misma y se filtran los resultados en términos de pertinencia, fiabilidad, relevancia, calidad y capacidad de contraste [1].

Una vez comprobada la calidad de la información, los métodos de análisis han de garantizar su valor para la explotación de los mismos [5]. El objetivo del análisis es transformar la información en bruto recogida en un producto con alto valor añadido. A partir de

aquí, la aportación de los expertos es crítica para crear información avanzada, para generar conocimiento. Pasamos de una masa ingente de información en distintos formatos y lugares a una etapa en la que se captu-

ra la información más relevante, se organiza, indexa, almacena, filtra y, finalmente, con la opinión del experto que aporta en este punto del pro-

ceso un máximo valor añadido [6]. A continuación, se incluye un esquema con las distintas fases de la metodología empleada durante la generación de este informe.



3. Sustainable Blue Economy

La Economía Azul Sostenible es el nuevo enfoque que da la Unión Europea a la Economía Azul para incorporarla de pleno derecho a los esfuerzos que van a marcar el rumbo de la economía europea en los próximos años: el Pacto Verde Europeo y el Plan de Recuperación para Europa.

Es una manera de ver la economía que subraya la necesidad de invertir en investigación e innovación para conseguir que las actividades económicas en el sector marítimo reduzcan su impacto en el medio marino, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático, con el fin de lograr el objetivo de convertir a Europa en el primer continente climáticamente neutro en el mundo en 2050.

El programa Horizonte Europa, junto a instrumentos de financiación como el Fondo Europeo Marítimo, garantizan una base sólida en ciencia e innovación enfocada en:

- Preservar y restaurar los mares y océanos y eliminar la contaminación.
- Controlar el uso de los recursos que se

obtienen de mares y océanos para utilizarlos de manera más sostenible y renovable.

- Adaptación a las consecuencias del cambio climático.
- Cómo utilizar los recursos oceánicos para mitigar el cambio climático.
- Impulsar la innovación y ayudar a empresas del sector marítimo para fomentar la economía circular y las soluciones sostenibles.

Puedes ampliar información sobre la economía azul en el story map de nuestro [observatorio tecnológico](#).



4. Estado del arte

A continuación, se presenta el concepto de gemelo digital mediante el desarrollo de las distintas etapas que conlleva su evolución, desde la mera digitalización física hasta la incorporación de inteligencia al modelo.

El estado del arte recoge la situación de una determinada tecnología: lo más innovador o reciente con respecto a un arte específico

4.1. Maquetas digitales

La “maqueta digital” es un concepto empleado desde hace décadas en diferentes sectores como la arquitectura y la industria. Se trata de una representación digital de un activo que puede incluir una descripción más o menos detallada del mismo, indicando dimensiones, relación de componentes que lo conforman, materiales que lo componen, detalles constructivos o incluso propiedades físicas básicas en simulación (masa, densidad, momentos de inercia, centros de gravedad...).

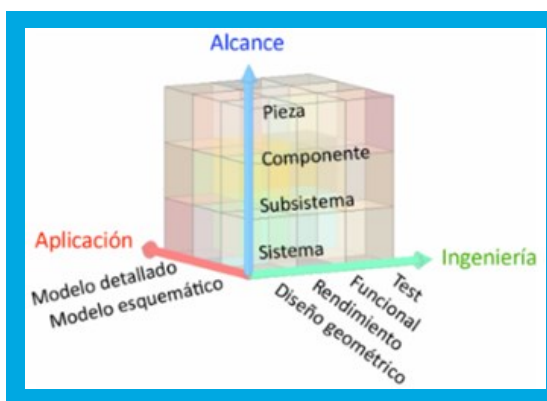
Una maqueta digital agiliza los flujos de información necesarios para facilitar los procesos durante todo el ciclo de vida del producto: acortando tiempos de diseño, validación o testeo¹ ya que, al ser una representación precisa, permite trabajar sobre todas estas fases sin tener que actuar directamente sobre los elementos físicos que está representando.

Para la consecución de una maqueta digital funcional se necesita el trabajo en diferentes aspectos, que conlleva la implementación de distintas tecnologías. A saber:

- Primero, se requiere la creación de un modelo tridimensional. Las maquetas digitales están altamente relacionadas con el CAD y el CAE, herramientas empleadas por ingenieros, arquitectos, proyectistas y diseñadores para el diseño y simulación de todo tipo de elementos, desde un avión de alta complejidad técnica y tecnología a un producto de uso cotidiano, pasando por una fábrica o un edificio. Ya sea desde

cero en el proceso de diseño o partiendo de planos, es posible realizar una representación 3D de gran detalle del objeto que se quiera representar. No obstante, hay que tener en cuenta que a la hora de modelar un objeto ya existente partiendo de planos, puede ocurrir que existan desviaciones entre la realidad y la maqueta resultante debido a inexactitudes en los planos o a modificaciones realizadas a posteriori en el objeto.

- Una vez que está disponible el modelo tridimensional, se debe disponer para que integre las propiedades físicas del activo. Una maqueta digital no se limita a un mero modelo 3D de este activo (con la localización y dimensiones de sus equipos y sistemas) sino que, además, integra toda su información funcional. De esta forma, el modelo tridimensional se utiliza como un recurso en herramientas de software,



que permiten replicar su funcionalidad mediante la interacción de usuarios. En este tipo de herramientas se crea una interfaz que permite dicha interacción, así como la lectura de los parámetros, o propiedades del activo. Estas herramientas se pueden clasificar en: a) “Tecnologías nativas para desarrollo web”, como las APIs para JavaScript Three.js (3D) y WebXR (Realidad Virtual y Realidad Aumentada); y b) “Motores gráficos” como Unity 3D y Unreal Engine que, si bien originalmente se concibieron para el desarrollo de videojuegos, actualmen-

1.- Stjepandic, J. et al. Digital Mock-up. Concurrent Engineering in the 21st Century: Foundations, Developments and Challenges, págs. 355-388 (2015).

te tienen aplicación como herramientas para distintos tipos de industrias.

- Cuando se ha integrado el modelo tridimensional con sus propiedades, y dotado de una interfaz que permita su interacción. Esta maqueta digital debe estar disponible a través de Internet. El principio del Cloud Computing es acceder mediante ordenadores, móviles o tablets a sistemas que se ejecutan en servidores encargados de almacenar, gestionar y servir la información ya procesada² (desde estados y previsiones en sistemas industriales hasta los contenidos de una web) tal y como define en el NIST Definition of Cloud Computing³. En este contexto, existen tres tipologías de infraestructura bien diferenciadas: a) infraestructuras on-cloud en los que los componentes de los sistemas y aplicaciones son utilizados remotamente en una infraestructura en la nube de un tercero, b) infraestructuras on-premise donde los sistemas y aplicaciones se alojan y gestionan en un Centro de Procesado Local, y c) infraestructuras híbridas, combinación de las dos soluciones anteriores buscando maximizar las ventajas de ambas.
- El último aspecto necesario para la consecución de una maqueta digital es su visualización, esto puede hacerse de forma tradicional en una pantalla, accediendo a la herramienta, ya dispuesta como un servicio en la nube, a través de un navegador web, e interactuando con su interfaz. Aunque existen métodos de visualización más

novedosos, como la Realidad Virtual o la Realidad Aumentada cuya implementación, en el contexto de una maqueta digital, ya es completamente viable⁴ y pueden ayudar a crear nuevas herramientas o flujos de trabajo que agilicen los tiempos y reduzcan los costes⁵. La realidad virtual (RV) y la realidad aumentada (RA) son dos tecnologías para la visualización de elementos tridimensionales, en las que los usuarios pueden interactuar de forma orgánica, por ejemplo, moviendo la cabeza o las manos. La RV sumerge a los usuarios en un entorno completamente virtual, mientras que la RA permite ver elementos tridimensionales superpuestos en el mundo real. En cuanto a la implementación de RV y RA un entorno web, accesible a través de un navegador, en 2018 entró en funcionamiento el standard WebXR, con una API (Application Program Interface) para JavaScript que permite la integración nativa en aplicaciones web de tecnologías de Realidad Virtual y Realidad Aumentada, así como la compatibilidad con distintos tipos de dispositivos, gafas y cascos que hacen uso de esta tecnología.

El objetivo que emerge, en lo tocante a maquetas digitales, es la evaluación y selección de las tecnologías necesarias para la creación de una representación digital tridimensional de un activo físico, que contenga sus propiedades y puedan ser evaluadas y manipuladas a través de una interfaz de usuario, y que esté disponible a través de

2. Alami Milani B., Jafari Navimipour, N. A comprehensive review of the data replication techniques in the cloud environments: Major trends and future directions, *Journal of Network and Computer Applications*, Volume 64, Pages 229-238, ISSN 1084-8045 (2016)

3. Peter Mell & Timothy Grance, *The NIST Definition of Cloud Computing - Recommendations of the National Institute of Standards and Technology* (2011)

4. LEIF P., Verg & JUDY M., Vance. Industry use of virtual reality in production design and manufacturing: a survey. Springer Nature. (2016)

5. LIAGKOU, Vasiliki & SALMAS, Dimitros, Realizing Virtual Reality Learning Environment for Industry 4.0. *Procedia Cirp*, volume 79. Págs 712-717 (2019).

un servicio en la nube, sea éste una solución comercial ya disponible, o desarrollado ex profeso para el proyecto.

