LCAMP

Learner Centric Advanced Manufacturing Platform

Informe sintético de los informes D3.2 – M36 PdM – SCM – BC

WP3 – Observatorio - D3.2 - M36 – Informe sintético



Co-funded by the European Union

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

Co-funded by the European Union

Financiado por la Unión Europea Las opiniones y los puntos de vista expresados son únicamente los del autor o autores y no reflejan necesariamente los de la Unión Europea o la Agencia Ejecutiva Europea de Educación y Cultura (EACEA). Ni la Unión Europea ni la EACEA pueden ser consideradas responsables de los mismos.

La Alianza LCAMP autoriza el uso de este documento en virtud de una licencia Creative Commons, Reconocimiento-No comercial 4.0 Internacional.

Socios de LCAMP:

TKNIKA - Centro de Investigación Aplicada de FP de Euskadi, CIFP Miguel Altuna LHII, DHBW Heilbronn – Duale Hochschule, Baden-Württemberg, Curt Nicolin High School, AFM – Asociación Española de Fabricantes de Máquina-Herramienta , EARLALL – Asociación Europea de Autoridades Regionales y Locales para el aprendizaje a lo largo de la vida, FORCAM, CMQE: Association campus des métiers et des qualifications industrie du future, MV: Mecanic Vallée, KIC: Knowledge Innovation Centre, MADE Competence Centre Industria 4.0; AFIL: Associazione Fabbrica Intelligente Lombardia, SIMUMATIK AB; Association HVC Association of Slovene Higher Vocational Colleges; TSCMB:Tehniški šolski center Maribor, KPDoNE: Kocaeli Directorate Of National Education; GEBKİM OIZ y CAMOSUN College.

Resumen del documento

Tipo de documento:	Informe público
Título	Informe sintético de los informes D3.2 – M36 PdM – SCM – BC
Autor/es	Pascal Pichoutou, Jesús Rebolledo
Coautores	Vesna Novak, Eda Ipek, Camille Leonard, Ralf Steck, Richard Gale, Pablo Marino
Revisor	Hervé Danton
Fecha	3 de junio de 2025
Estado del documento	0.93
Nivel del documento	Confidencial hasta su publicación
Descripción del documento	Este documento describe los principales impactos de las nuevas tecnologías en el ámbito del mantenimiento predictivo y sus consecuencias para la adaptación de las organizaciones y las capacidades.
Este entregable debe citarse como:	Pichoutou et al., 2025. WP3 – Observatorio - D3.2 - M36 - Informe sintético de los informes D3.2 – M36 PdM – SCM – BC
Nivel del documento	Público

Versiones

Versión	Fecha	Acción
0.1	30-05-2025	Borrador, definición del formato
0.5	30-05-2025	Borrador con contribuciones de socios
0.93	2025-06-03	Versión final para proceso de revisión
0.95		Aprobación del comité directivo
1		Versión que se subirá al portal de la UE

GLOSARIO Y/O ACRÓNIMOS

AFDET: Asociación Francesa para el Desarrollo de la Enseñanza Técnica
AFM: Asociación de Fabricantes de Máquina-Herramienta
AFNOR: Asociación Francesa de Normalización
IA: Inteligencia Artificial
AR: Realidad Aumentada
Informe BC: Informe del País Vasco
CAGR: Tasa de Crecimiento Anual Compuesta
CAM: Fabricación Asistida por Ordenador
CMMS: Sistema de Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador
CNC: Control Numérico por Ordenador
CoVE: Centros de Excelencia Profesional
EaaS: Equipo como Servicio
EQF: Marco Europeo de Cualificaciones
ESCO: Clasificación Europea Multilingüe de Capacidades, Competencias, Cualificaciones y Ocupaciones
FCS: Programación de Capacidad Finita
GSCM: Cadena de Gestión de Suministro Verde
HVET: Educación y Formación Profesional Superior
ICS: Programación de Capacidad Infinita
IoT: Internet de las Cosas
TI: Tecnología de la Información
IUT: Instituto Universitario de Tecnología
LCAMP: Plataforma de Fabricación Avanzada centrada en el Alumno
LLM: Modelo de Lenguaje de Gran Tamaño
MaaS: Mantenimiento como Servicio
MOOC: Curso Masivo en Línea y Abierto
MPS: Plan Maestro de Producción
MRP: Planificación de Recursos de Materiales
MV: *Mecanic Vallée*
NLP: Procesamiento de Lenguaje Natural
PdM: Mantenimiento Predictivo
PdMaaS: PdM como Servicio
PLC: Controlador Lógico Programable
ROI: Retorno de la Inversión
SCM: Gestión de la Cadena de Suministro
SCOR: Referencia de Procesos de la Cadena de Suministro
S&OE: Ejecución de Ventas y Operaciones
S&OP: Planificación de Ventas y Operaciones
SLM: Modelos de Lenguaje Específicos a las Tareas
PYME: Pequeña y Mediana Empresa
TKNIKA: Centro de Investigación Aplicada de Formación Profesional del País Vasco
TPM: Mantenimiento Productivo Total
VR: Realidad Virtual
XR: Realidad Extendida

TABLA DE CONTENIDO

EXECUTIVE SUMMARY 6
1. INTRODUCTION 8
1.1. Purpose of the report 8
1.2. Methodologies 9
1.3. Contexts & Market Dynamics 10
2. EMERGING TECHNOLOGIES 12
3. DIGITAL AND GREEN TRANSITION TRENDS IMPACTS IN SMES 16
3.1. Technological Shifts in the Field of Obervation 16
3.2. Green Transition Contributions 21
3.3. Operational, Organisational and workforces Impacts 23
3.4. Adoption and Maturity in SMEs 28
3.5. Future Trends & Strategic Recommendations 34
4. DIGITAL AND GREEN TRANSITION TRENDS IMPACTS IN VET CENTRES 37
4.1. Challenges and Opportunities for VET Centres 37
4.2. Impact on Training and Skills Trained 40
4.3. Strategic Role of VETs 46
4.4. Conclusions and Recommendations 47
5. CONCLUSION AND OUTLOOK 49
5.1. Summary of Key Findings 49
5.2. Strategic Lessons 53
5.3. Recommendations 54
5.4. Outlook 55
6. REFERENCES 57
7. INDEX OF TABLES 58
8. ANNEX 59
8.1. Annex 1 - Skills needs 59

RESUMEN EJECUTIVO

El proyecto LCAMP (Plataforma de Fabricación Avanzada Centrada en el Alumno), una iniciativa de los CoVE, tiene como objetivo fortalecer los ecosistemas de capacidades regionales en Fabricación Avanzada mediante la colaboración, la resiliencia y la innovación.

Este informe sintético consolida las observaciones clave y los *insights* estratégicos de tres estudios detallados llevados a cabo durante el proyecto LCAMP sobre **Mantenimiento Predictivo (PdM)**, **Gestión de la Cadena de Suministro (SCM)** y **la Alineación de la Oferta de FP con las necesidades Industriales (BC)**. Desarrollado por el Observatorio LCAMP y dirigido por el clúster francés *Mecanic Vallée* y el Campus des Métiers et des Qualifications Industrie du Futur, con apoyo de socios de Alemania, Italia, Eslovenia, País Vasco y la participación de Canadá, el informe tiene como objetivo proporcionar *insights* estratégicos para pymes, centros de formación profesional y encargados de elaborar políticas con el fin de alinear la transformación industrial con el desarrollo de capacidades y la educación

Este informe constituye un componente clave de la hoja de ruta estratégica para la mejora de la sostenibilidad y el crecimiento de la fabricación avanzada en los países de la Unión Europea (UE) y fuera de ella. Sintetiza los *insights* de tres investigaciones específicas (sobre **el campo del Mantenimiento y el PdM, la SCM orientada a la Planificación de Beneficios, S&OP, MPS, MRP, los procesos FCS/ICS [denominados SCM 4.0 en este informe]** y **la alineación de la Formación Profesional [FP] con las necesidades industriales [BC]**) con el fin de valorar el modo en que los cambios tecnológicos y organizativos están reconfigurando el ecosistema de la pequeña y mediana empresa (PYME) y de los centros de FP que le dan soporte.

El informe destaca el modo en que la digitalización y las transiciones ecológicas están reconfigurando los procesos industriales, dando lugar tanto a oportunidades como a retos. Al tiempo que las transiciones digital y verde están avanzando rápidamente en toda la industria, siendo frecuente que sean las grandes empresas las que dirijan la forma de adoptar tecnologías tales como la IA, los gemelos digitales y la analítica avanzada, las pymes necesitan **enfoques más iterativos y modulares** debido a sus limitados recursos financieros y humanos. Esto representa un gran reto para las instituciones de FP encargadas de preparar a un grupo muy diversos de estudiantes para un mercado laboral cada vez más complejo. A pesar de esta dicotomía, los centros de FP están idealmente posicionados para dar respuesta a las demandas en constante evolución de la industria mediante una mayor **colaboración, innovación e integración sistémica**.

Entre las observaciones clave de esta síntesis se incluyen:

- **Adopción de tecnología digital**: Las pymes están avanzando gradualmente en la adopción de tecnologías tales como los sistemas PdM basados en la nube y las plataformas SCM gestionadas mediante IA. Aun así, la puesta en práctica es desigual debido a la falta de experiencia interna, una infraestructura insuficiente y las barreras financieras.
- **Lagunas en las capacidades y preparación de los trabajadores**: existe la necesidad urgente de disponer de **capacidades técnicas** (por ejemplo, análisis de datos, Internet de las Cosas (IoT), Inteligencia Artificial [IA], ciberseguridad) así como de **competencias transversales y *soft skills*** o habilidades blandas (por ejemplo, adaptabilidad, colaboración, *systems thinking* o pensamiento sistémico). Las instituciones de FP deben tratar de resolver estas lagunas con enfoques flexibles e híbridos, reclamando una colaboración más estrecha entre la industria y los centros de FP y el empoderamiento de los centros de FP en toda Europa.

- **Transformación operativa y organizativa**: Las transiciones digital y verde están reconfigurando las operaciones industriales, impulsando el cambio cultural hacia una colaboración ágil e interfuncional y hacia una toma de decisiones basada en datos. Estos cambios exigen las reformas correspondientes en los enfoques de la formación y el desarrollo de la población activa.
- **Contribuciones a la sostenibilidad**: Las tecnologías PdM y SCM dan respaldo directo a la transición verde gracias a la mejora de la eficiencia energética, la minimización de la pérdida de recursos y la habilitación de prácticas de economía circular. Estas tecnologías también mejoran la resiliencia industrial y la competitividad a largo plazo.
- **Barreras para la adopción**: entre las barreras más comunes se encuentran los costes de implementación, la resistencia al cambio, los sistemas de datos fragmentados y los problemas relacionados con la ciberseguridad. Se necesitan estrategias y mecanismos de soporte individualizados para ayudar a las pymes a pasar de la experimentación a la adopción escalada.
- **Recomendaciones estratégicas**: El informe aboga por una mejor **alineación entre la industria y el ámbito académico**, una mayor **inversión en centros de FP** e **iniciativas coordinadas que gestionen conjuntamente los objetivos tanto de digitalización como de sostenibilidad**. La integración de tecnologías fundamentales en el plan de estudios de la FP y el desarrollo colaborativo con las pymes también son elementos clave para la futura preparación.

La consecución de un sector manufacturero sostenible, robusto y enfocado al futuro dependerá de la capacidad para **integrar sin problemas las tecnologías digital y verde** en las operaciones industriales, al tiempo que se transforman las prácticas educativas con el fin de satisfacer las demandas de la economía en constante evolución. Mediante la alineación de las necesidades industriales emergentes con estrategias de FP orientadas al alumno, este informe determina **pasos implementables para mejorar la preparación de la población activa, fomentar prácticas sostenibles y crear un ecosistema industrial resiliente para Europa y el resto del mundo**.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVO DEL INFORME

La finalidad de este informe es contribuir al objetivo global de definir una estructura y una metodología para la observación y el análisis de las tendencias tecnológicas, las necesidades relativas a las capacidades y las trayectorias laborales en el sector de la fabricación avanzada con vistas a cimentar el futuro éxito de los alumnos de los centros de formación profesional (FP) en toda la Unión Europea.

Se basa en las observaciones relativas a **tres ámbitos de Observación** llevados a cabo en el proyecto LCAMP – **campo del Mantenimiento y el PdM** (Pichoutou Pascal et al., 2025a)**, la SCM orientada a la Planificación de Beneficios, S&OP, MPS, MRP, los procesos FCS/ICS (denominados SCM 4.0 en este informe)** (Pichoutou Pascal et al., 2025b) y la **alineación de la Formación Profesional (FP) con las necesidades industriales (BC)** (Pablo Marino, 2025)**-** y los sintetiza con el fin de proporcionar una visión unificada de las evoluciones clave tanto tecnológicas como operativas y de la población activa que están reconfigurando los ecosistemas industriales.

Este informe enfatiza especialmente dos dinámicas de transformación claves de la fabricación avanzada:

- la **transformación digital**, que abarca la integración de la IA, el IoT, la analítica de datos y la automatización en los procesos de producción y planificación, y
- la **transición verde**, que impulsa prácticas sostenibles, la eficiencia de los recursos y la innovación consciente del cambio climático en las estrategias operativas.

En este contexto, el informe investiga el modo en que la **pequeña y mediana empresa (PYME)** está respondiendo actualmente a estos cambios en los campos de Observación. Estudia sus **prácticas, retos y niveles de preparación** mediante observaciones in situ, análisis de encuestas y documentación de **casos reales de empresas**. El objetivo de estos *insights* es proporcionar referencias implementables e *insights* estratégicos para dos públicos clave

- En el caso de las pymes: ofrece **una visión de conjunto** de las **tecnologías emergentes, así como de los conceptos y herramientas aplicados en los campos de observación y, principalmente, en los dominios del PdM y la SCM,** posibilitando el incremento de la eficiencia de los procesos de las empresas.
- En el caso de las instituciones de FP:
  - Proporcionar **recomendaciones estratégicas** para la adaptación correspondiente de los planes de estudios de FP y las estrategias institucionales, y
  - Servir de guía para la **toma de decisiones políticas y de inversión** que mejoren la capacidad de los centros de formación para anticiparse y dar respuesta a las necesidades en constante evolución de la población activa.

En el núcleo de este análisis radica el compromiso con la **innovación orientada al alumno**: equipando a los centros de FP con la inteligencia y las herramientas necesarias para preparar a los estudiantes, no solo para aquello que exige el mercado laboral en la actualidad, sino para el trabajo futuro en **entornos industriales resilientes, sostenibles y digitalmente integrados**.

1.2. METODOLOGÍAS

La metodología que sustenta este informe sintético corresponde con el marco estructurado del Observatorio LCAMP, tal como se define en el Ciclo del Proceso del Observatorio (D3.1), cuyo objetivo es identificar, analizar y validar campos profesionales emergentes en el contexto de la fabricación avanzada. La selección de este año del Mantenimiento Predictivo (PdM) y la Gestión de la Cadena de Suministro (SCM) como campos de observación estuvo guiada tanto por la relevancia tecnológica intersectorial como por su potente alineación con las transformaciones digital y verde definidas en el Paquete de Trabajo 7 (WP7) de LCAMP.