En este sentido, en el presente proyecto se testearán, de una forma sistemática, distintas tecnologías para: el modelado tridimen-

sional, la inclusión de físicas y simulaciones, la disponibilidad en la Nube y la visualización de maquetas digitales; con objetivo de evaluar su grado de desempeño para el posterior desarrollo de un gemelo digital completo del proceso de medición hi-

4.2. Sombras digitales

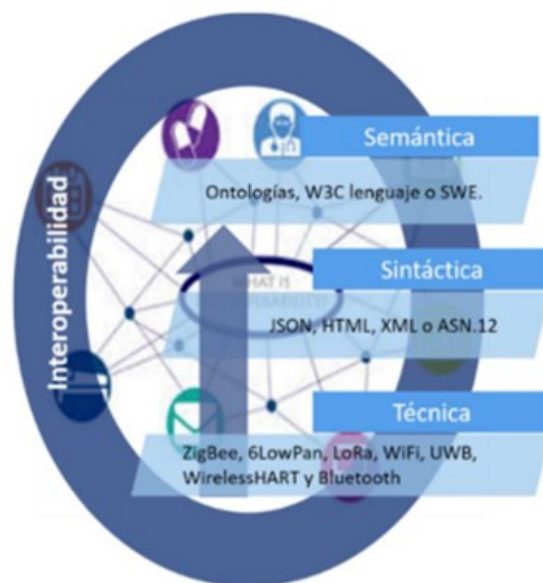
Gracias a las nuevas tecnologías digitales ya es posible conectar esas maquetas digitales con el activo real que representan estableciéndose un flujo de datos entre los mismos. Dentro de este paradigma cabe destacar el concepto de “sombra digital”⁶, que en esencia es una maqueta digital que se adapta de manera automática al estado del activo físico que representa mediante la información trasladada desde el activo real a la maqueta. Dicho de otra manera, una maqueta digital adquiere el concepto de sombra digital cuando esta se nutre de datos provenientes del activo físico y no al revés.

Así pues, las tecnologías habilitadoras de las sombras digitales, más allá de las usadas en las maquetas digitales, son aquellas relacionadas con la adquisición de los datos, tales como el **Internet de las Cosas** (IoT) y, más concretamente en este ámbito, el **Internet Industrial de las Cosas** (IIoT)⁷.

La implantación de IIoT ya está bastante avanzada o incluso empezando a ser una realidad en ciertos sectores siendo la evolución natural de los Sistemas de Control Industrial (ICS); si bien, es cierto que aún existen algunos retos tecnológicos relacionados que abordar como son la **interope-**

rabilidad y el intercambio de datos y **seguridad** orientada a la comunicación de datos tal y como se relata en el estudio científico ‘Interoperability and Security Challenges of Industrie 4.0’⁸.

Para optar por las soluciones adecuadas de interoperabilidad y seguridad en el contexto de las sombras digitales es recomendable abordar la problemática desde cada uno de los cuatro niveles definidos como: interoperabilidad técnica, sintáctica, semántica y organizativa⁹.



6. Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihni, W.. *Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification*. IFAC-PapersOnLine, 51(11), 1016–1022 (2018).

7. *ERCIM NEWS Number 115 Special Theme: Digital Twins*, 2018 <www.ercim.eu>.

8. Watson, V., Tellabi, A., Sassmannahausen, J. & Lou, X., Interoperability and Security Challenges of Industry 4.0. In: Eibl, M. & Gaedke, M. (Hrsg.), *INFORMATIK 2017*. Gesellschaft für Informatik, Bonn. (S. 973-985) (2017).

9. Pliatsios, Antonios & Goumopoulos, Christos & Kotis, Konstantinos. A Review on IoT Frameworks Supporting Multi-Level Interoperability - The Semantic Social Network of Things Framework. *International Journal on Advances in Internet Technology*. 13. 46-64. (2020).

Empresas líderes en tecnología han detectado el potencial de este mercado y han desarrollado una serie de herramientas y plataformas que ya se están implementando en varios sectores de manufactura¹⁰ y que junto con la industria automotriz¹¹ y aeronáutica son casos de éxito en los que fijarse para aprender de sus aciertos y errores. Algunas de estas plataformas y estándares son Siemens MindSphere, Eddin OEE, EcoStruxure™ de Schneider Electric, Azure Digital Twins o MTConnect standard factory device data.

A pesar de que la estandarización en cuanto a interoperabilidad e intercambio de datos está en un punto correcto de madurez

para ser testada e implementada en procesos productivos estándar de la industria 4.0, no se han localizado en la literatura científica ninguna solución concreta de interoperabilidad y seguridad para sombras digitales de laboratorios de metrología donde entre otras cosas, la precisión de los datos recogidos es de vital importancia.

Así pues, en el contexto del presente proyecto, la finalidad de este reto técnico es testear y analizar las opciones disponibles en el mercado en materia de interoperabilidad y seguridad de datos para avanzar en la construcción de la sombra digital del gemelo digital de un laboratorio de metrología.

4.3. Gemelos digitales

Por último, encontramos el concepto de “gemelo digital”¹², en el que el flujo de datos es bidireccional añadiendo a la sombra digital la capacidad de actuar y modificar el activo físico actuando directamente sobre la maqueta digital. se presentan como una tecnología disruptiva en la simulación y análisis de procesos industriales, capaz de expresar al máximo los beneficios de la transformación digital de planta, una transformación en la que ya se encuentran involucradas muchas empresas y que se intensificará en los próximos



años. Asimismo, el gemelo digital integra toda la algoritmia e inteligencia artificial que pueda aplicarse sobre los datos recogidos en su funcionamiento, realizando y mejorando modelos en base a los históricos y realizando predicción en tiempo real hacia futuro. Entonces, en relación con los apartados anteriores:

Una maqueta digital puede alcanzar el grado de gemelo digital cuando el mundo virtual y el físico se conectan y son capaces de interactuar bidireccionalmente. El progreso de este gemelo digital de nivel básico

10. BPX. Manufacturing Lighthouses show the way (2018) <https://news.bpx.co.uk/manufacturing-lighthouses/>

11. Ibermática Digital. Volkswagen: Analítica predictiva en la planta de producción de Navarra <https://bit.ly/3uQtSSH>

12. Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W.. *Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification*. IFAC-PapersOnLine, 51(11), 1016–1022 (2018).

hacia uno más avanzado estará determinado por la medida en que se relacionan ambos entornos (físico y virtual).

La unión de los mundos físico y virtual mediante gemelos digitales posibilita un análisis exhaustivo de la información, algo que combinado con soluciones de ‘big data’, internet de las cosas e inteligencia artificial permite llevar un riguroso control de los sistemas para evitar problemas, prevenir tiempos de inactividad, probar nuevas oportunidades de negocio, planificar escenarios futuros mediante simulaciones y personalizar la producción a partir de los requerimientos de los clientes.

Si bien existen ejemplos varios del uso de gemelo digital en el contexto de la Industria 4.0, si revisamos la literatura científica en busca de gemelos digitales para entornos de laboratorios de metrología en concreto, se puede afirmar que actualmente la investigación en este ámbito está poco avanzada y apenas existen ejemplos en este tipo de aplicación.

Apenas se pueden destacar dos ejemplos donde el ámbito de aplicación es cercano al que se está evaluando en este proyecto. El primero de ellos es un desarrollo de la Universidad Politécnica Salesiana¹³, que resultó en el desarrollo de un laboratorio remoto de un banco PLC para poder realizar prácticas para manejar, visualizar y manipular equipos industriales del banco de

trabajo de forma remota, mientras que el segundo, orquestado por la Universidad de Lisboa entre otros, es el llamado “Pharmaceutical quality control laboratory digital twin”¹⁴, donde se creó una plataforma de evaluación comparativa para estimar el rendimiento de una nueva instalación bajo modelos de gobernanza alternativos.

A pesar de no ser ejemplos que describan completamente la realidad de la problemática a la que el CTN se va a enfrentar en un gemelo digital de un laboratorio de metrología, se atisban al menos dos problemáticas comunes. En primer lugar, la dificultad tecnológica para recrear digitalmente los entornos de laboratorio con una precisión suficientemente alta, y en segundo, la latencia introducida por la red de comunicaciones que puede interferir en los propios procesos a llevar a cabo en este tipo de laboratorios.

Estos retos que plantea en este caso la ampliación de funcionalidad del ‘gemelo digital’ frente a la ‘sombra digital’ van a permitir, en el presente proyecto, establecer nuevos KPI’s en la evaluación de las tecnologías habilitadoras que se comentan claves en la recreación digital del laboratorio (‘maqueta digital’) y en la propia interconexión del posicionador y de los dispositivos de generación y adquisición de señales (‘sombra digital’).

4.4. Métodos de simulación acústicos

Tal y como se ha comentado en la introducción del presente apartado 4.1, una vez contextualizados los distintos alcances tecnológicos que supone la evolución de un gemelo

digital, desde una maqueta digital, pasando por una sombra digital, procedemos a abordar un estado del arte sobre las técnicas y metodologías de interés en los que se orien-

13. Carrera D E Ingeniería Mecatrónica, ‘Desarrollo de Un Laboratorio Remoto de Un Banco PLC En La Universidad Politécnica Salesiana Con

14. Miguel R. Lopes and others, ‘Pharmaceutical Quality Control Laboratory Digital Twin—A Novel Governance Model for Resource Planning and Scheduling’, *International Journal of Production Research*, 58.21 (2020).

tará el diseño e implementación del gemelo digital del proceso de medición hidroacústico del presente proyecto.

En este sentido, la acústica submarina como disciplina cuenta ya con cierta historia, dada su formalización como consecuencia de las extensas investigaciones militares en tecnología sónar de submarinos a lo largo de la primera mitad del siglo pasado.

Antes de ello, ya se había estudiado con mayor interés la acústica aérea y, en el caso que nos atañe, la propagación del sonido en recintos. En efecto, la teoría de reverberación de Sabine fue el primer acercamiento científico de cuantificar los mecanismos involucrados en la difusión del sonido en un recinto (cerrado), y todavía hoy día es usada para el cálculo del tiempo de reverberación (o alternativamente, la absorción acústica total) en recintos. Naturalmente, desde entonces han aparecido otros métodos analíticos para calcular esta variable, desde la temprana metodología de Eyring y Norris (1930) hasta otros más modernos como los de Fitzroy (1959) y Arau Puchades (1988). No obstante, no existe un método perfecto para todas las situaciones y se debe acudir a la modelización numérica y a la simulación para alcanzar un mejor nivel de precisión.

De similar forma, aunque existen ecuaciones analíticas de fácil aplicación que permiten conocer el nivel esperado de intensidad sonora en régimen reverberante y generado por una fuente conocida, los modelos analíticos realizan aproximaciones tales como asumir que la energía viaja por rayos incoherentes, y resultan insuficientes si el grado de precisión requerida en el estudio es significativa.

Cabe mencionar que los mayores avances se produjeron primero en la acústica aérea, de más habitual aplicación, y más tarde en la acústica submarina; en realidad, la dife-

rencia crucial entre ambos ámbitos, sin entrar más en profundidad, radica en únicamente el diferente medio transmisor de las ondas de vibración (aire versus agua), que cambia el valor de la impedancia acústica en las ecuaciones a resolver.

Respecto a la resolución de las ecuaciones que gobiernan la fenomenología acústica, existen tres tipos de modelos:

1. **Modelos analíticos**, de corte simplista, que sirven para dar una estimación la propagación acústica de forma muy rápida y eficiente, si bien algo burda.
2. **Modelos basados en aproximaciones físicas**, los cuales están fundamentos en aproximaciones a las ecuaciones (por lo demás, exactas) que permiten su resolución, tanto analítica como numérica de forma más sencilla, como la aproximación de teoría de rayos. En este conjunto, merece ser destacada la teoría de rayos, dada su histórica relevancia en el desarrollo de la modelización acústica computacional. Este acercamiento, análogo a la aproximación geométrica del electromagnetismo, por la que las ondas se representan como rayos viajando en las direcciones de los frentes de onda, han sido usados durante muchos años (desde ya los años 60) hasta el día de hoy. Mediante esta aproximación resulta directo calcular las reflexiones que se dan en un tanque de medición, así como los tiempos de reflexión que caracterizan el régimen de campo libre. A pesar de sus bondades, esta aproximación es inadecuada para bajas frecuencias, las cuales son habitualmente las más problemáticas en un experimento de caracterización acústica. Además de esta, existen otras aproximaciones, como la de modos normales y la aproximación para-

bólica, pero a pesar de su validez para problemas de mayor escala, en definitiva, todas presentan alguna limitación de aplicabilidad en problemas de condiciones arbitrarias.

3. **Métodos numéricos de resolución de ecuaciones diferenciales** genéricos: diferencias finitas, elementos finitos, elementos de contorno, y similares. Estos calculan la solución exacta de la ecuación diferencial de ondas, bajo geometrías arbitrarias; si bien por contra resultan computacionalmente costosos. Sin embargo, son estos métodos los que han ido acabando utilizándose para la caracterización de campos acústicos en problemas a pequeña escala (es decir, que no consistan en problemas de propagación a

larga distancia en entornos marinos) y/o con geometrías complejas, en los que la precisión sea muy importante. Aunque es cierto que aún pecan de pesadez de cómputo (por lo que han sido tradicionalmente desaconsejados), gracias a los avances tecnológicos tanto en hardware como software, son cada vez una opción más recomendable para abordar este tipo de problemas. Así pues, hoy en día existen multitud de programas de simulación física acústica; junto con los “gigantes” COMSOL Multiphysics (el módulo de Acústica) y Ansys, destacan los softwares de Siemens y MSC Software (Actran) como algunos de los principales simuladores acústicos en el mercado. Por otro lado, también existen proyectos de simulación acús-

4.5. Métodos estándar de medición acústica

Las mediciones hidroacústicas se emplean, tanto para la caracterización del comportamiento acústico de materiales bajo el agua, como para la caracterización, validación y calibración de transductores electroacústicos que trabajan bajo el agua (sónares, hidrófonos, ecosondas, etc.). A continuación, realizamos un estado del arte de las principales técnicas y metodologías estándares en cada uno para cada la realización de mediciones de ambos elementos:

Aplicación a caracterización de materiales submarinos

Al igual que sucede con los materiales que conforman los objetos y estructuras con los que tratamos o transitamos en el día a día, en el ámbito marino a menudo se necesita disponer de materiales con características excepcionales. Al igual que características estructurales (densidad, dureza, rigidez,

etc.) o electromagnéticas (polarizabilidad, magnetismo, etc.) (entre otras), las propiedades acústicas, que conforman aquellos parámetros que tienen que ver con la interacción del material con fenómenos acústicos, tienen relevancia en cualquier infraestructura (tanto marina como no marina). En general, estas propiedades acaban teniendo que ver con la reflexión, absorción y transmisión de ondas acústicas por parte del material; en este sentido, tanto materiales aislantes (anecoicos) como reflectores, pasando por “invisibles”, son algunos de los principales tipos demandados.

Naturalmente, estos materiales deben caracterizarse acústicamente para asegurar que satisfacen unos estándares. Esto puede realizarse tanto indirectamente (a través de la determinación de los módulos de compresibilidad, cizalla y de Young dinámico), como directamente, mediante la experimentación acústica. En cuanto esta última, la práctica común consiste en medir la in-

fluencia que una muestra del material ocasiona en un campo acústico conocido; así, los parámetros habituales son las pérdidas por reflexión y las pérdidas por transmisión, a partir de las que se pueden hallar los coeficientes de absorción de reflexión, transmisión, absorción, e incluso la velocidad del sonido en el material.

Para realizar dicha caracterización, existen dos métodos principales: el de tubo de impedancia (originalmente ideado para caracterización en aire – de hecho, existe una norma ISO¹⁵ para ello), por el que la muestra se insonoriza por una onda cuasi plana gracias a la configuración particular del tubo (con una ratio longitud/diámetro suficientemente grande); y el método por paneles, en el que se hacen incidir las ondas sobre una muestra del material en forma de panel. En ambos casos, el procedimiento es similar, y consiste en medir, mediante hidrófonos, la diferencia entre campos acústicos transmitidos (o reflejados) con y sin el material. Por tanto, los hidrófonos son instrumentos clave en la caracterización acústica, y en consecuencia deben estar también correctamente caracterizados y calibrados.

Aplicación a caracterización de materiales submarinos

Un hidrófono o, en general, un transductor, es un dispositivo capaz de convertir estímulos mecánicos (en este caso, vibración del

material) a señales eléctricas, y viceversa, y que está diseñado específicamente para funcionar sumergido en agua; de esta manera, puede funcionar tanto como emisor de señales acústicas como receptor de estas. En cuanto a la calibración en sí, lo que se pretende evaluar es realmente la sensibilidad del hidrófono, dada en dB @ 1 V/μPa. La calibración de hidrófonos en frecuencias en el intervalo 0.01 Hz a 1 MHz está regulada por los estándares internacionales (recientemente actualizados) IEC 60565-1:2020 e IEC 60565-2:2019.

Podemos encontrar dos categorías amplias de técnicas de calibración: las técnicas primarias y las secundarias. Las primarias son aquellas en las que no hace falta utilizar un hidrófono auxiliar calibrado, y las secundarias son aquellas que sí necesitan de dicho transductor. Algunas de las principales técnicas empleadas en laboratorios de calibración son las técnicas por reciprocidad por tres transductores en campo libre, por columna de agua vibratoria, por compensación piezoeléctrica y por reciprocidad en cámara de acople, entre otras.