El enfoque global sigue un diseño con múltiples etapas y métodos que posibilitó la combinación de un análisis industrial cuantitativo, la implicación FP cualitativa y los *deep dives* (análisis exhaustivos) territoriales:

Metodología para los informes PdM y SCM

Las facetas de la investigación relacionadas con el PdM y la SCM adoptaron un enfoque orientado a la tecnología que combina:

- Charlas de expertos internacionales con socios de Francia, Alemania, Suecia, Italia, Turquía y Eslovenia con el fin de definir las prioridades;
- Una revisión global de la literatura de publicaciones científicas, informes de previsiones industriales y estudios de casos internacionales;
- La recopilación triangulada de datos, que incluye:
  - Encuestas dirigidas a pymes y centros de FP con el objetivo de obtener *insights* sobre la adopción de la tecnología, la madurez, las lagunas de la población activa, las necesidades de formación y las barreras a la inversión;
  - entrevistas semiestructuradas con líderes empresariales y expertos técnicos;
- Ambas han sido examinadas y validas por expertos

Estos pasos han posibilitado una elaboración consistente de *insights* sobre los impactos operativos, organizativos y para la población activa de la adopción de las tecnologías, con validación por parte de todos los socios de LCAMP con el objetivo de garantizar la coherencia metodológica.

Metodología para el Informe BC (Educación y Cambio Empresarial)

En paralelo, el informe BC (Cambio Empresarial) utilizó una metodología orientada a la enseñanza y basada en el campo destinada a comprender el modo en que las instituciones de FP están dando respuesta a las transformaciones en la industria. Esto conllevó:

- Un estudio regional en profundidad en el País Vasco basado en el análisis LCAMP 2024 de la evolución del trabajo en la fabricación avanzada;
- Entrevistas con 21 profesores de FP (desde formadores de cursos de especialización de un año de duración hasta mentores implicados en la formación dual y en proyectos de innovación) destinadas a elaborar un mapa de las prácticas relativas a la innovación y la adaptación pedagógica;
- Participación de 12 *stakeholders* del sector industrial, incluidas pymes y *startups* tecnológicas con el objetivo de explorar sus necesidades de talento y los modelos de colaboración con el ámbito educativo;
- Datos de encuestas de la Asociación Española de Fabricantes de Máquina-herramienta (AFM) e investigaciones documentales sobre cuatro profesiones seleccionadas;
- Alineación con ESCO y otros marcos europeos de clasificación de capacidades para garantizar la coherencia en el análisis de las cualificaciones y las competencias.

Esta metodología en dos capas (europea y regional) posibilitó la compresión global y verticalmente integrada del modo en que las transiciones digital y verde afectan a la oferta y la demanda de capacidades, especialmente en los ecosistemas de FP.

Al integrar estas metodologías complementarias, este informe ofrece tanto una **perspectiva estratégica paneuropea** como un **foco orientado a la práctica y conectado con la realidad** sobre la dinámica en constante evolución de la fabricación avanzada, garantizando su relevancia tanto para los encargados de elaborar políticas como para los profesionales de la formación.

1.3. CONTEXTOS Y DINÁMICAS DEL MERCADO

Durante la última década, la adopción acelerada de las tecnologías Industria 4.0 ha reconfigurado de forma determinante las operaciones industriales, de manera destacada en los campos observados y, especialmente, en **Mantenimiento y Mantenimiento Predictivo, Gestión de la Cadena de Suministro (SCM), mecanizado CNC y control de calidad**. Estas transformaciones no son exclusivamente tecnológicas, sino también organizativas y estratégicas, y redefinen los modelos de negocio, las dinámicas del mercado y las expectativas de la población activa en el ecosistema de la fabricación avanzada europea.

Según el **informe PdM**, se prevé que el mercado PdM global (valorado en **10.930 millones USD en 2024**) supere los **70.000 millones USD en 2032**, con previsiones que superan los **100.000 millones USD en 2033**. Entre los impulsores clave se incluyen el desarrollo de **la IA, el IoT, la computación en la nube** y **la analítica basada en sensores**, que posibilitarán la monitorización del estado de las máquinas en tiempo real, estrategias de mantenimiento proactivas y una optimización del coste del ciclo de vida. El PdM se ha convertido en un facilitador estratégico en sectores tales como el de la automoción, la aeronáutica y la manufactura industrial, siendo rápidamente adoptado en Norteamérica y Europa, y experimentando un gran impulso en la región del Asia-Pacífico.

Sin embargo, el **informe PdM** también revela lagunas importantes. Mientras que es habitual que las grandes empresas lideren el despliegue de las tecnologías predictivas, las **pymes se enfrentan a limitaciones estructurales** (capacidad de inversión limitada, preparación digital insuficiente y carencia de experiencia técnica) que ralentizan su adopción. El cambio del mantenimiento reactivo al mantenimiento predictivo exige no solo capacidad tecnológica, sino también nuevos modelos organizativos y roles de la población activa.

Al mismo tiempo, el **informe SCM** destaca el modo en que recientes impactos globales (COVID-19, tensiones geopolíticas, inflación y cambio climático) han dado visibilidad a vulnerabilidades en las cadenas de suministro globales. Como respuesta a esto, las empresas están invirtiendo en **Redes de Suministro Digital (DSN)**, estrategias de compra local y tecnologías tales como ***blockchain*, IA, gemelos digitales** y **sistemas de planificación avanzada** para lograr visibilidad, agilidad y resiliencia. La SCM está evolucionando y pasando de ser una función para la optimización de costes a un **pilar estratégico de innovación y sostenibilidad** orientado especialmente a **las emisiones de Alcance 3**, la circularidad y la anticipación de riesgos.

Aun así, **las pymes europeas tienen que luchar para mantener el ritmo**. El informe SCM identifica barreras persistentes, por ejemplo:

- sistemas heredados fragmentados e interoperabilidad tecnológica limitada;
- limitaciones financieras y elevados costes de implantación para las nuevas herramientas;
- preocupaciones relativas a la ciberseguridad y retos relacionados con la gestión de los datos;
- resistencia interna a la transformación organizativa y de procesos.

Estos retos afectan directamente a la evolución de la población activa. A medida que los roles están cada vez más orientados a los datos y son más interdisciplinares, se espera que los trabajadores combinen el saber hacer tradicional con capacidades en herramientas digitales, pensamientos sistémicos y toma de decisiones en tiempo real.

Estas tendencias europeas se ven reflejadas y reforzadas por los resultados del **estudio de un caso regional en el País Vasco**, tal como se describe en el **informe BC**. El ecosistema de la manufactura en el País Vasco, que incluye una poderosa mezcla de pymes y empresas orientadas a la innovación, está experimentado cambios estructurales similares. De acuerdo con los resultados del informe BC, están previstas más de **44.000 contrataciones nuevas en el sector industrial** en la región tan solo en 2024, con **más del 70 %** correspondiente a puestos en **producción, mantenimiento, calidad e ingeniería**. El clúster AFM destaca la urgente necesidad de **operarios CNC**, **técnicos de mantenimiento** y **controladores de calidad** que también sean capaces de manejarse en entornos de datos y sistemas interrelacionados.

Las entrevistas en el País Vasco subrayan la presión sobre los **centros de formación** para dar respuesta a la demanda de capacidades híbridas. Las empresas señalan que los puestos de trabajo son cada vez más fluidos, mezclándose funciones previamente aisladas y exigiendo a los profesionales que se adapten rápidamente a los procesos. Esto refuerza la importancia tanto de las **competencias transversales** (resolución de problemas, colaboración, adaptabilidad) como de las **capacidades digitales técnicas**.

Estos cambios no se producen aislados. Reflejan una tendencia más amplia que se aplica a toda Europa: Una convergencia de las **transiciones digital y verde** que impulsa nuevos estándares de rendimiento, modelos de organización y requisitos de la población activa. Tal como describe el informe BC, **los centros de FP** no solo tienen que dar respuesta a estos cambios, sino que deben anticiparse a ellos por medio de la renovación de los planes de estudio, asociaciones con la industria y rutas de aprendizaje flexibles.

En este contexto, el **Observatorio LCAMP** desempeña un papel estratégico en la consolidación de *insights* de diferentes territorios, la validación de señales tecnológicas y el apoyo a la alineación entre los sistemas de FP y las dinámicas emergentes de los mercados. Combinando una previsión de nivel macro con datos básicos de regiones tales como el País Vasco, este informe describe el cuadro global del modo en que **está evolucionando la fabricación avanzada y en que la enseñanza y la formación deben evolucionar correspondientemente**.

2. TECNOLOGÍAS EMERGENTES

La transformación digital de la industria está dirigida por una serie de tecnologías avanzadas que están reconfigurando la fabricación avanzada mediante una constelación de tecnologías habilitantes clave. Estas innovaciones no solo mejoran el rendimiento, sino que también alinean las operaciones con los objetivos de sostenibilidad. Basándose en los informes PdM, SCM y BC, este capítulo presenta un resumen de las tecnologías más importantes en sus campos de observación.

- **Internet de las Cosas (IoT):** El IoT desempeña un papel fundamental en numerosos dominios. Conecta activos físicos con sistemas digitales mediante el uso de sensores y dispositivos, convirtiéndose en la base para la obtención de datos en muchos campos.
  El valor añadido del IoT radica en su capacidad para generar datos granulares en tiempo real a bajo coste. Sin embargo, los retos que conlleva son la calibración de los sensores, la integración de las redes, los riesgos relativos a la ciberseguridad y la sobrecarga de datos sin un filtro o análisis adecuado.

- **Computación en la nube y *edge computing* (computación frontera)**: estas tecnologías sirven de soporte para el almacenamiento, tratamiento y análisis de datos en entornos distribuidos:
  - La computación en la nube posibilita a las pymes el acceso a herramientas avanzadas, por ejemplo, las plataformas de análisis predictivo, los cuadros de mando (*dashboards*) con monitorización en tiempo real, los sistemas de planificación colaborativa y las soluciones de almacenamiento de datos escalables, sin necesidad de disponer de una gran infraestructura en sus instalaciones. Las plataformas en la nube agregan datos, proporcionan funcionalidades IA y alojan cuadros de mando que dan respaldo a una toma de decisiones descentralizada.
  - La *edge computing* permite llevar a cabo el tratamiento de los datos cerca de su origen, y reduce la latencia y la dependencia de la red, lo que resulta crítico para la necesidad de obtener respuestas en tiempo real. También sirve de apoyo a las operaciones locales en almacenes o cadenas de producción.

  Las plataformas en la nube ofrecen escalabilidad e interoperabilidad, mientras que la frontera garantiza la autonomía y la rapidez. Las limitaciones principales son la seguridad de los datos, la integración de los sistemas y la fiabilidad del servicio, especialmente cuando la infraestructura es frágil.

- **Gemelos digitales**: un gemelo digital replica un sistema o proceso físico en un entorno virtual, representando virtualmente los procesos, sistemas o activos físicos. Combinan datos de sensores, registros históricos y predicciones basadas en la IA para simular el comportamiento en el mundo real:
  Los gemelos digitales ofrecen un valor añadido significativo al conectar las operaciones reales y virtuales. Entre sus limitaciones se incluyen la complejidad del modelado, la necesidad de datos de gran calidad y la integración con sistemas heredados.

- **Inteligencia Artificial (IA):** La IA se está convirtiendo rápidamente en la columna vertebral de los sistemas predictivos de grandes dominios. Posibilita el aprendizaje a partir de datos, la identificación de patrones complejos y la realización de predicciones, y facilita la toma de decisiones. La IA sirve de base para la transición de una automatización basada en reglas a sistemas capaces de aprender, adaptarse y optimizar las decisiones. La IA empodera a las industrias para que puedan optimizar los ciclos de mantenimiento, racionalizar la producción y mejorar la capacidad de respuesta de la cadena de suministro.

El amplio campo de la Inteligencia Artificial abarca diversos métodos y arquitecturas. A continuación se destacan las categorías clave: aprendizaje automático y aprendizaje profundo, redes neuronales y transformadores, IA generativa y aumento de datos, **NLP y IA conversacional**, IA Explicable (XAI) y Aprendizaje Automático Interpretable (IML), **algoritmos de agrupamiento para optimización** y algoritmos de optimización. Cada uno de ellos desempeña un papel diferente a la hora de posibilitar una toma de decisiones predictiva, adaptativa y transparente en contextos industriales.

Aprendizaje Automático (ML) y Aprendizaje Profundo (DL)

Los modelos ML (por ejemplo, los árboles de decisión, los bosques aleatorios y las máquinas de vectores de soporte [SVM]) se utilizan profusamente en muchos campos. Ayudan a prevenir la degradación de los equipos, clasifican los fallos de los componentes, predicen las fluctuaciones de la demanda, y optimizan el inventario y la programación.

- Los árboles de decisión permiten llevar a cabo una toma de decisiones interpretable y basada en reglas.
- Los bosques aleatorios, al ser conjuntos de árboles de decisiones, incrementan la precisión gracias a la suma de varios árboles.
- Las SVM se utilizan en tareas de clasificación (por ejemplo, segmentación de inventario) y modelos de regresión (por ejemplo, previsión de la demanda), y resultan efectivas en conjuntos de datos de alta dimensión.
- Valor añadido: alta precisión y flexibilidad en entornos estructurados.
- Limitaciones: necesita conjuntos amplios de datos de gran calidad y ajuste de parámetros.

Redes neuronales y transformadores

Las arquitecturas neuronales (incluidas las Redes Neuronales Recurrentes (RNN) y las Redes de Memoria Larga a Corto Plazo (LSTM)) resultan especialmente adecuadas para la previsión de series temporales y la programación predictiva. Son esenciales para modelar las necesidades de la producción, los ciclos de mantenimiento Y las tendencias de compra.

- Se están adoptando modelos de transformadores (por ejemplo, BERT, GPT) para análisis complejos basados en texto tales como la interpretación de informes o el parseo de contratos.
- Valor añadido: gestión de dependencias secuenciales y datos no estructurados con alto poder predictivo.
- Limitaciones: gran consumo de recursos y dificultad para interpretar sin herramientas específicas.

IA generativa y Aumento de Datos

Los modelos LLM (modelos de lenguaje de gran tamaño), por ejemplo, BERT y GPT, procesan grandes conjuntos de datos y detectan anomalías de programación en tiempo real. Resultan especialmente eficaces a la hora de gestionar dependencias de gran alcance en los datos, adecuándolos, por ejemplo, para:

- Ajustes dinámicos de programación.
- Generación de datos sintéticos para fallos, cuyo objetivo es resolver la escasez de datos desglosados históricos. Esto facilita la creación de modelos robustos, incluso cuando los conjuntos de datos históricos son escasos.
- Entrenamiento mejorado de modelos IA mediante la simulación de eventos raros pero críticos.
- Generación de lenguaje natural, por ejemplo, elaboración de resúmenes de registros de mantenimiento, generación de órdenes de trabajo o creación de guías técnicas.
- Valor añadido: posibilita la IA, incluso en contexto con pocos datos, y mejora la generalización.