Por último, un aspecto esencial en caracterización acústica es el cálculo de incertidumbres asociadas a las medidas, o metrología en general. Los procedimientos y consideraciones necesarias están recogidas tanto en las normas previamente mencionadas como en la Guía para la expresión de la incertidumbre de la medida¹⁶ (GUM), que es el documento internacional de referencia para la expresión de la incertidumbre

4.6. Métodos más allá de los estándares

Lo anteriormente descrito aplicaba para métodos de caracterización y calibración acústica hallados en los estándares. En este apartado se examinarán otros métodos que

se proponen para circunvalar las limitaciones específicas de los anteriores. En concreto, empezando ahora por la calibración de hidrófonos, y dado que no existe un estudio

15. UNE-EN-ISO 10534-1:2002 (Y VERSIÓN –2).

16. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (2008).

sistemático de la aplicabilidad de estas técnicas “no estándar” a la calibración de hidrófonos, se muestran algunos resultados de estudios propios del CTN y de otras instituciones que plantean la calibración en condiciones alternativas:

- **Utilización de señales de banda ancha:** este tipo de señales (sweeps, mls, rikkers, etc.) permiten acortar los tiempos de medida y, por ende, reducir el espacio en el que se realicen las medidas¹⁷. Estas técnicas muestran un avance, sobre todo en la detección de las señales con las que se calibra, pero manifiestan una mayor incertidumbre en los valores de amplitud finalmente obtenidos. No obstante, a partir de los estudios desarrollados en el proyecto “Nuevas Técnicas de Calibración en Baja Frecuencia (NTP-f)”, financiado por el INFO, el CTN ha estudiado técnicas de calibración de hidrófonos consistentes en la utilización de señales de banda ancha como sweeps para, por una parte, realizar mediante una única medida un barrido de las frecuencias de interés y, por otra, discriminar la señal directa y reflexión, así como reconstruir sus amplitudes¹⁸.
- **Empleo de técnicas no lineales:** mediante el efecto paramétrico es posible generar campos acústicos de baja

frecuencia a partir de la emisión de haces de alta frecuencia, de modo que su directividad es tan estrecha como la inherente del régimen de alta frecuencia. Este fenómeno ha sido ampliamente teniendo, considerando diferentes grados de complejidad (influencia de la absorción, de la difracción, etc.), así como experimentos que avalan la aplicabilidad de estas soluciones^{19,20,21,22}. Así, al emplear haces más directivos, se reducen las reflexiones laterales y se tiene una mejor discriminación de la señal directa, que es la utilizada en la calibración.

- **Medición en campo reverberante:** mediante este método es posible caracterizar la potencia acústica de un transductor en un ambiente de campo reverberante generado en un tanque de características conocidas. Se trata de un método prometedor en cuanto a que soluciona el problema de las dimensiones del tanque en bajas frecuencias, aunque presenta la desventaja de que no permite, en principio, hallar la directividad del transductor. Según un estudio²³ del año 2000, se obtuvieron medidas para la potencia espectral de un transductor con incertidumbres de menos de 1.5 dB, para frecuencias de entre 1 kHz y 20 kHz. Otro estudio más reciente²⁴ desarrolla en detalle un posible método para ob-

17. K.G.Foote, D.R.I.Francis, P.R.Atkins. Calibration sphere for low-frequency parametric sonars., JASA, 121 (3), (March 2007).
18. I.Felis, et al. Nuevas técnicas de calibración de hidrófonos en baja frecuencia con relación a la MSFD. (Aceptado para presentación en XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-. (2018) .
19. H.O.Berkday , D.J.Leahy, Farfield performance of parametric transmitters. JASA 55(3), (1974).
20. R.H.Mellen, M.B.Moffett, Effective lengths of parametric acoustic source. JASA 70(5), (1981).
21. J.S.Tjotta, N.Tjotta, Interaction of sound waves. Part I Basic equations and plane waves. JASA 82(4), (1987).
22. P.Cervenka, P.Alai, Fourier formalism for describing nonlinear self-demodulation of a primary narrow ultrasonic beam. JASA 88(1), (1990).
23. N. Cochard, J-L Lacoume. Underwater acoustic noise measurement in test tanks», IEEE Journal of Oceanic Engineering, (2000).
24. K.L Gemba, E-M. Nosal. Source characterization using recordings made in a reverberant underwater channel. Applied Acoustics 105, 24-34, (2016)

tener la potencia de fuentes acústicas desconocidas en ambientes imperfectos (sin paneles anecoicos), según técnicas tomadas de la acústica en aire, si bien los errores en los resultados obtenidos son muy significativos.

En cuanto a la caracterización de materiales, concretamente por el método de paneles, hay que recalcar que las restricciones espaciales que se dan en los laboratorios limitan la idoneidad del uso del método tradicional de presión usando un solo hidrófono. Por un lado, se tiene que la difracción del campo acústico que se produce en los bordes de los paneles ensayados hace que las señales lleguen a los hidrófonos prácticamente a la vez que las señales reflejadas y transmitidas. Por otro, para mediciones de la pérdida por reflexión, si la onda incidente no es plana, es necesario corregir las mediciones para tener en cuenta las pérdidas por divergencia del frente de ondas. Además, cuando se reduce la frecuencia de ensayo, el tamaño del panel debe aumentar para evitar la influencia perturbadora de las ondas originadas en los bordes del panel²⁵.

Aunque podría resultar atractiva la idea de realizar las mediciones al “aire libre” para evitar estas problemáticas asociadas al tamaño y distancias relativas de material, tanque e hidrófonos, estas conllevan una incertidumbre en la medida muchísimo mayor debido a las condiciones ambientales incontrolables. En este contexto, se han propuesto más métodos alternativos de medición, tales como usar técnicas de procesamiento de señal avanzadas, colocar hidrófonos en la superficie del material, o usar fuentes direccionales para así conseguir un haz contenido en el ángulo sólido abarcado por

el panel²⁶.

A la luz de lo comentado, y recalcando la importancia de la correcta evaluación de incertidumbres en las medidas, CTN pretende alcanzar un nuevo estándar de precisión mediante la sensorización integrada, la aplicación de simulación, y la implementación de un gemelo digital del tanque de mediciones, que permitirá testear con mayor validez y facilidad diferentes técnicas de caracterización de materiales y de calibración de hidrófonos.

25. Fu, Y., Kabir, I. I., Yeoh, G. H., & Peng, Z. A review on polymer-based materials for underwater sound absorption. *Polymer Testing*, 96 (February), 107115. (2021).

26. B. Zequiri, W. Scholl. Measurement and testing of the acoustic properties of materials: a review. *Metrologia* (2010).

5. Tendencias

5.1. Literatura científica

A comprehensive review of the data replication techniques in the cloud environments: major trends and future directions

Autor: Bahareh Alami Milani, Nima Jafari Navimipour,

Publicado en: Journal of Network and Computer Applications 64:229-238.

Abstract: Nowadays, in various scientific domains, large data sets are becoming an important part of shared resources. Such huge mass of data is usually stored in cloud data centers. Therefore, data replication which is generally used to manage large volumes of data in a distributed manner speeds up data access, reduces access latency and increases data availability. However, despite the importance of the data replication techniques and mechanisms in cloud environments, there has not been a comprehensive study about reviewing and analyzing its important techniques systematically...

The NIST definition of cloud computing

Autor: Peter Mell, Tim Grance,

Publicado en: SP 800-145

Abstract: Cloud computing is a model for enabling ubiquitous, convenient, on-

demand network access to a shared pool of configurable computing resources (e.g., networks, servers, storage, applications, and services) that can be rapidly provisioned and released with minimal management effort or service provider interaction. This cloud model is composed of five essential characteristics, three service models, and four deployment models.

Industry use of virtual reality in product design and manufacturing: a survey

Autor: Leif P. Berg, Judy M- Vance,

Publicado en: Virtual Reality 21(1).
DOI: 10.1007/s10055-016-0293-9

Abstract: In 1999, Fred Brooks, virtual reality pioneer and Professor of Computer Science at the University of North Carolina at Chapel Hill, published a seminal paper describing the current state of virtual reality (VR) technologies and applications (Brooks in IEEE Comput Graph Appl 19(6):16, 1999). Through his extensive survey of industry, Brooks concluded that virtual reality had finally arrived and “barely works”. His report included a variety of industries which leveraged these technologies to support industry-level innovation. Virtual reality was being employed to empower decision making in design, evaluation, and training processes across multiple disciplines...

Realizing Virtual Reality Learning Environment for Industry 4.0

Autor: Vasiliki Liagkou, Dimitrios Salmas, Chrysostomos Stylios,

Publicado en: Procedia CIRP 79:712-717.
DOI: 10.1016/j.procir.2019.02.025

Abstract: The scope of Industry 4.0 is to overlay a simulation on a real-time production line that can investigate poorly understood phenomena and aid the rectification of bottlenecks. VR application in Industry 4.0 allows companies to decrease design and production costs, maintain product quality and reduce the time needed to go from product concept to production...



Digital Twin in manufacturing: a categorical literature review and classification

Autor: Werner Kritzinger, Matthias Karner, Georg Traar, Jan Henjes, Wilfried Sihn,

Publicado en: IFAC -PapersOnLine 51 (11):1016-1022.
DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474

Abstract: The Digital Twin (DT) is commonly known as a key enabler for the digital transformation, however, in literature is no common understanding concerning this

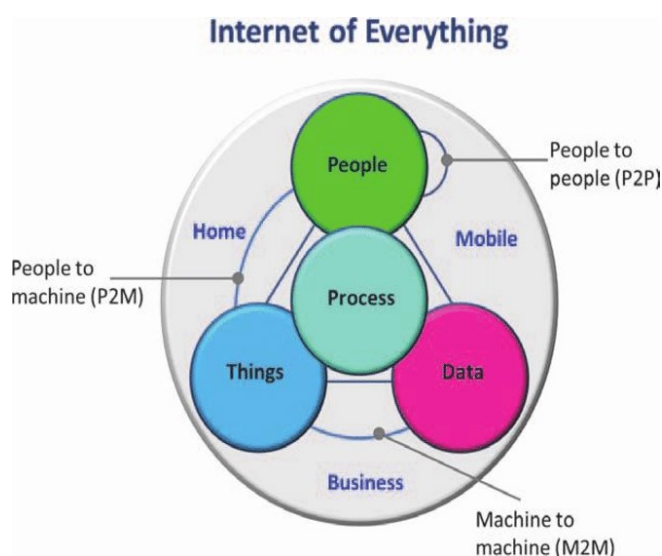
term. It is used slightly different over the disparate disciplines. The aim of this paper is to provide a categorical literature review of the DT in manufacturing and to classify existing publication according to their level of integration of the DT. Therefore, it is distinct between Digital Model (DM), Digital Shadow (DS) and Digital Twin....

Interoperability and Security Challenges of Industry 4.0

Autor: Venesa Watson, Asmaa Tellabi, Jochen Sassmannhausen, Xinxin Lou,

Publicado en: INFORMATIK 2017:973-985.
DOI: 10.18420/in2017_100

Abstract: Industrie 4.0 (I4.0) is the fourth industrial revolution, which will see the digital transformation of manufacturing, through the integration on Industrial Internet of Things (IIoT, Data and Services, and the convergence of Information Technology (IT) and Operational Technology (OT). With any such transformation, there exists challenges that must first be addressed for a successful outcome...



A review on IoT frameworks supporting multi-level interoperability – The semantic social network of things framework

Autor: Antonios Pilatsios, Christos Goumopoulos, Konstantinos I. Kotis,

Publicado en: International Journal on Advances in Internet Technology 13(1):46-64.

Abstract: The Internet of Things (IoT) paradigm advocates the massive use of sensing and communication technologies embedded in the physical world, which provides the potential to collect huge volumes of data and connect them to intelligent systems. As the number of IoT devices is increasing with geometric progress, ensuring interoperability and handling of the big heterogeneous data they generate is of major importance for the development of smart applications and services...

Pharmaceutical quality control laboratory digital twin – A novel governance model for resource planning and scheduling

Autor: Miguel Lopes, Andrea Costigliola, Rui M. Pinto, Susana Vieira,

Publicado en: International Journal of Production Research 58(21):1-15.
DOI: 10.1080/00207543.2019.1683250

Abstract: A digital twin of pharmaceutical quality control laboratory was developed and employed as a benchmarking platform to estimate the performance of a new facility under alternative governance models. Key performance metrics, such as sample

processing times and utilisation rates of analytical staff and equipment were computed and compared under alternative governance scenarios, to determine solutions to be implemented in practice...

Calibration sphere for low-frequency parametric sonars

Autor: Kenneth G. Foote, David T. I. Francis, Philip R. Atkins,

Publicado en: The Journal of the Acoustical Society of America 121.
DOI: 10.1121/1.2434244

Abstract: The problem of calibrating parametric sonar systems at low difference frequencies used in backscattering applications is addressed. A particular parametric sonar is considered: the Simrad TOPAS PS18 Parametric Sub-bottom Profiler. This generates difference-frequency signals in the band 0.5-6 kHz. A standard target is specified according to optimization conditions based on maximizing the target strength consistent with the target strength being independent of orientation and the target being physically manageable...

Nuevas técnicas de calibración de hidrófonos en baja frecuencia con relación a la MSFD

Autor: Iván Felis, Pablo Cervantes, Pablo Ruiz Molina, Rosa Martínez Álvarez-Castellanos, Hamid Er-Rachdi

Publicado en: Tecniacústica

Abstract: In order to meet with the requirements of Descriptor 11, regarding the

quantification of underwater noise, of the marine strategy framework directive (MSFD), it is necessary to perform low frequency measurements below 10 kHz. Hydrophone calibration in this low frequency range according to international standards (IEC60565) it is required to use large installations, allowing times without very large echoes. In this presentation, the CTN proposes new techniques for calibrating hydrophones, beyond the standards, which allow calibrations at low frequencies in more moderate installations...



Farfield performance of parametric transmitters

Autor: H. Berktaý, D. Leahy,

Publicado en: Journal of the Acoustical Society of America 55(3).
DOI: 10.1121/1.1914533

Abstract: Since Westervelt's original proposal [J. Acoust. Soc. Am. 35, 535–537(1963)] that nonlinear acoustic interactions may be used to produce relatively narrow beams of sound at relatively low frequencies, a great deal of effort has gone into the study of parametric transmitting arrays, both experimentally and theoretically. In this pa-

per, the behaviour of such arrays in their farfield is studied, neglecting higher-order interaction effects. Results are presented in the form of normalized curves and simplified equations which can be used for the preliminary design of such devices.

Effective lengths of parametric acoustic sources

Autor: M. Moffett, R. Mellen,

Publicado en: Journal of the Acoustical Society of America 70(5).
DOI: 10.1121/1.1914533

Abstract: Computations of effective virtual source array lengths for parametric acoustic sources are presented. The effective length is defined as the distance from the primary projector where the difference frequency source level is 1 dB different from (it may be greater or less than) the far-field value. For absorption-limited (i.e., low primary level) sources, the parameter, $2\alpha_{\text{eff}}$ (where α is the primary absorption coefficient and reff is the effective length), is plotted as a function of the single variable, $2\alpha R_0 f_0 / f$ (where R_0 is the Rayleigh length, f_0 the primary frequency, and f the difference frequency). For $2\alpha R_0 f_0 / f \ll 1$, $2\alpha_{\text{eff}} \propto 1/2$. For $2\alpha R_0 f_0 / f \gg 1$, $2\alpha_{\text{eff}}$ increases by an order of magnitude. As the primary level is increased, the parametric source becomes saturation-limited, and no such simple scaling exists. Results covering a range of useful cases are presented for reff/R_0 .

Fourier formalism for describing nonlinear self-demodulation of a primary narrow ultrasonic beam

Autor: Pierre Cervenka, Pierre Alais,

Publicado en: The Journal of the Acoustical Society of America 88.

DOI: 10.1121/1.399926

Abstract: Presented here is the derivation of nonlinear interactions that occur within a primary narrow beam for which the temporal spectrum is continuous and narrow. This follows the bases of the Fourier formalism. Acoustics levels are presumed weak enough so that second-order equations may be used. In the quasilinear case, the exact theoretical expression of the created parametric farfield, formed from a transient modulated primary signal, is established, by using weakly restrictive assumptions. The case of high primary levels is discussed. Some experimental results are presented.

Underwater acoustic noise measurement in test tanks

Autor: Nicolas Cochard, Jean-Louis Lacoume, P. Arzelies, Y. Gabillet,

Publicado en: IEEE Journal of Oceanic Engineering 25(4):516-522.

DOI: 10.1109/48.895359

Abstract: The range capability of underwater acoustic equipment installed onboard underwater vehicles is limited by the noise generated by propellers, hydraulic pumps.... Measuring this noise at sea is quite expensive. Here is described a procedure

allowing the measurement of the radiated noise in test tanks. This method is derived from techniques previously developed in aerial acoustics and in electromagnetism...

Source characterization using recordings made in a reverberant underwater channel

Autor: Kay L.Gemba, Eva-Marie Nosal,

Publicado en: Applied Acoustics 105:24-34.
DOI: 10.1016/j.apacoust.2015.11.008

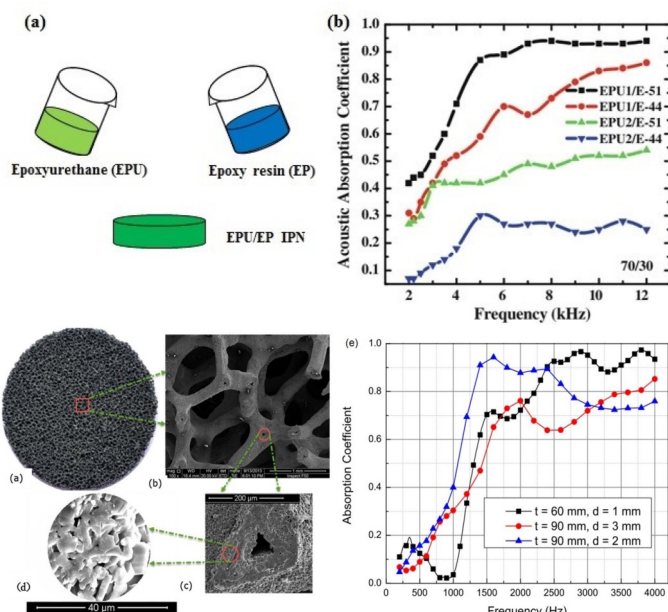
Abstract: The ability to accurately characterize an underwater sound source is an important prerequisite for many applications including detection, classification, monitoring and mitigation. Unfortunately, anechoic underwater recording environments required to make ideal recordings are generally not available. This paper presents a practical approach to source characterization when working in an imperfect recording environment; the source spectrum is obtained by equalizing the recording with the inverse of the channel's impulse response (IR). An experiment was conducted in a diving well (depth of 5.18 m) using a logarithmic chirp to obtain the IR...

A review on polymer-based materials for underwater sound absorption

Autor: Yifeng Fu, Imrana I. Kabir, Guan Heng Yeoh, Zhongxiao Peng,

Publicado en: Polymer Testing 96:107115.
DOI: 10.1016/j.polymertesting.2021.107115

Abstract: Greater demands for underwater sound absorption materials have been growing due to the concern about underwater noise control in water. Among the range of existing materials, polymer-based materials are increasingly being utilized as underwater sound absorption materials. In this paper, different kinds of polymer-based materials for underwater sound absorption with regards to key factors associated with sound absorption properties, measurements, applications, and mechanisms are reviewed and summarized...