- Limitaciones: necesita mecanismos de validación y marcos de formación de modelos robustos.

NLP y IA conversacional

El Procesamiento de Lenguaje Natural (NLP) posibilita a la IA el parseo de datos no estructurados, por ejemplo, correos electrónicos, registros de chats o notas técnicas:
- Los chatbots racionalizan la comunicación con los proveedores.
- El Reconocimiento de Entidades Nombradas (NER) extrae datos estructurados de textos.
- El Modelado de Temas (LDA) y el análisis de sentimientos facilitan la detección de riesgos y la gestión de la población activa.
- Valor añadido: automatiza la extracción de conocimientos y la comunicación.
- Limitaciones: sensible a asuntos relativos a la privacidad de los datos y los matices lingüísticos.

IA Explicable (XAI) y Aprendizaje Automático Interpretable (IML)

La integración de la Inteligencia Artificial (IA), el Internet de las Cosas (IoT) y las interfaces humano-máquina conecta los sistemas de hardware y software con el fin de optimizar la automatización de los procesos de negocio. A medida que las industrias llevan a cabo la transición hacia Industria 5.0, el foco cambia de las operaciones centradas en la máquina a la IA centrada en el ser humano, en la que las tecnologías incrementan la toma de decisiones por parte de las personas con el fin de mejorar la productividad.
No obstante, la eficacia de su despliegue depende, en gran medida, de la disponibilidad de datos de alta calidad, de personal adecuadamente capacitado para desarrollar y mantener los modelos y de la confianza de los usuarios en los resultados del sistema. En el caso de muchas pymes, estos requisitos previos siguen siendo una barrera, especialmente en ausencia de estructuras de apoyo externas o de soluciones modulares fáciles de integrar.
Con el fin de eliminar las preocupaciones relativas a la confianza y la usabilidad, están surgiendo nuevos enfoques para conseguir que la IA sea más transparente y accesible por medio de soluciones de Explicabilidad e Interpretabilidad:
- La XAI (por ejemplo, SHAP, LIME) mejora la confianza de los usuarios proporcionando explicaciones claras del modo en que los sistemas de IA llegan a sus conclusiones. Esto ayuda a los profesionales a comprender el razonamiento subyacente a las decisiones generadas por la IA, incrementando el nivel de confianza y facilitando su adopción.
- El IML utiliza modelos inherentemente interpretables tales como árboles de decisión, Modelos Aditivos Generalizados (GAM) y Máquinas de Incrementación Explicable (EBM). El IML garantiza que los modelos de decisión utilizados sean inherentemente transparentes e interpretables. Al facilitar a los usuarios el seguimiento de la lógica subyacente a las predicciones o recomendaciones, el IML contribuye a una integración de la IA más responsable y controlable en contextos operativos
- Valor añadido: incrementa la transparencia y facilita el cumplimiento normativo.
- Limitaciones: requiere adaptarse a arquitecturas de modelos específicas.

Agrupamiento de algoritmos para optimización

La IA utiliza técnicas de agrupamiento para mejorar la planificación, la clasificación y la programación:
- K-Means, DBSCAN (Agrupamiento Espacial basado en Densidad de Aplicaciones con Ruido) y Modelos de Mezclas Gaussianas (GMM) son un algoritmo de aprendizaje no supervisado ampliamente utilizado para agrupar puntos de datos similares.
- Valor añadido: automatiza la clasificación y mejora la eficiencia del proceso.
- Limitaciones: sensible a casos atípicos, requiere ajuste.

Algoritmos de optimización

La optimización generada por IA se utiliza para equilibrar problemas complejos de asignación de recursos:
  - Algoritmos Genéticos (GA): programación de múltiples objetivos y equilibrado de recursos.
  - Optimización de Colonias de Hormigas (ACO): enrutamiento y secuenciación dinámicos.
  - Optimización por Enjambres de Partículas (PSO): equilibrado adaptativo de la carga de trabajo y planificación de compras.

  En resumen, estos métodos son fundamentales para la planificación de la producción, la alineación de las compras y la logística.
  - Valor añadido: resuelve problemas de asignación a gran escala en tiempo real.
  - Limitaciones: elevada demanda computacional y sensibilidad a los ajustes de los parámetros.

- **Ciberseguridad:** la ciberseguridad no es solo un motivo de preocupación técnica, sino un elemento básico de la confianza en los sistemas digitales. A medida que se expande la confianza en la IA, la nube y el IoT, la resiliencia cibernética robusta se convierte en un elemento esencial, especialmente para las pymes que pueden carecer de la infraestructura o la experiencia necesarias. Estos avances plantean vulnerabilidades que aumentan la susceptibilidad de los sistemas de control industrial (ICS) y las infraestructuras de tecnología operativa (OT) a los ciberataques. Los informes destacan tres riesgos importantes:
  - **Amenazas Persistentes Avanzadas (APT)** destinadas a datos logísticos o proveedores sensibles.
  - **Ataque a la cadena de suministro**, en el que se introducen componentes maliciosos durante los procesos de *upstreaming*.
  - **Violaciones de la seguridad de datos personales**, que provocan interrupciones operativas y daño reputacional.

  Para mitigar estos riesgos, iniciativas tales como DETECTA 2.0 se centran en la integración de medidas de ciberseguridad en el PdM y la mejora de la resiliencia de la pequeña y mediana empresa (PYME).

- ***Blockchain*:** aunque su adopción es incipiente entre las pymes, el *blockchain* se identifica como solución prometedora para conseguir la trazabilidad, transparencia e integridad de los datos necesarias en gestión de contratos y sistemas descentralizados, así como facilitador estratégico de la ciberseguridad, ofreciendo registros de transacciones inmutables y descentralizados.
  El valor añadido del *blockchain* radica en su transparencia y confianza. Sin embargo, su implementación sigue siendo compleja y su adopción en el entorno de las pymes no es amplia debido a los problemas técnicos y de costes que conlleva.

3. TENDENCIAS DE LA TRANSICIÓN DIGITAL Y VERDE QUE IMPACTAN EN LAS PYMES

3.1. CAMBIOS TECNOLÓGICOS EN EL CAMPO DE OBSERVACIÓN

Basándonos en las tecnologías avanzadas descritas previamente, pasamos ahora a sus aplicaciones concretas en los dominios examinados en los informes PdM, SCM y BC.

Esta suite de tecnologías avanzadas está reconfigurando el mantenimiento predictivo (PdM) y la gestión de la cadena de suministro (SCM). El alcance y la lógica operativa de ambos dominios son diferentes.

Estas tecnologías digitales no son tan solo herramientas, sino catalizadores de nuevas prácticas industriales con la adopción de estas tecnologías avanzadas en los campos del mantenimiento predictivo (PdM) y la gestión de la cadena de suministro (SCM). Aunque estos campos sirven a diferentes objetivos comerciales, cada vez se basan más en la superposición de tecnologías y modelos de innovación: utilizan cada vez más la Inteligencia Artificial (IA), el Internet de las Cosas (IoT), la computación en la nube y los gemelos digitales. Estas tecnologías no solo dan soporte a la automatización, sino que están redefiniendo el modo en que se toman las decisiones, se asignan los recursos y se optimiza el rendimiento.

Las tecnologías PdM se utilizan principalmente para predecir fallos de equipos, mejorar el *uptime* (tiempo de actividad) de las máquinas y reducir las intervenciones no planificadas. Reelaboran el modo en que las empresas llevan a cabo la monitorización, mantenimiento y entretenimiento de los equipos. Los sensores IoT facilitan la monitorización del estado en tiempo real. La IA facilita la detección temprana de riesgos de degradación y fallo. Los gemelos digitales simulan el comportamiento operativo y las plataformas en la nube agregan y analizan datos a escala.

Por el contrario, las tecnologías SCM se aplican a la previsión, planificación, programación y orquestación de redes. El cambio es evidente en el aumento del uso de la IA para la previsión de la demanda y el análisis de riesgos, del IoT para el seguimiento de activos y envíos, y de los sistemas en la nube para la sincronización de operaciones entre proveedores y clientes. Los procesos SCM (relacionados con el campo de observación en planificación, ejecución y monitorización) están siendo rediseñados para sacar partido de las capacidades digitales con el fin de conseguir rapidez y resiliencia.

3.1.1. NARRATIVAS ESTRATÉGICAS Y FOCO ESTRATÉGICO

Mientras que las aplicaciones PdM se centran en el rendimiento interno, la fiabilidad de los sistemas y la optimización de los costes, las aplicaciones SCM están dirigidas por la coordinación de las redes, la flexibilidad y la sostenibilidad. Esto es reflejo de diferentes narrativas:

- El PdM prioriza el *uptime* y la excelencia del proceso y su objetivo es la eliminación de las paradas improductivas no planeadas y la rentabilidad del mantenimiento.
- La SCM recalca la rapidez, la coordinación de extremo a extremo y la resiliencia, especialmente en mercados volátiles o contextos normativos.

Ambos dominios convergen hacia sistemas más autónomos, explicables y basados en el servicio. No obstante, sus rutas de despliegue son diferentes:

- Las grandes empresas son líderes, con plataformas de gemelos digitales y IA integrada.
- Las pymes, aunque su ritmo de adopción es más lento, muestran potencial por medio de soluciones modulares, servicios basados en la nube y ecosistemas de colaboración.

3.1.2. TECNOLOGÍAS DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO

El mantenimiento predictivo está evolucionando rápidamente y modificando sus enfoques tradicionales de mantenimiento reactivo y basado en el tiempo a modelos basados en el estado y dirigidos por datos. Este cambio se ve posibilitado, en gran medida, por el despliegue de las tecnologías digitales descritas previamente, tal como se señala a continuación.

Internet de las Cosas (IoT)

Los dispositivos IoT recopilan datos en tiempo real de la maquinaria y posibilitan la monitorización continua mediante el seguimiento de parámetros clave tales como vibraciones, temperatura, presión, gasto energético y niveles de lubricación. Estos datos alimentan modelos predictivos con el fin de detectar anomalías y programar el mantenimiento de forma proactiva.

Estos datos son fundamentales para la monitorización del estado y se trasmiten directamente a plataformas diagnósticas y modelos IA.

El IoT ayuda a anticipar fallos antes de que impacten en la producción y posibilita la vigilancia remota.

Computación en la nube y *edge computing*

Las plataformas en la nube son compatibles con cuadros de mando de mantenimiento, análisis y almacenamiento de datos escalable, lo que posibilita a las pymes la implementación del PdM sin tener que crear su propia infraestructura TI. Facilitan el desarrollo del PdM-como-Servicio (PdMaaS).

La *edge computing* procesa datos a nivel del equipo, permitiendo la toma de decisiones en tiempo real y reduciendo la latencia, lo que es fundamental en entornos de producción a alta velocidad.

Gemelos digitales

Los gemelos digitales simulan el comportamiento dinámico de los activos, siendo compatibles con análisis «what-if» (qué pasaría si) y predicciones para el ciclo de vida.

Utilizados en combinación con software PdM, proporcionan *insights* sobre factores de estrés, gasto energético y tiempo previsto hasta el fallo.

Estas simulaciones ayudan a optimizar las intervenciones preventivas y la planificación de los recambios.

Inteligencia Artificial (IA)

En el mantenimiento, la IA se utiliza para elaborar modelos predictivos que prevean el fallo del equipo, detecten anomalías y recomienden acciones de mantenimiento optimizadas.

Se despliegan diferentes enfoques IA dependiendo del contexto:

- Aprendizaje Automático (ML): los algoritmos ML se utilizan ampliamente en el PdM para la predicción de fallos, la detección de anomalías y el análisis de tendencias. Estos sistemas mejoran con el paso del tiempo aprendiendo de datos históricos.

- Aprendizaje Profundo (DL): subconjunto del ML, el DL se usa en el PdM para procesar datos de sensores y detectar patrones sutiles de, por ejemplo, vibraciones, cambios de temperatura o lecturas de presión.
- Grandes Modelos de Aprendizaje Automático (LMM): Estos modelos integran vastos conjuntos de datos para ofrecer *insights* escalables. En el PdM, los LMM ayudan a interpretar datos complejos de múltiples sensores.
- IA generativa / Modelos de Lenguaje de Gran Tamaño (LLM): en el PdM, los LLM ofrecen una nueva interfaz para los técnicos al habilitar la interacción del lenguaje natural con herramientas diagnósticas o instrucciones de mantenimiento. Pueden resumir historiales de registros de mantenimiento o dar respuesta a consultas sobre procedimientos.

Confianza y usabilidad:

- Inteligencia Artificial Explicable (XAI): en el PdM, las técnicas XAI, por ejemplo, GradCAM, DIFFI y ARCANA, se usan para ayudar a los operadores a comprender por qué un modelo IA ha etiquetado un componente como fallido. Estos métodos destacan las variables (por ejemplo, vibración, temperatura) que más han contribuido a una anomalía o a una predicción de fallo. Por ejemplo, DIFFI clasifica las características que provocan la detección de anomalías en datos de series temporales, mientras que ARCANA identifica causas raíz mediante el análisis de errores de reconstrucción en modelos basados en autocodificadores. Este tipo de herramientas incrementan la confianza y posibilitan una toma de decisiones más informada.
- Aprendizaje Automático Interpretable (IML): en el PdM, el IML se centra en utilizar modelos transparentes como árboles de decisión, LionForests y Máquinas de Incrementación Explicable (EBM)que ofrezcan predicciones lógicas claras basadas en reglas. Por ejemplo, LionForests genera reglas SI-ENTONCES legibles por humanos a partir de bosques aleatorios para explicar las clasificaciones de los fallos, mientras que las EBM muestran el modo en que cada característica de entrada contribuye a los resultados del mantenimiento. Estos métodos ayudan a operarios e ingenieros a realizar el seguimiento del razonamiento subyacente a las predicciones, dando respaldo a una integración IA responsable en entornos industriales.

Blockchain:

En el PdM, el *blockchain* no se usa apenas, pero puede servir de base para garantizar el registro de las operaciones de mantenimiento o la sustitución de piezas por cuestiones de garantía y trazabilidad.

Ciberseguridad

El PdM destaca la protección de los datos de máquina y la continuidad de las operaciones.

Insights relativos a los estudios de casos

Dos casos descritos en el informe PdM describen la evolución del Mantenimiento Predictivo (PdM) de modelos reactivos basados en el tiempo a sistemas avanzados basados en datos. Recalca el modo en que la IA, la integración de la calidad y la automatización modular están reconfigurando las estrategias PdM. Estos dos estudios de casos ilustran el despliegue de modelos innovadores y sus beneficios prácticos en las industrias.