Measurement and testing of the acoustic properties of materials: a review

Autor: Yifeng Fu, Imrana I. Kabir, Guan Heng Yeoh, Zhongxiao Peng,

Publicado en: Metrologia 47(2).
DOI: 10.1088/0026-1394/47/2/S13

Abstract: A review is presented of methods of measurement for a range of key acoustic properties of materials, spanning three ap-

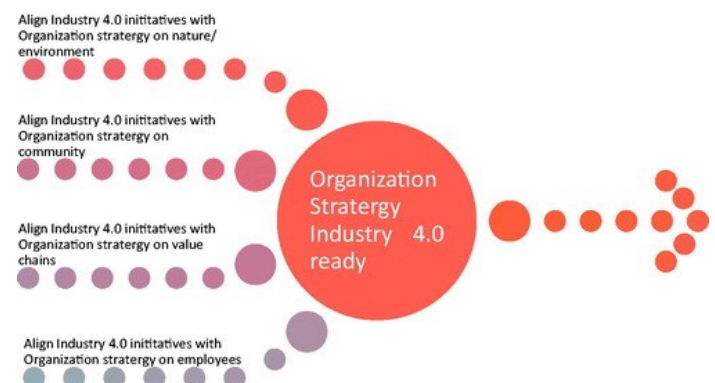
plication areas: airborne sound, underwater acoustics and ultrasound. The acoustic properties considered, primarily transmission loss (damping) and echo-reduction, are specifically important to the end application of any material. The state-of-the-art in measurement and likely future challenges are described in detail...

Critical factors for the successful implementation of Industry 4.0: a review and future research direction

Autor: Yifeng Fu, Imrana I. Kabir, Guan Heng Yeoh, Zhongxiao Peng,

Publicado en: Production Planning and Control 31(3):1-17. DOI: 10.1080/09537287.2019.1691278

Abstract: Industry 4.0 symbolizes the fourth industrial revolution and the current trend of automation and data exchange in manufacturing technologies. The purpose of this article is to examine the research question on how to successfully implement Industry 4.0 in organizations. This study through a systematic literature review protocol proposed by Tranfield, Denyer, and Smart analyzed 84 articles in depth. The descriptive, categorical and thematic analysis of the literature is conducted. This study



identifies 10 critical success factors which are necessary for the successful implementation of Industry 4.0 in the organization. Based on the 10 critical success factors 10

research directions in this area is further expounded...

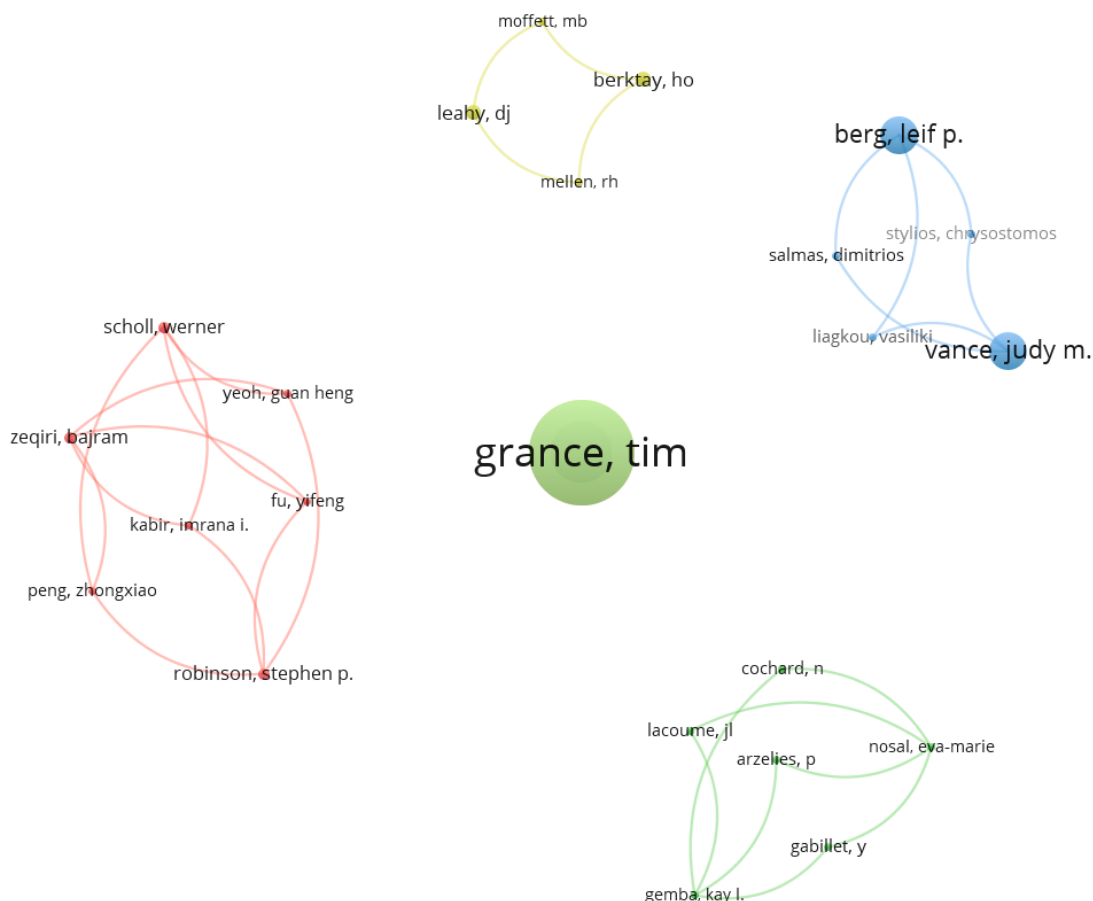
5.1.1. Análisis de tendencias en la literatura

Para el análisis de tendencias de la literatura relacionada con los gemelos digitales y la medición hidroacústica, se han analizado 10 de los 12 artículos propuestos en el apartado anterior, con el objetivo de conocer las relaciones entre ellos según las relaciones entre sus autores, país o **entidad a la que pertenecen**.

En el siguiente mapa, cada nodo representa a un autor y los enlaces indican las relaciones entre unos y otros. El color de cada uno de los autores determina el clúster al que pertenece. Por otro lado, la distancia entre

dos autores marca su relación en función de las citas. En general, cuanto más cerca están, mayor es su relación. A continuación, haremos un análisis de los principales clústeres.

El **primer clúster (color rojo)** está formado por los autores (ordenados por el número de citas): Robinson, Stephen P.;Scholl, Werner;Zeqiri, Bajram;Fu, Yifeng;Kabir, Imrana I.;Peng, Zhongxiao;Yeoh, Guan Heng

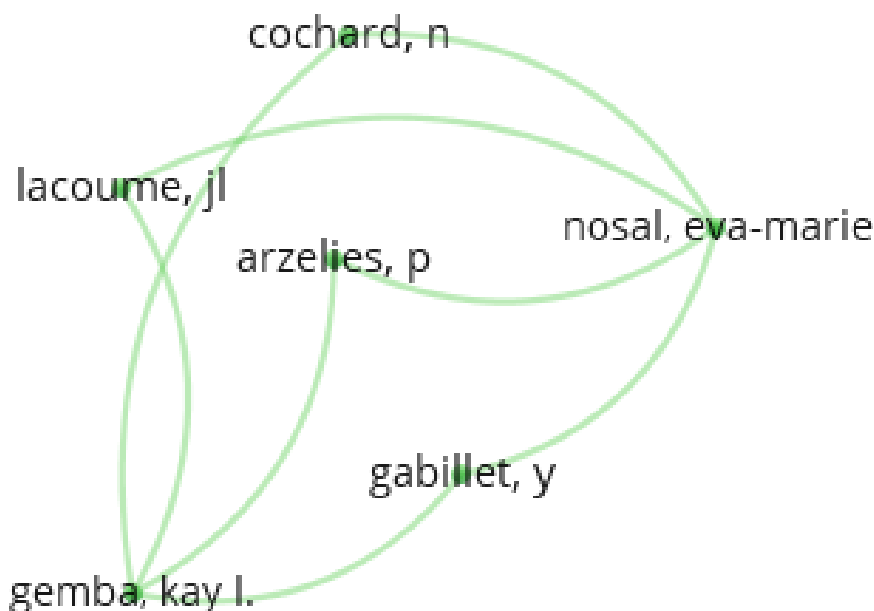


Mapa de Autores



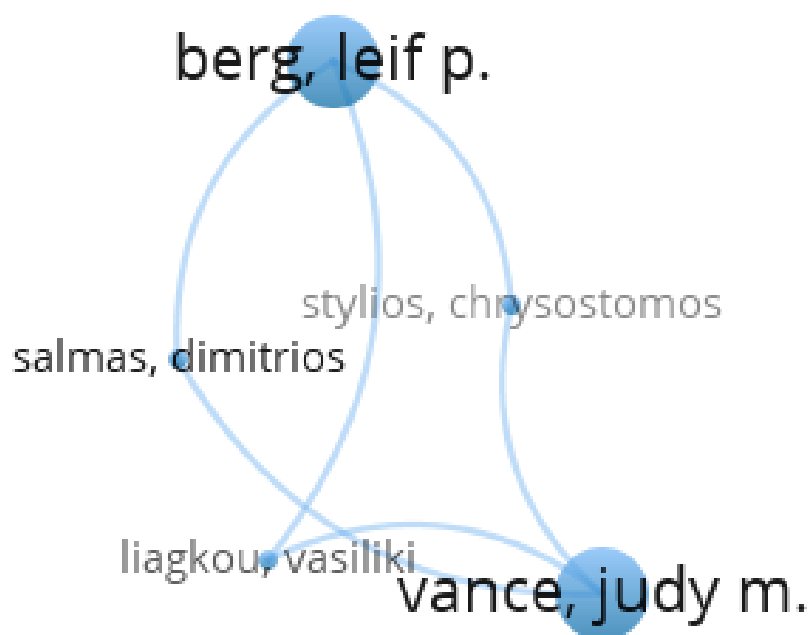
Detalle de los autores del Clúster 1

El segundo **clúster (de color verde)** está formado por los autores (ordenados por números de citas): Arzelies, P; Cochard, N; Gabillet, Y; Lacoume, JI; Gemba, Kay L.; Nosal, Eva-Marie



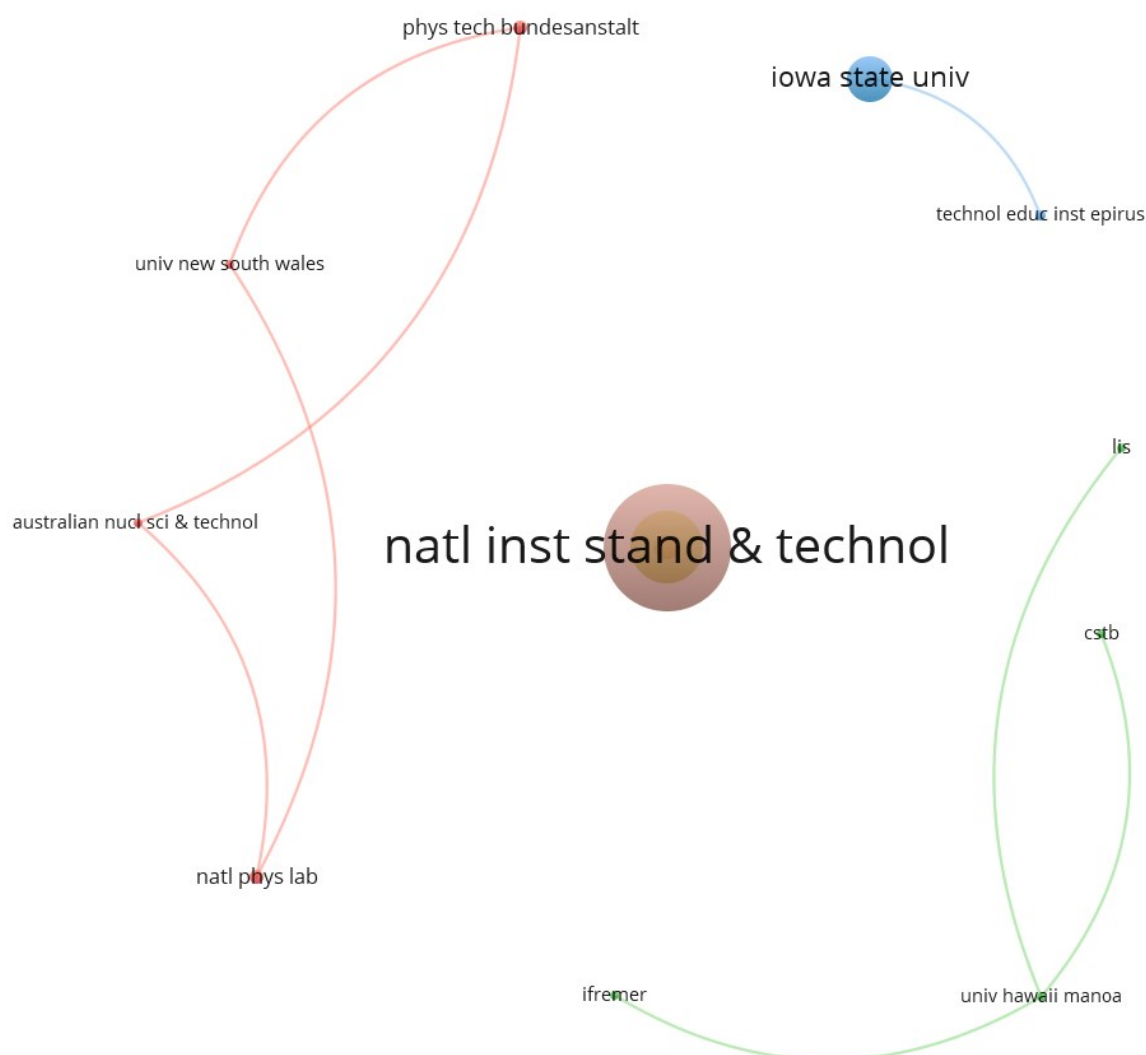
Detalle del Clúster 2

Por último, el **tercer clúster (color azul)** está formado por los autores (ordenados por números de citas): Berg, Leif P.; Vance, Judy M.; Liagkou, Vasiliki; Salmas, Dimitrios; Stylios, Chrysostomos

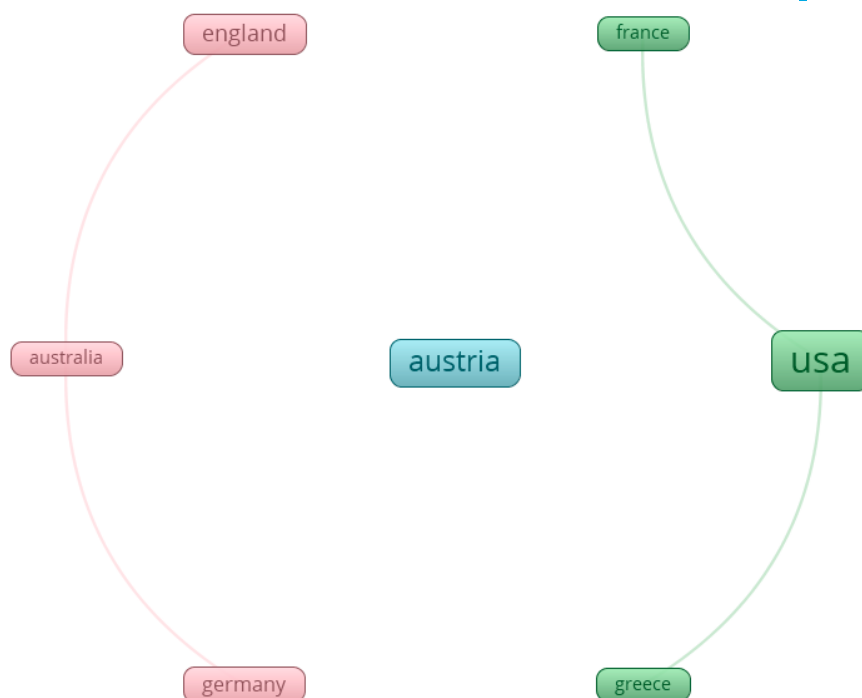


Detalle de los autores del Clúster 3

En los siguientes gráficos se muestra la relación por entidades y países de los documentos analizados en el apartado [5.1 Literatura científica.](#)



Mapa de citas por entidades



Mapa de citas entre países

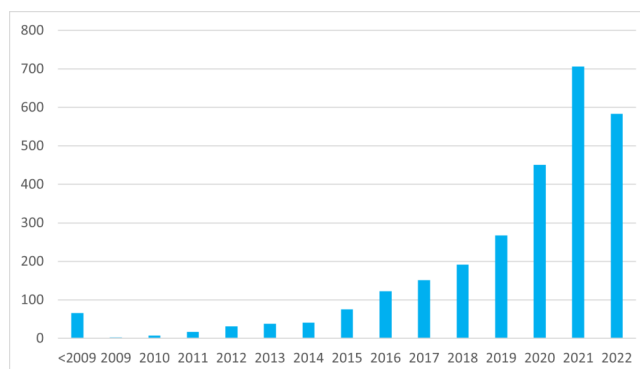
Según el número de citas de cada publicación, en la siguiente tabla y gráfico podemos observar que el número de referencias da un salto en entre los años 2011-2015 (202) y sigue creciendo hasta llegar superar las 2450 citas en 2022.