- Caso 1: PdM mejorado usando la integración de la Calidad del Producto (PQ)
  - Métodos utilizados:
    - Integración de ML y Calidad del Producto para el PdM
    - Desarrollo de un marco en tres fases con una precisión del **91 %**.
  - Resultados:
    - Se identificó la máquina mezcladora de vacío como el elemento más crítico que influye en la PQ (85 % del total de residuos)

        - El marco demostró que las necesidades del mantenimiento predictivo basadas en las variaciones de la calidad del producto dan lugar a un ahorro significativo de los costes y a la mejora de la eficacia.
        - Impacto financiero:
            - Reducción del 50 % de los costes de paradas improductivas de la máquina.
            - Reducción del 64 % de los costes relacionados con desechos.
- Caso 2: Detección de anomalías en motores de inducción usando datos del IoT en tiempo real
    - Métodos utilizados:
        - El estudio comparó tres algoritmos ML basados en su sensibilidad, especificidad y tiempo de interferencia (rendimiento promedio de los conjuntos de datos de pruebas y validación).
    - Resultados:
        - El estudio desarrolló con éxito un sistema de mantenimiento predictivo en tiempo real de bajo coste usando sensores IoT y algoritmos ML para la detección de anomalías en motores de inducción.

3.1.3. TECNOLOGÍAS PARA LA GESTIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO

En la SCM, la transformación digital está centrada en el incremento de la rapidez, la visibilidad y la capacidad de respuesta en toda la cadena de valor. Tal como se ha descrito anteriormente, las tecnologías se despliegan en todos los niveles analizados en el campo de la observación en la planificación y ejecución SCM.

Internet de las Cosas (IoT)

Los sensores IoT facilitan la ejecución operativa mediante:

- el seguimiento en tiempo real de envíos y contenedores,
- la monitorización del estado del almacén (por ejemplo, artículos termosensibles),
- la automatización del recuento de inventario y los disparadores de reposición.

Facilita la visibilidad, alerta y trazabilidad en tiempo real.

El IoT es considerado una tecnología habilitante y ya está normalizada en muchas grandes empresas. Por ejemplo, los resultados de casos piloto muestran que la monitorización basada en el IoT en redes de producción puede reducir la pérdida de material en un 12-20 %.

Computación en la nube

Las plataformas en la nube constituyen la columna vertebral para la integración de sistemas de planificación y herramientas de visibilidad de la cadena de suministro:

- Los sistemas en la nube alojan cuadros de mando, KPI (indicadores clave de rendimiento) en tiempo real e interfaces de planificación colaborativa.
- Utilizados para sincronizar flujos de datos entre departamentos y socios externos (proveedores, transportistas, clientes), facilitan el intercambio de datos en las redes y la toma de decisiones descentralizada.

Los sistemas de *edge computing* pueden dar respaldo a operaciones locales de almacenes o cadenas de producción.

Gemelos digitales

Aunque están en una fase inicial en la SCM, los gemelos digitales se utilizan para:

- simular flujos de producción y redes de cadena de suministro,
- evaluar cambios en la capacidad o interrupciones del suministro,

- evaluar el impacto de las medidas de sostenibilidad o las variaciones de los plazos de entrega.

Es frecuente que se asocien con torres de control, proporcionando una «visión de puente de mando» de las operaciones SCM.

Blockchain:

En la SCM, el *blockchain* ayuda a llevar a cabo el seguimiento del origen y el movimiento de las mercancías, a verificar la conformidad, y a automatizar las transacciones mediante contratos inteligentes. Resulta especialmente útil en sectores regulados o cadenas de suministro con certificado de sostenibilidad. Ofrece intercambios de datos seguros y transparentes para garantizar la conformidad contractual.

Ciberseguridad

Identificada en la encuesta SCM como pilar central de las estrategias digitales y una de las principales preocupaciones de las empresas con un 100 % de la mediana empresa y un 60 % de la pequeña empresa calificándola como «crítica», la ciberseguridad en la SCM es identificada como un elemento de alto riesgo en ecosistemas de proveedores complejos y se señala al *blockchain* como una solución prometedora.

Inteligencia Artificial (IA)

La IA facilita la previsión inteligente, la gestión de riesgos y la sincronización de la planificación:

- En la SCM, facilita la previsión, la optimización del inventario, el control dinámico del inventario, la planificación y la programación. Según el informe SCM, la IA se mencionó en 9 de 31 casos de uso y ha dado lugar a una reducción de hasta el 15 % en los costes relacionados con la logística y a una mejora del 35 % en la precisión del inventario. Sin embargo, la adopción de la IA sigue siendo limitada entre las pymes, pero su potencial estratégico es ampliamente reconocido
  Se despliegan diferentes enfoques IA dependiendo del contexto:
  - Aprendizaje Automático (ML): En la SCM, el ML se usa para la prevención, la valoración de riesgos y la planificación adaptativa. Estos sistemas mejoran con el paso del tiempo aprendiendo de datos históricos.
  - Aprendizaje Profundo (DL): subconjunto del ML, en SCM, el DL posibilita el reconocimiento de imágenes (por ejemplo, para calidad del producto) y la extracción de patrones a partir de grandes conjuntos de datos.
  - Grandes Modelos de Aprendizaje Automático (LMM): En la SCM, posibilitan la previsión global de la demanda y la optimización de las redes.
  - IA generativa / Modelos de Lenguaje de Gran Tamaño (LLM): En la SCM, posibilitan la automatización de documentos y los *chatbots* de atención al cliente.

  Para intentar solucionar los problemas asociados con la confianza y la usabilidad, están surgiendo nuevos enfoques para que la IA sea más transparente y accesible:
  - Inteligencia Artificial Explicable (XAI): En la SCM, los sistemas de gestión de riesgos cada vez utilizan con más frecuencia **métodos XAI** como **SHAP**, **LIME** y **GradCAM** con el objetivo de clarificar cómo los modelos IA toman las decisiones, por ejemplo, cómo clasifican a los proveedores basándose en los plazos de entrega, el rendimiento ESG (factores sociales, ambientales y de gobierno corporativo) o el coste. Estas herramientas ayudan a los *stakeholders* a comprender y confiar en valoraciones y previsiones automatizadas, consiguiendo que las recomendaciones de la IA sean más transparentes y aceptables para los encargados de la toma de decisiones.
  - Aprendizaje Automático Interpretable (IML): En previsión y logística, los **modelos IML** como los **árboles de decisión**, las **máquinas de incrementación explicable (EBM)** y los **GAM** se utilizan para proporcionar la lógica clara y trazable que subyace en las recomendaciones de planificación. Por ejemplo, **DIFFI** y **LionForests** ayudan a identificar las causas raíz de las interrupciones o anomalías de la cadena de suministro,

garantizando decisiones que son explicables y auditables, lo que resulta especialmente importante para los sectores regulados y los procesos de planificación colaborativa.

En relación con los niveles SCM definidos en el campo de observación, la aplicación IA puede resumirse del siguiente modo:

- Planificación de Beneficios (PP): La IA simula resultados financieros y posibilita la planificación de escenarios.
- Planificación de Ventas y Operaciones (S&OP): La IA optimiza la previsión de la demanda, permitiendo mejorar la coordinación entre las previsiones de ventas y los planes de producción.
- Plan Maestro de Producción (MPS) y MRP: la IA calcula la producción óptima y las cantidades que hay que comprar en situaciones de incertidumbre.
- Programación de Capacidad Finita / Infinita (FCS/ICS): los algoritmos impulsados por la IA mejoran la asignación y secuenciación de los recursos.

Beneficios para el rendimiento:

Algunos casos de uso de la SCM que integran la IA muestran una reducción de hasta el 15 % en los costes asociados con la logística y de una mejora del 35 % en los niveles del inventario.

3.1.4. MODELOS EMERGENTES DE OPERACIÓN E INNOVACIÓN

Más allá de las tecnologías, los nuevos modelos operativos están ganando impulso:

- La colaboración basada en plataformas entre las pymes y los proveedores de servicios (por ejemplo, plataformas PdM o torres de control de logística integradas SCM).
- Arquitecturas orientadas al servicio que reducen la necesidad de infraestructura interna. Por ejemplo, el PdMaaS (Mantenimiento Predictivo como Servicio) posibilita a las empresas, especialmente a las pymes, la contratación de capacidades predictivas sin tener que comprar la infraestructura. Es rentable y se proporciona habitualmente a través de plataformas en la nube u OEM (Fabricante del Equipo Original), conjuntando el diagnóstico con el equipo (Equipo como Servicio).
- Colaboraciones público-privadas y bancos de pruebas, que ayudan a las pymes a la experimentación de bajo riesgo.

El informe BC ofrece también ejemplos concretos de pymes que acceden a infraestructura digital compartida, servicios embebidos o módulos de formación a través de ecosistemas regionales. Estos modelos y ecosistemas proporcionan un acceso compartido a servicios de soporte, formación e infraestructuras, especialmente en regiones con clústeres industriales activos, desempeñando un papel fundamental a la hora posibilitar que la alta tecnología sea accesible para los pequeños actores.

3.2. CONTRIBUCIONES A LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA

La transformación digital en la fabricación avanzada y los dominios observados en los tres informes está estrechamente interrelacionada con la transición verde. Las tecnologías descritas no solo posibilitan la eficacia operativa, sino que también constituyen una palanca poderosa para el desempeño ambiental. Este capítulo resume el modo en que las tecnologías avanzadas aplicadas a las actividades observadas contribuyen a los objetivos de sostenibilidad (reduciendo las emisiones, optimizando los recursos y dando respaldo a las prácticas de una economía circular) y cómo se alinean con marcos políticos y reguladores más amplios.

3.2.1. SOSTENIBILIDAD: OPORTUNIDAD Y OBLIGACIÓN

Tanto el informe PdM como el informe SCM destacan una doble narrativa respecto a la sostenibilidad:

- En el contexto del PdM, la sostenibilidad se enmarca como impulsor de la innovación y la eficacia. Aumenta el rendimiento, disminuye los costes y mejora la competitividad, convirtiéndose en una mejora «autofinanciable».
- En el contexto de la SCM, la sostenibilidad también es un imperativo normativo. Las empresas deben cumplir los criterios ESG (factores ambientales, sociales y de gobierno corporativo), los objetivos del Pacto Verde de la UE y los marcos legales emergentes (por ejemplo, debida diligencia en cadenas de suministro, monitorización de emisiones de Alcance 3, etc.).
- En el contexto común para las pymes, la integración de la transformación digital con los objetivos ambientales sigue sin haberse desarrollado. Gran parte de la pequeña y mediana empresa (PYME) carece de la experiencia necesaria en gestión de la sostenibilidad, especialmente a la hora de aplicar el pensamiento sistémico en la economía circular. Aunque los objetivos ambientales se comunican cada vez más, aún siguen existiendo lagunas significativas en los enfoques que incluyen consideraciones ecológicas en las operaciones empresariales y en los programas de desarrollo de empleados.

Esto da lugar tanto a una oportunidad estratégica como a una obligación de cumplimiento: las tecnologías digitales posibilitan que las empresas se anticipen y cumplan requisitos ambientales estrictos al tiempo que se posicionan como líderes en el ámbito de la innovación ecológica.

3.2.2. EL PDM COMO CATALIZADOR DE LA EFICIENCIA AMBIENTAL

El informe PdM enmarca el mantenimiento predictivo como una estrategia en la que todos ganan (*win-win*): mejora el rendimiento operativo al tiempo que logra progresos en los objetivos de sostenibilidad. Sus contribuciones medioambientales son tangibles y mensurables:

- Menor consumo de energía: al detectar ineficacias de forma temprana y mantener las máquinas en óptimas condiciones de funcionamiento, el PdM evita pérdidas energéticas.
- Menos residuos materiales: el mantenimiento programado basado en las necesidades reales reduce las reparaciones de emergencia y la sustitución prematura de piezas, minimizando el uso de recambios y de la materia prima.
- Mayor duración de los activos: la detección temprana y la corrección de fallos ayudan a ampliar la vida útil del equipo, alineándose con los objetivos de la economía circular.
- Optimización de las emisiones del transporte y la logística: al evitar las averías se reduce el número de intervenciones no planificadas y la necesidad urgente de recambios, lo que da lugar a menos emisiones relacionadas con la logística.
- Respaldo de la economía circular: el PdM facilita la reutilización y la renovación, disminuyendo la necesidad de equipos nuevos y contribuyendo a una gestión sostenible de los activos.

En conjunto, el PdM respalda tanto los objetivos de reducción de CO_2 como la competitividad económica, y ayuda a las pymes a lograr un equilibrio entre los objetivos ambientales y la rentabilidad. Los informes describen el PdM como una palanca estratégica que reconcilia la acción climática con la eficacia industrial.

3.2.3. GESTIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO VERDE Y SCM 4.0

El informe SCM va más allá y posiciona a la SCM 4.0 como habilitador fundamental de la Gestión de la Cadena de Suministro Verde (GSCM). Gracias a la digitalización, las empresas mejoran su

visibilidad y el control del impacto sobre el medio ambiente en toda la cadena de valor, desde la contratación hasta la producción, el transporte y el fin de la vida útil.

Entre las contribuciones clave podemos señalar:

- Una reducción del 12–20 % de los residuos materiales gracias a la monitorización habilitada por IoT de los flujos de recursos.
- Una reducción del 5–10 % del CO_2 en logística por medio del equilibrado de la carga y la optimización de la ruta basada en IA.
- La trazabilidad habilitada por el *blockchain* incrementa la cuota de los materiales reciclados utilizados en la producción hasta en un 15 % debido a la mejora de la transparencia y la responsabilidad de los proveedores
- Integración de la economía circular, con herramientas digitales que posibilitan una logística de bucle cerrado, la refabricación y el seguimiento del ciclo vital.
- El soporte del ecodiseño, que permite a los *stakeholders* de la cadena de suministro colaborar en el desarrollo de productos más respetuosos con el medio ambiente desde la fase de diseño y en adelante.

A pesar de estos avances, solo el 27 % de las empresas encuestadas han alineado formalmente sus estrategias digitales y de sostenibilidad, señalando que existe una oportunidad destacada para la sinergia.

3.3. IMPACTOS OPERATIVOS, ORGANIZATIVOS Y SOBRE LA POBLACIÓN ACTIVA

Basándonos en capítulos previos que han esbozado el modo en que las tecnologías emergentes pueden mejorar las actividades empresariales y han destacado su contribución a la sostenibilidad, esta sección se centra en sus impactos más generales. Las tecnologías emergentes no solo ofrecen soluciones digitales a retos concretos, sino que también están reconfigurando de forma fundamental el modo en que operan las empresas, cómo se estructuran ellas mismas y cómo evoluciona su población activa. A continuación resumimos los cambios clave identificados en los tres informes, tal como se manifiestan en el mantenimiento y el mantenimiento predictivo (PdM), la gestión de la cadena de suministro (SCM), **la automatización, el control de calidad y las operaciones CNC.**

Tanto el PdM como la SCM son catalizadores de cambios más amplios en los flujos de trabajo y las estructuras organizativas, lo que exige una adaptación significativa en las organizaciones y los roles de la población activa.

Están surgiendo nuevos roles en ambos dominios que combinan la experiencia técnica con la fluidez digital. Se espera cada vez más que los profesionales del mantenimiento y la logística interpreten cuadros de mando, interactúen con sistemas impulsados por IA y colaboren de forma interdepartamental.

En el PdM, los nuevos modelos como el PdMaaS cambian las tareas que son ejecutadas por técnicos para que sean realizadas por analistas de datos y operadores de servicios a distancia.

En la SCM, se produce una transformación similar. La toma de decisiones cada vez está más impulsada por los datos, lo que exige una mayor coordinación entre TI, logística, compras y planificación. Los trabajadores deben gestionar plataformas integradas, validar sugerencias algorítmicas y colaborar con *stakeholders* externos. Estos cambios resaltan la creciente importancia de las capacidades transversales y la alfabetización digital.

3.3.1. IMPACTOS OPERATIVOS

A nivel operativo, el PdM y la SCM 4.0 han incorporado cambios importantes en el modo en que se toman las decisiones, cómo se estructuran los flujos de trabajo y cómo se gestionan los recursos en tiempo real.

En el **mantenimiento predictivo**, las operaciones están cambiando de las rutinas preventivas tradicionales a un enfoque más dinámico y **orientado por datos**. En el PdM, las intervenciones se basan en patrones de desgaste reales o anomalías detectadas por sensores, lo que da lugar a una reducción de las paradas improductivas de las máquinas y un uso más eficiente de los recursos.

Esta transición conlleva varias mejoras operativas tangibles:

- **Menos paradas improductivas no planificadas** gracias a la monitorización continua del estado y las alertas en tiempo real.
- **Programación estratégica** de las tareas de mantenimiento durante las paradas planificadas o los períodos de poca actividad.
- **Toma de decisiones informada con datos**, que sustituye a la intuición por diagnósticos basados en sensores y cuadros de mando de previsiones.
- **Automatización de decisiones rutinarias**, por ejemplo, activación de órdenes de mantenimiento cuando se superan determinados umbrales.

En la SCM, de forma similar, las herramientas digitales tales como la IA, el IoT y las plataformas en la nube incrementan la rapidez y la capacidad de respuesta en toda la cadena de suministro. La planificación se convierte en un elemento menos reactivo y más anticipatorio gracias a los datos en tiempo real y al modelado de escenarios automatizado.

Los cambios operativos incluyen:

- **Visibilidad en tiempo real** de la logística y los flujos de inventario, lo que mejora la capacidad de respuesta a posibles interrupciones.
- **Planificación y replanificación dinámicas**, basadas en entradas en directo de dispositivos IoT y gemelos digitales.
- **Toma de decisiones asistida por IA**, incluida optimización de la ruta de entrega y compras automatizadas.
- **Integración global (*end-to-end*) del flujo de trabajo**, desglosando silos entre departamentos tales como ventas, producción y logística.

Estos cambios también se ven corroborados por los resultados del informe regional del País Vasco. El impacto operativo de la transformación digital está reconfigurando el modo en que los profesionales llevan a cabo sus tareas diarias e interactúan con los sistemas tecnológicos. Existe un cambio obvio hacia enfoques preventivos en todos los perfiles, cambiando del mantenimiento reactivo al mantenimiento predictivo basado en el estado y el control de la calidad respaldados por redes de sensores, alertas en tiempo real y sistemas de monitorización avanzada.

La redistribución de las tareas es evidente. Por ejemplo, los operarios de máquinas o cadenas de producción están adquiriendo parte de las responsabilidades tradicionales del control de calidad, convirtiendo la calidad en una responsabilidad compartida entre los equipos de producción. En la actualidad, los técnicos de mantenimiento se enfrentan a mayores responsabilidades que exceden las tareas de reparación tradicionales e incluyen la contribución a la optimización del proceso y la integración tecnológica de sistemas de automatización.

3.3.2. IMPACTOS ORGANIZATIVOS

Las mejoras operativas solo son posibles cuando vienen respaldadas por **estructuras organizativas y cambios culturales** apropiados. La implementación de las herramientas PdM y

SCM 4.0 pone en tela de juicio las jerarquías tradicionales y fomenta modelos más colaborativos y ágiles.

En ambos dominios, las organizaciones están adoptando cada vez más **métodos de trabajo ágil** y **trabajo en equipo interfuncional**. Actualmente se basan en ciclos piloto cortos con bucles de retroalimentación iterativa en lugar de en proyectos lineales de larga duración. Esto facilita la innovación y una mejor alineación con panoramas tecnológicos en rápida evolución.

Entre las evoluciones clave de las organizaciones se incluyen:

- **el cambio de departamentos aislados a la colaboración interfuncional**, involucrando a equipos de datos, mantenimiento, operaciones e TI.
- **el desarrollo de modelos de proyectos ágiles** basados en una rápida experimentación y escalada.
- **un mayor uso de plataformas digitales**, lo que incrementa la transparencia y la coordinación entre equipos.
- **roles de liderazgo más fuertes en la gestión del cambio**, actuando los gestores como habilitadores de la adopción digital.

Del estudio del caso del País Vasco se deduce que la transformación a nivel organizativo incluye la emergencia de roles híbridos que sirven de puente para funciones tradicionalmente separadas de los dominios del mantenimiento, la automatización y la calidad. La automatización ya no está aislada, sino interconectada con plataformas más amplias de datos y producción, lo que exige que los empleados sepan utilizar interfaces humano-máquina y protocolos de comunicación.

Esta convergencia de roles facilita una nueva dinámica de colaboración en la que los profesionales deben superar los límites tradicionales y utilizar activamente sistemas integrados. Además, la adopción de procesos de toma de decisiones impulsados por datos ha convertido a la analítica en tiempo real en un elemento fundamental para las operaciones cotidianas.

Cada vez es más frecuente que las empresas contraten servicios relacionados con la IA, la ciberseguridad y el mantenimiento predictivo, lo que resalta la creciente necesidad de roles internos digitalmente conscientes. Estos profesionales pueden carecer de gran experiencia técnica, pero poseen suficientes conocimientos básicos para garantizar una comunicación fluida con proveedores tecnológicos externos. Su función consiste en traducir las innovaciones tecnológicas en prácticas operativas que se alineen con las necesidades internas y con los objetivos estratégicos de la organización.

Un cambio especialmente destacable es el surgimiento de nuevos modelos de negocio, por ejemplo, el Mantenimiento como Servicio (MaaS). Habilitado por el PdM, este modelo permite a los vendedores ofrecer contratos basados en rendimientos o garantías de *uptime* del equipo, redefiniendo de este modo las relaciones entre clientes y proveedores:

- El mantenimiento se convierte en un **servicio de valor añadido**, no solo en un centro de costes.
- Los fabricantes están evolucionando hacia **modelos orientados al servicio**, con el diagnóstico predictivo integrado a distancia.
- Esta transformación facilita **flujos de ingresos recurrentes** y **colaboraciones más estrechas con los clientes**.

No obstante, estos cambios no tienen lugar sin plantear retos. En el informe SCM se han identificado varias **barreras organizativas para la transformación**:

- **problemas de integración tecnológica**, especialmente en pymes con sistemas heredados.
- **problemas de ciberseguridad**, exacerbados por una mayor exposición digital.
- **resistencia al cambio**, especialmente entre los trabajadores de más edad o con más experiencia.

- **restricciones financieras**, que limitan la capacidad de las pymes para invertir en infraestructura o talento.

A pesar de estos obstáculos, las organizaciones que tienen éxito son aquellas que gestionan el cambio de forma proactiva, creando capacidades internas y fomentando una **cultura del aprendizaje, la confianza en los datos y la experimentación**.

3.3.3. IMPACTOS SOBRE LA POBLACIÓN ACTIVA

La adopción tecnológica va de la mano de una transformación del trabajo. El PdM y la SCM 4.0 exigen **nuevos roles, nuevas capacidades y una nueva mentalidad**.

En el **PdM**, los profesionales del mantenimiento están cambiando de la realización de tareas puramente mecánicas a la **monitorización, análisis y estrategia**. Cada vez es más frecuente que los técnicos tradicionales tengan que interpretar datos de sensores, entender patrones estadísticos y trabajar con sistemas TI.

Este cambio conlleva:

- la **transformación de los roles**, por ejemplo, la emergencia de analistas PdM o de estrategas del mantenimiento digital.
- la **integración de capacidades TI y OT**, ya que los técnicos deben interactuar actualmente con herramientas IA y software de monitorización del estado.
- la **formación cruzada entre departamentos**, fomentando la colaboración de los equipos de ingeniería, datos y mantenimiento.

De forma simultánea, el estudio del País Vasco reveló la creciente demanda de perfiles profesionales híbridos que combinen la experiencia técnica tradicional con las competencias digitales. Por ejemplo:

- Ahora se espera que los técnicos combinen capacidades de inspección con la gestión digital y de datos usando sistemas de visión de las máquinas, escáneres 3D y herramientas de verificación digital.
- Está aumentando la frecuencia con la que los operarios CNC interactúan con sistemas MES y ERP, llevan a cabo ajustes de programas, y aplican técnicas de análisis de datos, incluido el mantenimiento predictivo.

En la **SCM**, los cambios en la población activa reflejan estos desarrollos. Se está produciendo un incremento de la entrada manual de datos y la planificación basada en reglas. En la actualidad, los empleados supervisan los resultados de los algoritmos, gestionan excepciones complejas y proporcionan información estratégica para las decisiones relativas a la planificación.

El informe SCM identifica varios impactos importantes sobre la población activa:

- **Emergencia de roles híbridos**, por ejemplo, analistas de la cadena de suministro con experiencia digital y operativa.
- **Creciente demanda de alfabetización sobre datos y sistemas**, incluso en roles tradicionalmente no técnicos.
- **Mayor necesidad de estar concienciados sobre los problemas relacionados con la ciberseguridad**, dada la sensibilidad de los sistemas conectados.
- **Mayor énfasis en las curvas de aprendizaje y la formación continua**, ya que las tecnologías evolucionan con más rapidez que los planes de estudio actuales.

Sin embargo, muchas empresas (especialmente, pymes) se enfrentan a retos acuciantes:

- **La carencia de capacidades digitales y la escasez de talento** limitan su capacidad para adoptar de forma eficaz herramientas SCM 4.0.
- **La falta de alineación entre los programas de formación y los sistemas del mundo real** socava el retorno de la inversión.

- **La resistencia de los empleados a la automatización**, ligada con frecuencia al temor a perder el trabajo o a que este resulte demasiado complejo, crea fricciones

Para tener éxito en este nuevo contexto, los trabajadores deben desarrollar capacidades tanto **técnicas** como **blandas (*soft skills*)**:

Las capacidades técnicas y analíticas clave incluyen:

- visualización y análisis de datos (por ejemplo, con el uso de cuadros de mando)
- comprensión de modelos de fallo y algoritmos predictivos
- familiaridad con herramientas diagnósticas y plataformas en la nube

Las capacidades blandas críticas incluyen:

- adaptabilidad y aprendizaje continuo
- trabajo en equipo interdepartamental
- comunicación efectiva de resultados técnicos

Estas observaciones destacan la urgencia de las empresas para incorporar **el desarrollo de la población activa y la gestión del cambio** en sus estrategias digitales.

3.4. ADOPCIÓN Y MADUREZ EN LAS PYMES

La adopción de tecnologías avanzadas y las contribuciones a la transición verde descritas previamente se están acelerando en la pequeña y mediana empresa (PYME). Sin embargo, este proceso sigue un ritmo desigual y se enfrenta a diversas barreras operativas, culturales y estratégicas. Esta sección presenta una síntesis de los niveles de adopción, las limitaciones clave y las implicaciones asociadas para el desarrollo de capacidades.

Los datos y cifras aquí indicados se han recopilado en los estudios referenciados en los tres informes así como en encuestas específicas realizadas a pymes.

3.4.1. NIVELES DE ADOPCIÓN ACTUALES Y CIFRAS CLAVE

En general, las pymes reconocen cada vez más el valor estratégico de las tecnologías PdM y SCM 4.0. Sus motivaciones emanan tanto de impulsores internos (por ejemplo, la mejora de la eficacia y la reducción de los costes) como de presiones externas (requisitos de cumplimiento normativo, expectativas de los clientes e integración de la cadena de suministro).

3.4.1.1. ASPECTOS DESTACADOS DE LA ADOPCIÓN DEL PDM:

- El mercado global del mantenimiento predictivo muestra un crecimiento robusto, siendo la fabricación un sector líder.
  - Aunque el informe PdM señala que el 81 % de las empresas estaba invirtiendo en enfoques predictivos en 2018, con un 40 % describiéndolo como una prioridad estratégica, las prácticas más comunes siguen estando basadas en el mantenimiento correctivo o basado en el tiempo.
  - El interés por la búsqueda del PdM se ha triplicado desde 2017, sobrepasando a otras búsquedas asociadas con el mantenimiento, lo que indica su creciente importancia como solución industrial esencial.
  - El método PdM más ampliamente utilizado es la monitorización de las vibraciones (28 % de implementaciones).
- Los resultados de la encuesta indican que, mientras que las pymes reconocen la importancia del mantenimiento predictivo (PdM) para la mejora de la eficacia y la competitividad, su adopción continúa estando en una fase temprana de exploración en el caso de muchas empresas.
- Unos pocos líderes vanguardistas han implementado sistemas PdM piloto, especialmente en activos críticos.

3.4.1.2. ASPECTOS DESTACADOS DE LA ADOPCIÓN DE LA SCM:

- Los resultados de la encuesta revelan una gran variación en la madurez digital, desde redes logísticas altamente conectadas hasta flujos de trabajo manuales basados en Excel.
- Solo un pequeño porcentaje de las pymes han adoptado estrategias SCM verdes y digitales: El 3 % de las pymes de la UE muestran una gran intensidad digital, en comparación con el 98 % de las grandes empresas.
- El 64 % de las pymes señalan dificultades a la hora de analizar sus propios datos operativos y el 74 % tienen la sensación de que no están generando suficiente valor con sus inversiones digitales actuales.

- Los resultados de la encuesta a las pymes indican que las funciones de programación y ejecución son las que se digitalizan con más frecuencia. No obstante, las funciones de previsión, S&OP y MPS muestran una menor integración, especialmente en la pequeña empresa.
- La adopción específica de la SCM se concentra en la ejecución y la programación, con el uso de herramientas tales como la IA, el IoT y la computación basada en la nube.
- Las funciones de previsión y S&OP están infradesarrolladas, especialmente en la pequeña empresa.

3.4.2. BARRERAS Y LIMITACIONES

Aunque las pymes reconocen en gran medida la propuesta de valor de las tecnologías PdM y SCM 4.0, **la naturaleza e intensidad de las barreras para su adopción son ligeramente diferentes** en estos dos dominios.