Años	Total de citas
<2009	66
2009	2
2010	7
2011	17
2012	31
2013	38
2014	41
2015	75
2016	122
2017	151
2018	192
2019	267
2020	451
2021	706
2022	583

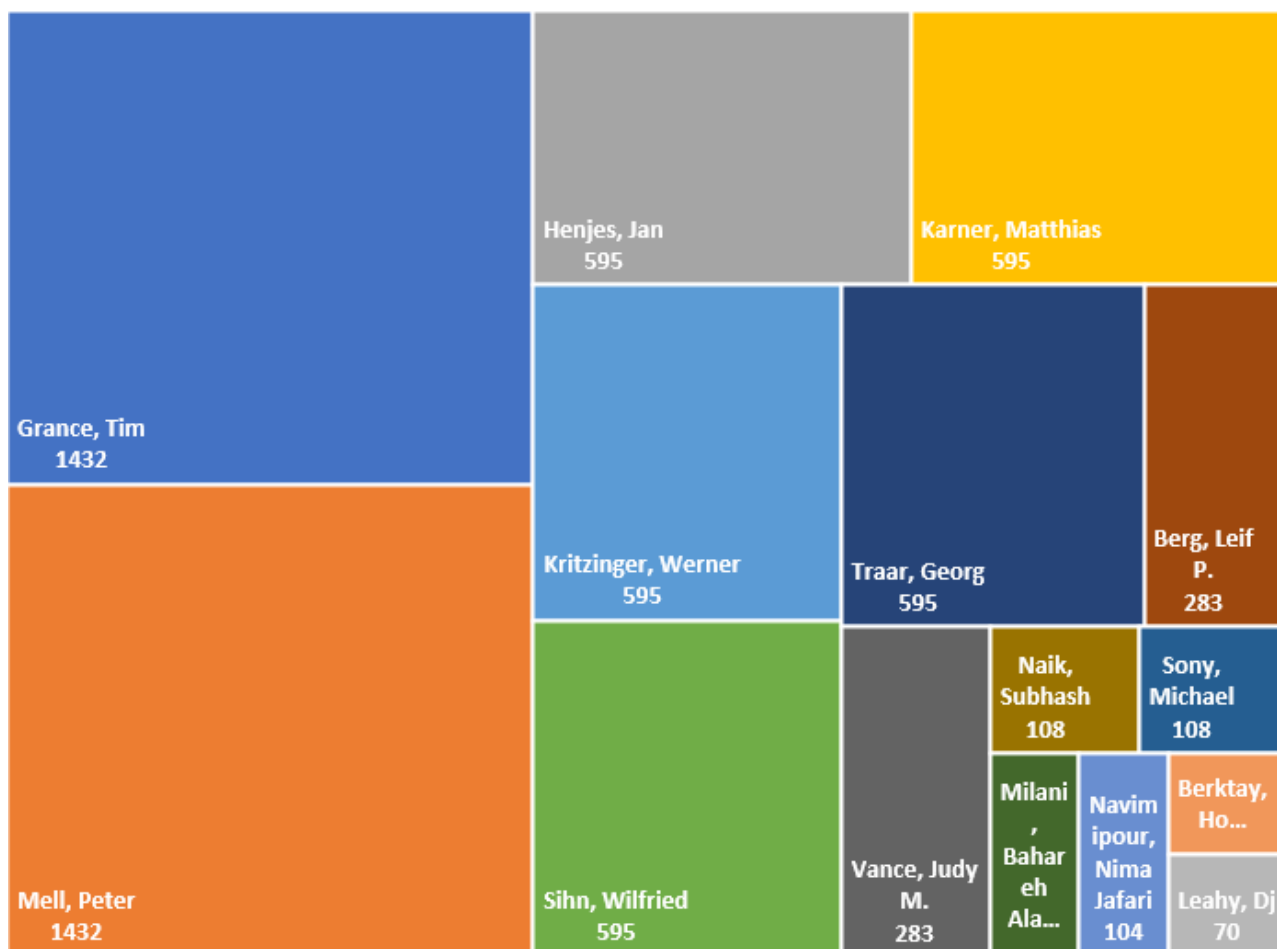
La **Tabla** indica que el 100% de los documentos analizados ha sido citado al menos una vez. El 80% ha sido referenciado más de diez veces y hasta el 66,65% ha sido citado más de cincuenta veces.

En el siguiente mapa podemos ver quiénes de los 73 autores de las publicaciones analizadas, son los más influyentes.

Los cinco autores más citados (Jan Henjes, Werner Kritzinger, Matthias Karner, Wilfried Sihm y Georg Traar, 266) pertenecen al clúster 1.



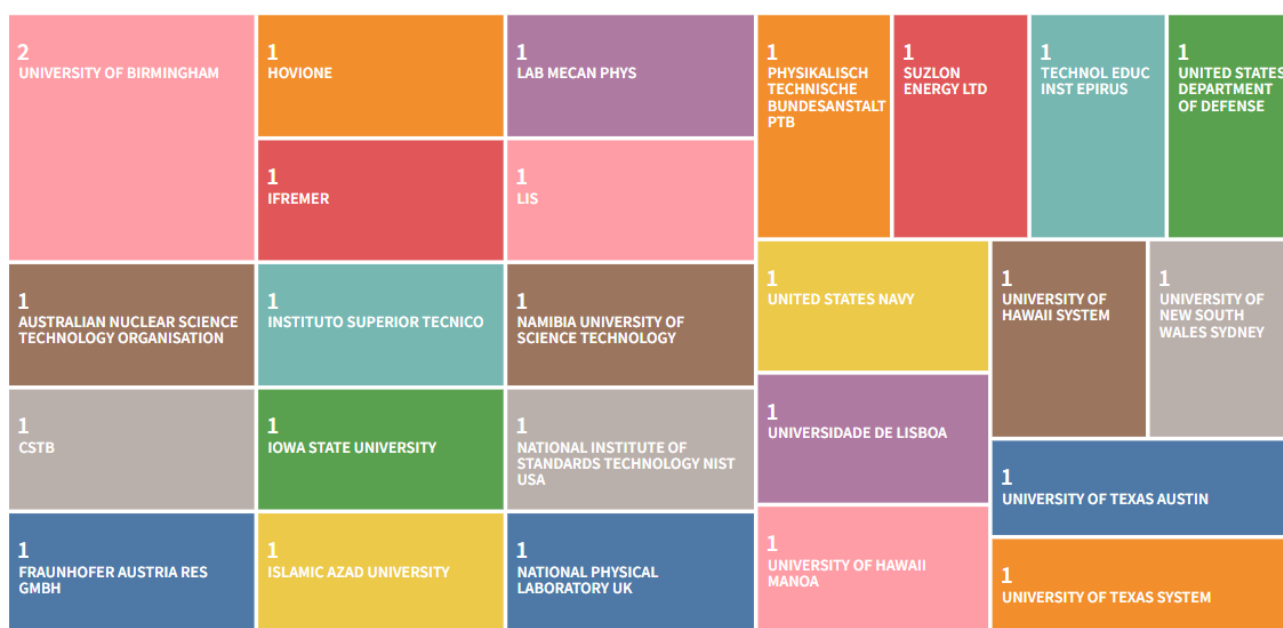
Evolución del número de citas



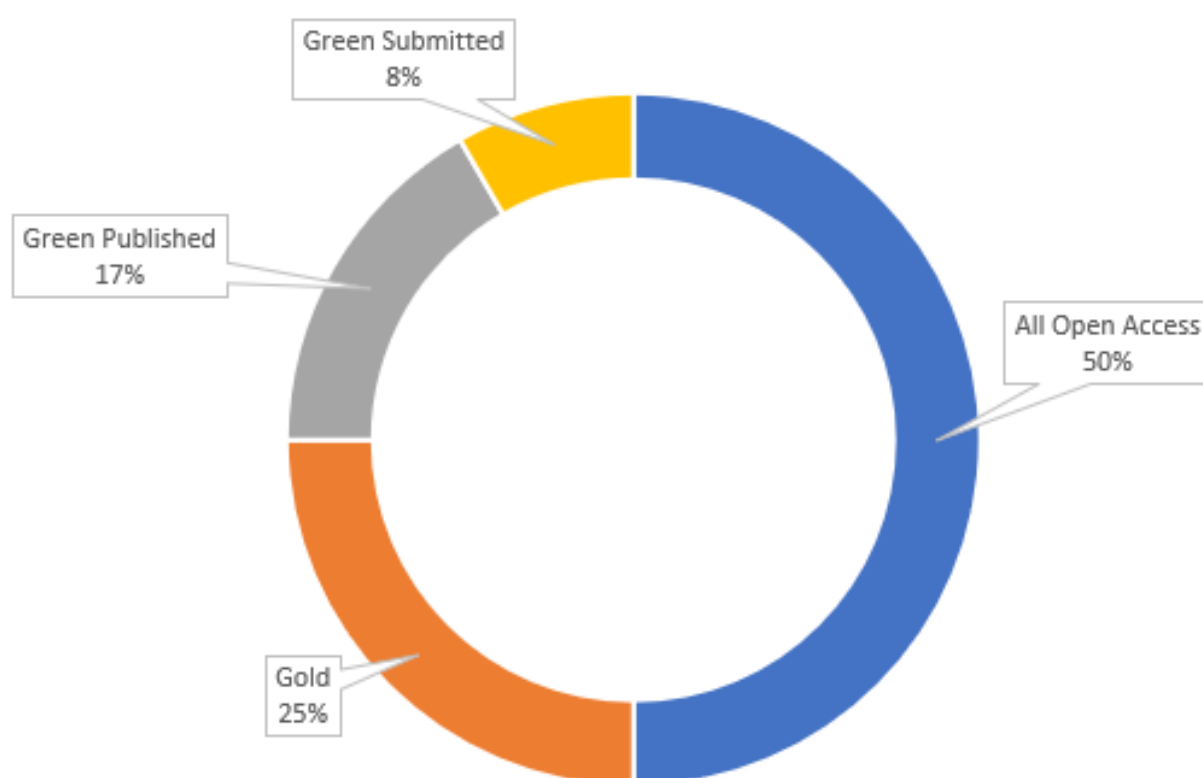
Autores más citados



Publicaciones por temática



Publicaciones por afiliaciones



Literatura abierta