3.4.2.1. LIMITACIONES FINANCIERAS

En el caso del **PdM**, las barreras financieras están asociadas frecuentemente con:

- El **elevado coste inicial** de los sensores, el equipo de monitorización, las plataformas analíticas y la integración en la infraestructura de mantenimiento ya existente.
- La necesidad de **servicios especializados o de asesores externos**, que añaden costes operativos en ausencia de capacidades internas. Incluso con los modelos en la nube o «como servicio», los costes operativos continuos siguen siendo un motivo de preocupación.
- La limitada concienciación o acceso a **financiación específica** para la innovación PdM — muchas pymes pueden no conocer las subvenciones disponibles o encontrar muchas dificultades para acceder a ellas.

En el caso de la **SCM**, las limitaciones financieras emanan de:

- El **coste acumulado de la digitalización de diversas funciones** (por ejemplo, compras, inventario, logística), lo que puede requerir revisiones de las plataformas o migración a la nube.
- La carencia de visibilidad del retorno de la inversión debida a la **infrautilización de herramientas digitales**: muchas pymes invierten en cuadros de mando o extensiones ERP, pero no logran adoptarlos por completo.
- Dificultades a la hora de justificar las inversiones en **componentes de la transición verde**, por ejemplo, trazabilidad del carbono o logística circular en ausencia de ganancias a corto plazo.

En ambos dominios:

- La limitada capacidad de inversión de las pymes, que trabajan con frecuencia con un restringido flujo de caja, sigue siendo un obstáculo determinante. Incluso los modelos de pago por uso o «como servicio» son percibidos, en ocasiones, como gastos recurrentes arriesgados.
- Muchas pymes no disponen de acceso a financiación pública o inversiones privadas, lo que ralentiza la adopción de la tecnología.

3.4.2.2. BARRERAS TÉCNICAS

En el **PdM**, los retos técnicos tienen su origen en muchos casos en:

- **Dificultades para la integración**: relativas a la conexión de sistemas de datos y sensores modernos con maquinaria más antigua o con herramientas CMMS diferentes.
- **Problemas de interoperabilidad**: Interfaces de máquinas o formatos de datos incompatibles que obstaculizan una monitorización fluida.
- **Riesgos para la ciberseguridad**: El incremento de la conectividad da paso a vulnerabilidades, especialmente en dispositivos periféricos sin supervisión.

En la **SCM**, las barreras técnicas se manifiestan a través de:

- Sistemas heredados que no son compatibles con la automatización o la colaboración en tiempo real.
- Dificultades para **vincular sistemas de planificación y operaciones**, por ejemplo, a la hora de integrar cuadros de mando con datos reales de transporte o almacén.
- La falta de marcos de gobernanza y calidad de los datos, lo que provoca retrasos o equivocaciones en la toma de decisiones.

En ambas áreas:

- La **ausencia de estructuras de soporte TI internas robustas** exacerba las barreras técnicas. Es frecuente que las pymes dependan de asistencia de terceros o de personal generalista, retrasando de este modo la resolución y la innovación.
- La ciberseguridad es un motivo de preocupación transversal, con un 100 % de la mediana empresa y un 60 % de la pequeña empresa clasificándola como «crítica», exacerbada por la limitada experiencia interna
- Las **infraestructuras TI heredadas, complejas y fragmentadas,** obstaculizan la integración de soluciones PdM/SCM

3.4.2.3. BARRERAS ORGANIZATIVAS Y ESTRATÉGICAS

En el caso del **PdM**, las barreras organizativas incluyen:

- **Carencia de una estrategia de mantenimiento digital**, lo que da lugar a iniciativas piloto fragmentadas o aisladas.
- **Escasa visibilidad del valor PdM** a nivel de gestión, lo que provoca un bajo nivel de priorización.
- La reluctancia a cambiar enfoques tradicionales tanto preventivos como reactivos, especialmente entre los técnicos experimentados.

En la **SCM**, las barreras estratégicas tienen a ser más transversales:

- **Carencia de una hoja de ruta digital unificada** entre los diferentes departamentos, lo que da lugar a una adopción fragmentada y descoordinada.
- Resistencia del personal que ha utilizado Excel o sistemas en papel, especialmente en logística y compras.
- Desconexión entre los objetivos de la cadena de suministro verde y las decisiones operativas cotidianas, debido frecuentemente a **la falta de alineación estratégica**
- Muchas pymes no disponen de cargos tales como *Chief Data Officer*, propietario del proceso SCM o *IT Security Officer*, lo que limita la capacidad de innovación interna.

En ambos dominios, **la resistencia cultural al cambio** y la falta de liderazgo en la transformación digital son problemas recurrentes. Es frecuente que los esfuerzos digitales estén encabezados por líderes aislados sin un apoyo organizativo más amplio.

3.4.2.4. NECESIDADES RELATIVAS A LAS CAPACIDADES

Cada una de las limitaciones indicadas previamente subraya la creciente necesidad de nuevas capacidades y habilidades.

Estas **lagunas en las capacidades** pueden ser **multidimensionales**, afectando tanto a los trabajadores de primera línea como a las organizaciones de gestión.

Basándonos en los tres informes PdM, SCM y BC, estamos consolidando los resultados con el fin de compartirlos con el Paquete de Trabajo 5, que es el responsable de la formación en LCAMP. Mediante la identificación de las competencias clave específicas a cada campo, este paquete de trabajo podrá utilizar los datos que sirven de soporte a sus actividades. La colaboración entre los diferentes Paquetes de Trabajo es un aspecto clave del proyecto LCAMP.

La tabla completa puede consultarse en el Anexo 1:

- **44 entradas** que describen capacidades, competencias y actitudes.
- Abarca **9 ocupaciones diferentes.**
- La categorización más común es la **«Competencia»**, seguida por «Capacidad» y «Actitud».
- Se identifican **4 tipos de capacidades diferentes**, reflejando la diversidad de capacidades necesarias: Alfabetización IA, digital, profesional y transversal.
- El análisis recalca de forma enfática las **capacidades relacionadas con la IA y la ciberseguridad** en todos los dominios.

Este es un extracto que refleja el tipo de información disponible en el Anexo 1:

Tabla 1. Capacidades necesarias (extracto)

Área de competencia LCAMP	Categorización	Subcategorías recomendadas en el marco LCAMP	Ocupación / Origen del informe	**Capacidad / Competencia / Actitud**
Alfabetización IA	**Competencia**	Competencia digital crítica	**Mantenimiento Predictivo (PdM)**	IA o Aprendizaje Automático básicos - conocimientos básicos de modelos IA/ML
	Capacidad	Visión artificial	**Técnico de control de calidad (BC)**	Visión informática y CNN para detección de defectos - aplicación de redes neuronales al control de calidad automatizado
Digital	**Actitud**	Ciberseguridad	**Gestión de la Cadena de Suministro (SCM)**	Concienciación sobre ciberseguridad - concienciación sobre seguridad TI
	Competencia	Resolución de problemas	**Mantenimiento Predictivo (PdM)**	Resolución de problemas (mantenimiento) - pensamiento analítico para la toma de decisiones basada en datos
		Diseño de sistemas	**Técnico de automatización-robótica (BC)**	Integración de robótica industrial - conexión de robots con sistemas de líneas de producción
	Capacidad	Alfabetización en datos	**Mantenimiento Predictivo (PdM)**	Interpretación de datos de sensores - capacidad para leer y utilizar datos de sensores IoT
		ICT	**Técnico de automatización-robótica (BC)**	Protocolos de comunicación (OPC-UA, Ethernet) - implementación de estándares de comunicación industrial
			Operario CNC (BC)	Interfaces digital y HMI - uso de controles en pantalla táctil en máquinas CNC.
			Técnico de mantenimiento (BC)	Instalación y configuración de sensores IoT industriales - configuración de sensores conectados para recopilación de datos
		Resolución de problemas	**Técnico de mantenimiento (BC)**	Resolución de problemas de conectividad de datos en redes IoT - resolución de problemas de comunicación en sistemas conectados
		Alfabetización en datos	**Técnico de control de calidad (BC)**	Uso de sistemas digitales de inspección - utilización de equipo automatizado de medición y realización de pruebas
			Operario CNC (BC)	Integración de sistemas MES/ERP - conexión de las operaciones de las máquinas con los sistemas de la empresa
			Técnico de mantenimiento (BC)	Utilización de plataformas basadas en la nube para monitorizar el rendimiento de las máquinas - acceso remoto a sistemas de monitorización
		Manufactura digital	**Operario CNC (BC)**	Utilización de software CAD/CAM - uso de programas de diseño y fabricación asistidos por ordenador

Transversal	**Actitud**	Comunicación	**Gestión de la Cadena de Suministro (SCM)**	Comunicación y coordinación - actitud receptiva y buena disposición a poner en práctica la transformación digital
		Flexibilidad/Agilidad	**Mantenimiento Predictivo (PdM)**	Adaptabilidad - buena disposición para adaptarse al cambio en los roles o tecnologías
	Competencia	Colaboración / trabajo en equipo	**Mantenimiento Predictivo (PdM)**	Colaboración - colaboración interdepartamental (mantenimiento, operaciones TI)
		Pensamiento crítico	**Gestión de la Cadena de Suministro (SCM)**	Pensamiento estratégico - comprensión holística de cadenas de suministro complejas
	Capacidad	Colaboración / trabajo en equipo	**Capacidades transversales (BC)**	Colaboración interfuncional - trabajo eficaz con equipos multidisciplinarios en entornos digitales
		Comunicación	**Capacidades transversales (BC)**	Comunicación y coordinación - transmisión clara de la información entre los diferentes departamentos y turnos
		Flexibilidad/Agilidad	**Capacidades transversales (BC)**	Adaptación a tecnologías emergentes - buena disposición para aprender y utilizar nuevas herramientas tecnológicas
		Resolución de problemas	**Capacidades transversales (BC)**	Resolución de problemas y toma de decisiones - análisis de situaciones y puesta en práctica de decisiones técnicas
		Mejora continua	**Capacidades transversales (BC)**	Mentalidad de mejora continua - identificación de oportunidades de optimización en procesos digitales de fabricación
Profesional	**Competencia Capacidad**	Diseño de sistemas	**Técnico de automatización-robótica (BC)**	Integración de robótica industrial - conexión de robots con sistemas de líneas de producción
		Diseño de sistemas	**Técnico de automatización-robótica (BC)**	Configuración de sistemas de visión - configuración de cámaras y procesamiento de imágenes para guía y automatización robótica

La promoción de una cultura del aprendizaje es fundamental. Las pymes no solo deben proporcionar formación relativa a las herramientas, sino también fomentar entornos en los que la curiosidad, el *feedback* y la experimentación digital estén normalizados.

3.4.3. VARIACIONES EN EL MUNDO REAL: EJEMPLOS BC

El informe BC confirma una variación significativa en la adopción en los diferentes sectores y regiones:

- En ecosistemas digitalmente avanzados, las pymes utilizan plataformas, *hubs* regionales y proveedores de servicios compartidos para sus capacidades PdM y SCM.
- En otros casos, la adopción está fragmentada o es superficial, y está más dirigida por requisitos externos que por estrategias internas.

Estas diferencias destacan la importancia de los sistemas de innovación territoriales, que ayudan a las pymes a superar limitaciones estructurales mediante el aprendizaje y la experimentación colaborativa.

3.5. TENDENCIAS FUTURAS Y RECOMENDACIONES ESTRATÉGICAS

Las transiciones digital y verde continúan reconfigurando el panorama industrial para las pymes. Las futuras tendencias y recomendaciones que se derivan de los tres informes destacan los avances tecnológicos, los nuevos modelos organizativos y las direcciones estratégicas que pymes y actores del ecosistema deberían poner en práctica. Aunque los dominios observados comparten direcciones comunes, sus trayectorias específicas difieren basándose en la aplicación tecnológica y la lógica operativa.

3.5.1. FUTURAS DIRECCIONES DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO (PDM)

El informe PdM recalca la importancia de crear estrategias escalables, orientadas a las personas y dirigidas por el rendimiento con el fin de conseguir que el mantenimiento predictivo sea más accesible e influyente en las pymes.

- Ampliación del acceso al soporte financiero y la adopción tecnológica:
  Muchas pymes siguen siendo reluctantes a la hora de adoptar el PdM debido a sus costes, riesgos o complejidad. El informe recomienda acciones concretas para reducir las barreras financieras y técnicas:
  - Facilitar incentivos financieros y acceso a tecnologías PdM asequibles, especialmente a través de colaboraciones público-privadas o programas a nivel de la UE.
  - Promocionar el uso de modelos PdM como Servicio escalables y basados en la nube para reducir el gasto de capital y disminuir las barreras para la adopción.
  - Fomentar el uso de plataformas de demostración colaborativas en las que las pymes puedan observar y comprobar aplicaciones de soluciones PdM en el mundo real.
- Inversión en formación de la población activa y el desarrollo de capacidades digitales
  El capital humano sigue siendo un factor crítico para el éxito del PdM. El informe resalta la necesidad de alinear la formación con la evolución de las prácticas de mantenimiento:
  - Expansión de capacidades digitales y formación en analítica de mantenimiento, especialmente entre técnicos y operarios.
  - Trabajo con centros de formación profesional (FP) para incorporar módulos específicos de PdM en los planes de estudios.
  - Fomento de enfoques *lifelong learning* (aprendizaje a lo largo de la vida) y *cross-skilling* (capacitación cruzada) para alinear los equipos de mantenimiento con las herramientas en evolución (por ejemplo, diagnóstico asistido por IA, monitorización a distancia).
- Optimización de estrategias PdM para conseguir competitividad a largo plazo:
  Para generar valor de larga duración, el PdM debe pasar de utilizarse en casos aislados a ser un pilar de la gestión estratégica de activos:
  - Cambio de casos de uso aislado del PdM a planes estratégicos de transformación del mantenimiento a nivel de empresa.
  - Inclusión de protocolos de ciberseguridad y gobernanza de datos en el diseño del sistema PdM.
  - Seguimiento y optimización de los KPI del PdM para demostrar el valor del negocio y el impacto sobre la sostenibilidad con el paso del tiempo.

3.5.2. FUTURAS PERSPECTIVAS Y RECOMENDACIONES PARA LA SCM 4.0

El informe SCM presenta una visión holística para la digitalización de la cadena de suministro que recalca la transparencia, la asociación y la alineación estratégica con las expectativas medioambientales y de los clientes

- Creación de confianza, transparencia y transmisión de información:
  A medida que las cadenas de suministro se digitalizan y descentralizan, el informe SCM destaca el papel fundamental de la confianza:
  - La digitalización (por ejemplo, las plataformas de gestión de relaciones con proveedores) debe utilizarse no solo para la automatización, sino para también para habilitar una comunicación abierta y trazable entre los socios.
  - Hay que fomentar mecanismos para la creación de confianza tales como las herramientas de colaboración, los cuadros de mando compartidos y las plataformas de coinnovación.
  - Las pymes deberían apoyarse en un equilibrio entre la eficiencia tecnológica y la interacción humana personalizada para sostener la cooperación y la lealtad a largo plazo.

- Recomendaciones estratégicas (10 acciones clave):
  Para dirigir la transformación digital y la complejidad global, el informe propone un marco estructurado con diez palancas de accionamiento:
  - Digitalizar compras y gestión de relaciones con proveedores – Implementar plataformas colaborativas y herramientas modulares (por ejemplo, EaaS) para impulsar la transparencia y la capacidad de respuesta.
  - Aprovechar las herramientas digitales para fomentar la transparencia – Crear demostraciones SCM 4.0 regionales y utilizar el *blockchain* o la IA para disponer de flujos de información abiertos.
  - Fortalecer la seguridad de la información y la gobernanza de datos – Garantizar un intercambio de datos seguro y conforme a las normativas entre todos los socios de la cadena de suministro.
  - Alinear los servicios de los proveedores con las expectativas de los clientes – Usar bucles de retroalimentación digital para adaptarse a la evolución de las necesidades de los clientes.
  - Equilibrar la eficiencia digital y la participación humana – Priorizar la inteligencia emocional, la negociación y la confianza en interacciones mediadas digitalmente.
  - Fomentar una cultura de la colaboración – Pasar de modelos transaccionales a modelos de colaboración, recalcando el valor compartido y la coinnovación.
  - Invertir en capacidades relacionales y en la actualización de la población activa – Proporcionar formación en capacidades relacionales, planificación y logística a través de socios FP y aprendizaje híbrido.
  - Fortalecer el soporte de la gestión del cambio – Ofrecer diagnósticos, servicios de asesoramiento y facilitación del cambio con el fin de apoyar a las pymes durante todo el proceso de transformación.
  - Incluir el elemento digital en las estrategias verdes – Integrar los KPI de la sostenibilidad en proyectos digitales (por ejemplo, emisiones del Alcance 3, logística circular).
  - Realizar auditorías periódicas de la confianza y las relaciones – Valorar la madurez de la colaboración y gestionar los riesgos emergentes de las relaciones con los proveedores.

3.5.3. ESTRATEGIAS DE TRANSFORMACIÓN DIGITAL PARA FABRICACIÓN AVANZADA: *INSIGHTS* DEL PAÍS VASCO

El informe del País Vasco proporciona valiosos *insights* sobre la realidad práctica de la transformación digital en la fabricación avanzada, destacando los retos y las oportunidades para el desarrollo de las pymes. El análisis revela que la resistencia humana al cambio sigue siendo el principal obstáculo para la transformación digital, superando incluso a la complejidad tecnológica y las restricciones financieras. Las empresas están evolucionando hacia perfiles de trabajadores híbridos que requieren tanto experiencia técnica tradicional como competencias digitales. Este cambio resulta especialmente evidente en profesiones tales como técnico de mantenimiento, técnico de automatización, operario CNC y técnico de calidad, profesiones en las que las capacidades digitales son cada vez más esenciales para la ejecución del trabajo y el desarrollo profesional.

Basándose en estos resultados, surgen varias estrategias clave para que las empresas recorran el camino de su transformación digital:

- Implementar estrategias de gestión del cambio centradas en las personas que gestionen la adaptación cultural junto con la formación técnica.
- Desarrollar roles internos para los empleados digitalmente alfabetizados, procedentes de programas de FP, que pueden servir de conexión entre las operaciones tradicionales y las tecnologías emergentes y ser unos intermediarios eficaces con proveedores externos de tecnología, por ejemplo, especialistas en IA y expertos en mantenimiento predictivo.
- Adoptar enfoques para la adopción gradual de la tecnología usando fondos públicos y llevando a cabo proyectos de colaboración con el fin de explorar tecnologías emergentes en entornos de bajo riesgo
- Reconocer el valor estratégico de los centros de FP del País Vasco a la hora de gestionar la transformación digital gracias a su contribución activa a proyectos de innovación aplicada y a su apoyo clave a la actualización y a la recapacitación de la población activa.

3.5.4. PRIORIDADES COMPARTIDAS PARA LA TRANSFORMACIÓN A LARGO PLAZO DE LAS PYMES

A pesar de los enfoques específicos a los dominios, de los tres informes surgen varias prioridades cruzadas:

- La accesibilidad financiera es esencial: ya sea para sensores, software o asesoramiento, las pymes necesitan puntos de entrada más sencillos a través de subsidios, alquileres o servicios compartidos.
- La transformación de la población activa es fundamental: hay que desarrollar simultáneamente capacidades digitales y blandas. En la SCM, esto incluye el pensamiento sistémico, la gestión de la confianza y la alfabetización IA. En el PdM, esto incluye la monitorización del estado, el diagnóstico y el análisis predictivo.
- Integración de objetivos digitales y verdes: las futuras estrategias deben incluir consideraciones medioambientales, por ejemplo, la eficiencia energética, la reducción de los residuos o el cálculo de la huella de carbono.
- El factor humano sigue siendo fundamental: tanto en las relaciones de la cadena de suministro como en el mantenimiento, la transformación depende del liderazgo, la colaboración y la adopción por parte de los usuarios.

4. LAS TENDENCIAS DE LA TRANSICIÓN DIGITAL Y VERDE INFLUYEN EN LOS CENTROS DE FP

Este capítulo presenta una tesis basada en las observaciones principales sobre el impacto de la transición verde y digital en los centros de formación, tal como queda esbozada en los tres informes elaborados (PdM, SCM y País Vasco). El análisis se basa en una revisión de la literatura, así como en los resultados de las encuestas y entrevistas realizadas en el marco de estos informes.

4.1. RETOS Y OPORTUNIDADES PARA LOS CENTROS DE FP

4.1.1. INTRODUCCIÓN

La transición verde y digital está impulsando una transformación profunda en la industria, lo que exige a los centros de formación que adapten sus programas y estrategias. Dado el rápido ritmo del cambio, es esencial que estos centros permanezcan actualizados con el fin de proporcionar a los alumnos las capacidades que requiere el mercado laboral. En la siguiente sección se resumen las principales oportunidades y retos que plantea esta transición.

4.1.2. FORTALECIMIENTO DE COLABORACIONES CON SOCIOS INDUSTRIALES

En respuesta a la necesidad de permanecer alineados con las demandas del sector productivo, los centros de formación están buscando cada vez más una colaboración directa con la industria. Muchas instituciones ya disponen de redes de socios de negocio que dan soporte a la integración de experiencias prácticas en sus programas, por ejemplo, formación dual, prácticas y proyectos conjuntos.

Esta tendencia fue confirmada en las encuestas realizadas: En los ámbitos del PdM y la SCM, la mayoría de los centros de formación encuestados priorizan las asociaciones con empresas más que las colaboraciones con otros centros de formación, con el objetivo de alinear sus programas con las actuales necesidades reales de la industria.

La alineación de los centros de FP con los socios industriales mediante una mayor colaboración sigue siendo esencial para elaborar programas de formación que correspondan con los requisitos reales de los puestos de trabajo. El desarrollo conjunto de rutas de aprendizaje, la integración de las tecnologías emergentes en los planes de estudios y la mejora de la respuesta a las necesidades del cambio continuo de las capacidades pueden llevarse a cabo a través de una colaboración más estrecha. La conjunción de estudiantes de FP con socios industriales da lugar a entendimientos mutuos, mejora la capacidad de innovación y prepara a los estudiantes para participar activamente en la transformación digital e industrial de una empresa.

4.1.3. FORMACIÓN PARA FORMADORES

Una de las observaciones más significativas de la encuesta SCM fue la identificación de los principales obstáculos para la integración de las tecnologías digitales emergentes 4.0 en los centros de formación. La mayor parte de los encuestados señalaron la falta de formación de los formadores como principal obstáculo, seguido por los elevados costes asociados con la transición.

Este problema no es específico de un país determinado, sino que afecta a sectores industriales en toda Europa. El informe «Tensiones sobre la población activa y las capacidades en la industria y programas de formación asociados» ya destaca esta laguna en Francia, donde se reconoce la necesidad urgente de fortalecer la formación del profesorado. De manera similar, un centro de formación de Turquía encuestado en el estudio SCM señaló: «El Ministerio debería convertir en obligatoria la formación del profesorado en la transición digital y verde en todas las instituciones de formación profesional».

El País Vasco ha puesto en práctica programas de formación para los formadores de FP con el objetivo de mantener al personal docente actualizado sobre los modernos desarrollos industriales, los métodos educativos y los avances tecnológicos. Los programas se centran en la enseñanza tanto de competencias técnicas como de métodos educativos modernos que incluyen enfoques de aprendizaje híbrido y basado en proyectos. Las iniciativas actuales requieren expansión y sistematización, así como una mayor accesibilidad para conseguir la total preparación de los educadores para entornos industriales inteligentes y conectados.

4.1.4. AUTONOMÍA DE LOS CENTROS DE FORMACIÓN

Otro reto destacado al que se enfrentan los centros de formación es la adaptación a las nuevas tendencias a pesar de su escasa autonomía. En muchos países europeos, estos centros deben seguir unas directrices estipuladas por autoridades de nivel superior (por ejemplo, ministerios de educación) que restringen su capacidad para tomar decisiones de forma independiente respecto a programas y métodos de enseñanza.

Según la encuesta PdM, el 44 % de los centros de formación señalaron una autonomía limitada y el 36 % la describieron como controlada. De manera similar, la encuesta SCM mostró que solo el 29 % de los centros disfrutaban de una autonomía plena.

4.1.5. FORMACIONES HÍBRIDAS

La transformación digital ha posibilitado una mayor flexibilidad y accesibilidad en las rutas de formación, con aumento de los modelos híbridos que combinan el aprendizaje presencial y en línea. Este modelo no solo facilita la transmisión de capacidades técnicas, sino que también fomenta el trabajo en red y la integración profesional.

Además, la formación híbrida resulta especialmente conveniente para los trabajadores, ya que les permite continuar su aprendizaje y obtener una cualificación formal mientras siguen trabajando. Esta flexibilidad convierte a los modelos híbridos en una estrategia clave para el apoyo del aprendizaje a lo largo de la vida (*lifelong learning*), la actualización y la adaptación continua de la población activa a las demandas en constante evolución de los entornos industriales inteligentes y conectados.

4.1.6. AUMENTO DE LA DEMANDA

Las instituciones de formación se están enfrentando al incremento de la demanda de aprendizaje especializado y de la inscripción en los cursos, lo que les plantea la oportunidad de modernizar y diversificar sus programas. En España, el lanzamiento de un título de máster en gestión de la

cadena de suministro en 2024, aunque el nivel EQF 7 no es el foco de este informe, sirve como ejemplo claro de esta tendencia.

Por tanto, los centros de FP deben reforzar las capacidades transversales y fomentar la adaptabilidad entre sus estudiantes. Aunque los centros de FP del País Vasco ya están aplicando metodologías de aprendizaje colaborativas y basadas en proyectos destinadas a desarrollar competencias tanto técnicas como transversales, la importancia de las capacidades transversales resulta especialmente crítica en el panorama industrial actual en constante evolución. Capacidades tales como resolución de problemas, comunicación, trabajo en equipo, autonomía del aprendizaje y creatividad son cada vez más valoradas por las empresas, especialmente en el contexto de la transformación digital y el cambio continuo. Estas competencias no solo dan soporte a la versatilidad profesional, sino que también posibilitan que los graduados se adapten rápidamente a nuevas tecnologías, flujos de trabajo y modelos organizativos.

4.1.7. RETOS FINANCIEROS Y SOLUCIONES DE FINANCIACIÓN

Un reto clave para los centros de formación es la inversión en nuevas tecnologías, inversión que se ve limitada en muchos casos por restricciones financieras. Para gestionar este asunto, muchos recurren a fuentes de financiación alternativas. Según la encuesta PdM, los centros se benefician principalmente de financiación pública, asociaciones con la industria y, en menor medida, colaboraciones con otros centros de FP. En la encuesta SCM, la financiación pública e industrial sigue siendo la fuente principal, mientras que la financiación interna es limitada. Hay que destacar que ningún centro de la encuesta SCM señaló colaboraciones con otros centros de FP. Algunos también mencionaron patrocinios y proyectos de la UE (por ejemplo, LCAMP) como mecanismos de soporte muy valiosos.

4.1.8. NUEVAS TECNOLOGÍAS EN ESTRATEGIAS PEDAGÓGICAS

Las tecnologías emergentes mencionadas en este informe no solo han influido en el contenido de los programas de formación, sino que también están comenzando a influir en los recursos y estrategias pedagógicas. A continuación, se incluye un breve resumen de algunas posibles aplicaciones de estas tecnologías en el campo de la pedagogía:

- **Inteligencia Artificial - Aprendizaje personalizado:** La IA puede adaptar la formación al ritmo y las necesidades de cada estudiante, y ofrecer recursos específicos basados en su rendimiento.
- **Realidad Virtual y Aumentada - Inmersión segura:** La VR y la AR pueden facilitar entornos simulados para la realización de prácticas activas, lo que resulta ideal para la formación en campos técnicos sin asumir los riesgos del mundo real.
- **Plataformas en línea y MOOC - Flexibilidad y acceso:** Estas herramientas pueden facilitar el aprendizaje a distancia al ritmo de cada estudiante, ampliando el acceso a la educación independientemente del lugar y el tiempo.
- ***Big Data* y análisis del rendimiento - Mejora continua:** Es posible utilizar el *Big Data* para analizar los datos de los estudiantes, facilitar el perfeccionamiento de los métodos de enseñanza y mejorar de forma continua los resultados de la formación.
- **En el caso específico del sector PdM:**
  - **MAAS en la formación - Acceso a tecnologías PdM a través de plataformas colaborativas en la nube**: Las soluciones basadas en la nube pueden facilitar a los estudiantes el trabajo con datos reales y herramientas de mantenimiento predictivo, desarrollando de este modo capacidades prácticas en el uso de estas tecnologías.
  - **MAAS en la formación - Uso de simulaciones y estudios de casos del mundo real:** Las simulaciones y los gemelos digitales pueden permitir a los estudiantes practicar de forma segura técnicas de mantenimiento predictivo, lo que mejorará sus capacidades antes de comenzar a trabajar con maquinaria real.

4.1.9. INICIATIVAS EUROPEAS

La investigación documental reveló diversas iniciativas financiadas por la UE concentradas en tendencias tecnológicas y desarrollo de capacidades en fabricación avanzada. Los proyectos han generado un volumen importante de material de formación que abarca diferentes áreas de experiencia. La siguiente tabla muestra una selección de recursos que proporcionan contenido educativo y buenas prácticas a nivel europeo que los centros de FP y otros *stakeholders* clave pueden utilizar como inspiración y soporte.

Tabla 2. Ejemplos de proyectos europeos sobre tendencias tecnológicas y desarrollo de capacidades en fabricación avanzada

PROYECTO	DESCRIPCIÓN
OPTIMAI	Mejora la eficiencia y la calidad industrial usando detección de defectos basada en IA, gemelos digitales y AR. Proporciona formación Industria 4.0/5.0.
I4MS	Iniciativa europea que facilita a pymes dedicadas a la manufactura la adopción de tecnologías digitales.
DATA.ZERO	Proyecto de la UE que fomenta la fabricación sin defectos con soluciones basadas en datos y formación en IA, IoT y aprendizaje automático.
PreMETS	Proyecto Erasmus+ que mejora la enseñanza del mantenimiento predictivo con herramientas, microcredenciales y cursos Moodle gratuitos.
DRIVES	Proyecto Erasmus+ que da soporte a las capacidades de la automoción a través de un MOOC sobre mantenimiento, ciberseguridad, IA y robótica.
4CHANGE	Aborda las lagunas en las capacidades de los trabajadores del metal por medio de formación digital y empresarial y aprendizaje basado en el trabajo.

4.2. IMPACTO SOBRE LA FORMACIÓN Y LAS CAPACIDADES ENTRENADAS

4.2.1. CAPACIDADES ENTRENADAS EN EL ÁMBITO DEL PDM

Cada vez es más frecuente, en diferente medida, que se incorporen nuevas tecnologías en los programas de formación. La siguiente tabla resalta ejemplos de programas vinculados al PdM que han integrados campos y tecnologías emergentes.

Tabla 3. Nuevas tecnologías y campos de la formación relacionados con el PdM

TECNOLOGÍA	FORMACIÓN / CURSOS
Sostenibilidad	• Bachillerato de Ciencias y Tecnologías de la Industria y Desarrollo Sostenible (EQF 4) (Francia) • Técnico superior en Ciencias y Tecnología de la Industria y el Desarrollo Sostenible (EQF 5) (Francia)
Ciberseguridad	• Grado básico y Técnico superior en Ciberseguridad, Ciencias Informáticas y Redes Electrónicas (EQF 4) (EQF 5) (Francia)
IoT	• Grado universitario en Tecnología en Ingeniería Mecánica y Producción, con especialización en Innovación para la Industria (EQF 6) (Francia)

IoT and IA	• Grado superior en Mantenimiento Industrial
IoT, IA, Ciberseguridad	• Grado universitario en Mantenimiento de Equipo Biomédico (EQF 6) (Francia) • Grado universitario en Mantenimiento de la Industria 4.0(EQF 6) (Francia)
IoT, IA, Ciberseguridad, Sostenibilidad, Nube	• Bachillerato profesional en Técnicas de Fabricación de productos Mecánicos, con especialización en Ejecución y Monitorización de la Producción (EQF 4) (Francia) • Técnico superior en Concepción del Proceso de Desarrollo de Productos (EQF 5) (Francia) • Técnico superior en Diseño y Producción de Sistemas Automatizados (EQF 5) (Francia) • Grado universitario en Diseño y Producción de Sistemas Electrónicos (EQF 6) (Francia) • Grado universitario en Diseño y Mejora de Procedimientos y Procesos Industriales (EQF 6) (Francia) • Técnico superior en Diseño de Productos Industriales (EQF 5) (Francia)
Ejemplos de cursos en los siguientes campos: **IoT, IA, Ciberseguridad, Sostenibilidad, Nube**	• **En el caso de Francia:** módulo de robótica. • **En el caso de Eslovenia:** enseñanza digital; sostenibilidad; interfaz de usuario; uso eficiente de herramientas; *hacking* ético - formación práctica; ciberseguridad; inteligencia artificial en tecnología de la información - formación práctica; inteligencia artificial; sistemas de servidores; redes informáticas avanzadas; instalaciones eléctricas inteligentes IoT; sostenibilidad; uso eficiente y fuentes de energías renovables; ciberseguridad, seguridad y protección; ciberseguridad, protección de sistemas de la información; ciberseguridad, protección de sistemas de la información. • **Italia:** sistemas y redes; tecnologías y diseño de sistemas de información y telecomunicación; informática; telecomunicaciones; gestión de proyectos, organización empresarial.

4.2.2. CAPACIDADES ENTRENADAS EN EL CAMPO DE LA SCM

En el ámbito de la Gestión de la Cadena de Suministro (SCM), la integración de nuevas tecnologías también es cada vez más evidente. La siguiente tabla resume los programas de formación y las capacidades relacionadas con esta área.

Tabla 4. Nuevas tecnologías y campos de la formación relacionados con la SCM

TECNOLOGÍAS	FORMACIÓN	CAPACIDADES
Sostenibilidad	• Bachillerato en gestión tecnológica en logística y transporte: movilidad y cadena de suministro sostenible • Sostenibilidad en la Gestión de la Cadena de Suministro	• Gestionar la logística y la cadena de transporte centrándose en la sostenibilidad • Optimizar el uso de los recursos • Poner en práctica estrategias de desarrollo sostenible • Integrar prácticas responsables en logística y movilidad • Realizar auditorías de logística sostenible • Desarrollar soluciones innovadoras con criterios medioambientales • Aplicar estrategias de responsabilidad social corporativa (RSC) en el campo de la logística • Lograr cadenas de producción y suministro social, ecológica y económicamente sostenibles • Interpretar y aplicar regulaciones tales como la Ley de debida diligencia de la cadena de suministro y las próximas directivas de la UE usando herramientas para y optimizar el nivel de sostenibilidad • Integrar la sostenibilidad en la planificación estratégica y la gestión operativa, abordando el equilibrio entre economía, ecología y los aspectos sociales • Entender el marco legal y las estrategias para lograr la sostenibilidad a largo plazo en la cadena de suministro
Ciberseguridad	• Calidad, logística industrial y organización, con especialización en organización y cadena de suministro	• Garantizar la seguridad TI y la protección de los sistemas • Usar herramientas digitales y la aplicación de reglas de ciberseguridad para recopilar, tratar, elaborar y divulgar información • Implementar políticas de seguridad para la protección de los datos guardados en una infraestructura en la nube

	• Gestión de transporte y logística, con especialización en cadenas de suministro sostenibles y movilidad • Diplomatura profesional en logística y gestión de flujos • Técnico de seguridad e infraestructuras TI	• Aplicar medidas preventivas contra intrusiones, fraude, violaciones de la seguridad de los datos o filtraciones de datos por medio de la configuración del sistema de información • Garantizar el funcionamiento adecuado de las telecomunicaciones y redes informáticas de la empresa • Proteger datos relacionados con la logística • Asegurar la infraestructura en la nube • Aplicar estrategias de ciberseguridad • Mitigar los riesgos cibernéticos
IA	• Grado universitario en Tecnología en Ingeniería Mecánica y Producción, con especialización en Innovación para la Industria (EQF 6) (Francia) • Grado universitario en Ciencias e Ingeniería - Sistemas de la información (EQF 6) • Grado universitario en Ciencias y Tecnología - Informática y sistemas digitales (EQF 6) • Coordinador de proyectos TI (datos, aplicaciones o infraestructuras en la nube) (EQF 6) • Logística e inteligencia artificial (IA)	• Optimizar el mantenimiento predictivo, la robótica, la mecatrónica y la gestión del mantenimiento asistida por ordenador • Tratar y analizar datos para extraer información estratégica y comunicarla a sus colegas con el fin de facilitar la toma de decisiones • Tratamiento y síntesis de datos • Desarrollar y gestionar bases de datos • Integrar la IA en el desarrollo de aplicaciones • Diseñar y optimizar soluciones de inteligencia artificial para la industria • Organizar y gestionar proyectos de IA • Desarrollar herramientas de inteligencia artificial • Llevar a cabo análisis predictivo de datos usando la inteligencia artificial • Automatizar procesos logísticos con robótica y RPA • Gestionar datos usando *big data* • Aplicar analítica predictiva para anticipar la demanda • Optimizar rutas de entrega usando algoritmos avanzados y poner en vigor estrategias de ciberseguridad en sistemas automatizados • Aplicar principios éticos a la hora de usar la IA • Maximizar la eficacia operativa y garantizar el retorno de la inversión, teniendo en cuenta la Logística 4.0 y el futuro de la automatización en el sector
Computación en la nube	• Coordinador de proyectos TI (datos, aplicaciones o infraestructuras en la nube)	• Orquestar la infraestructura en la nube • Gestionar la seguridad de la información • Desplegar y mantener servicios de computación en la nube • Poner en vigor políticas de seguridad para proteger datos guardados en una infraestructura en la nube
Blockchain	• Gestor de proyectos de soluciones *blockchain* (EQF 6)	• Diseñar, codificar y mejorar sistemas específicos de *blockchain* usando lenguajes de programación apropiados, por ejemplo, Solidity, C++ o JavaScript • Desarrollar marcos y aplicaciones web • Analizar las necesidades de los clientes y poner en práctica arquitecturas de *blockchain* seguras • Aplicar el conocimiento avanzado al *blockchain* y la criptografía • Crear soluciones innovadoras en diferentes sectores, por ejemplo, finanzas, logística y sanidad • Gestionar proyectos de *blockchain*, garantizando una coordinación eficaz con el fin de cumplir los objetivos y satisfacer las necesidades de los clientes • Proporcionar soluciones técnicamente fiables y escalables
IoT	• Diseñador e integrador de soluciones IoT	• Implementar arquitecturas de dispositivos conectados, posibilitando que envíen, reciban y procesen señales, información o instrucciones. • Abordar los retos específicos de los negocios, basándose en las necesidades operativas, de gestión o del negocio

		• Facilitar la automatización de actividades, optimizar los procesos del negocio y fortalecer la toma de decisiones en la empresa

La siguiente tabla incluye un resumen más detallado de los programas de formación para la gestión de la cadena de suministro (SCM) o campos relacionados, junto con las principales capacidades enseñadas.

Tabla 5. Formación relacionada con la SCM y capacidades principales enseñadas

PAÍS	FORMACIÓN	CAPACIDADES
Francia	Título de grado universitario en Logística y Transporte (EQF 6)	Gestión de flujos, logística, transporte, responsabilidad ambiental, sostenibilidad, transición digital
	Certificado de cualificación profesional: Technicien Logistique Industrielle (EQF 6)	Gestión del flujo informativo, coherencia industrial, supervisión de suministro y distribución, sistemas informatizados
	Grado universitario en Tecnología: Management de la logistique et des transports, spécialité Mobilité et supply chain durables (EQF 6)	Estrategias innovadoras de logística y transporte, seguridad TI, sostenibilidad
	Grado universitario en Tecnología: Gestión de Logística y Transporte, especialización en Cadena de Suministro y Movilidad Sostenible (EQF 6)	Tecnologías innovadoras, soluciones digitales en logística y transporte
	Grado universitario en Ciencias e Ingeniería, especialización en Inteligencia y Mantenimiento de Sistemas Conectados (EQF 6)	Transición digital y energética, IA, mecatrónica, mantenimiento predictivo, CMMS (sistemas de gestión de mantenimiento asistidos por ordenador)
	Título de diplomatura profesional en Logística y Gestión de Flujos (EQF 6)	Automatización del almacén, logística sostenible, ciberseguridad, RSC (Responsabilidad Social Corporativa), gestión de flujos
	Grado universitario en Tecnología: Calidad, Logística Industrial y Organización, con especialización en Organización y Cadena de Suministro (EQF 6)	Herramientas digitales, seguridad TI, gestión del flujo de información, cadena de suministro, optimización de procesos
	Grado universitario en Ciencias e Ingeniería - Sistemas de la información (EQF 6)	Responsabilidad ambiental, economía circular, gestión y análisis de datos, IA, digitalización
	Grado universitario en Ciencias e Ingeniería - Informática y sistemas digitales (EQF 6)	IA, aprendizaje automático, visión artificial, NLP, bases de datos, transformación digital
	Desarrollador de ciencia de datos y IA (EQF 6)	Desarrollo IA, ciencia de datos, optimización de procesos, mantenimiento predictivo, *marketing* digital
	Coordinador de proyectos TI (datos, aplicaciones o infraestructuras en la nube) (EQF 6)	Seguridad de la información, computación en la nube, automatización, IA, ciberseguridad, protección de datos
	Desarrollador y diseñador de ciencia de datos (EQF 6)	Análisis predictivo, IA, *big data*, aprendizaje automático, tratamiento de datos

	Gestor de proyectos de soluciones *blockchain* (EQF 6)	*Blockchain*, criptografía, desarrollo de aplicaciones de *blockchain*, contratos inteligentes
	Integrador diseñador de soluciones IoT (internet de las cosas) (EQF 6)	IoT, automatización, redes de dispositivos conectados, tratamiento de datos, optimización de procesos
	Técnico de Seguridad e Infraestructuras TI (EQF 5)	Redes, ciberseguridad, nube, supervisión de infraestructuras, gestión de incidencias TI
	Grado de estudios universitarios científicos y técnicos: desarrollador web y profesiones relacionadas con internet (EQF 5)	Desarrollo de webs, objetos conectados, realidad virtual, realidad aumentada, creación de contenido digital
	Grado universitario en Diseño y Mejora de Procesos Industriales (EQF 6) (Francia)	Transición digital, línea de producción, mantenimiento, robótica, herramientas digitales, ciberseguridad, ética, responsabilidad medioambiental.
	Bachillerato profesional de Logística (EQF 4)	Recepción, almacenaje, preparación de pedidos, uso de carretillas elevadoras, transporte por carretera, seguridad, calidad, regulación medioambiental, empresas de logística, plataformas de distribución, servicios logísticos corporativos.
	Grado universitario de Gestor de la Cadena de Suministro (EQF 6)	gestión logística, negociación, cadena de suministro, transporte, almacenaje, suministro, planificación, controlador, gestor de envíos
Eslovenia	Técnico de Mecatrónica (EQF 4)	Ingeniería mecánica, ingeniería eléctrica, informática, automatización y robótica
	Técnico de Logística (EQF 4)	Logística, almacenamiento a gran escala y gestión de la cadena de suministro
	Ingeniero logístico (EQF 5)	Logística, gestión de la cadena de suministro y optimización de procesos
	Ingeniero mecatrónico (EQF 5)	Automatización, robótica e integración de tecnologías avanzadas en los procesos de producción.
Turquía	Grado universitario en Logística (EQF 6)	Gestión de la cadena de suministro, control de inventario, distribución, sistemas de información logística
	Ciclo formativo de grado superior en Logística (EQF 5)	Almacenaje, transporte, procedimientos personalizados, gestión de inventario
	Formación Profesional en Logística	Envío, almacenamiento a gran escala, almacenaje, software de logística, prácticas (*intership*s), supervisor de almacén, personal de envío
Alemania	Gestión de la Cadena de Suministro	Gestión de la cadena de suministro, optimización de costes, satisfacción del cliente, modelado SCOR
	Sostenibilidad en la Gestión de la Cadena de Suministro	Regulaciones, sostenibilidad social y ecológica, estrategias de optimización sostenibles
	Gestión Estratégica de la Cadena de Suministro (EQF 6)	Planificación y gestión de redes logísticas, reducción de costes, simulación y planificación estratégica
	Gestor de la Cadena de Suministro (CSCM) (EQF 6)	Optimización de la cadena de valor, reducción de costes, gestión de proyectos logísticos

	Máster de Gestión de la Cadena de Suministro (CSCM) (EQF 6)	Optimización de cadenas de valor, reducción de costes, procesos orientados al cliente, fundamentos de la gestión de la cadena de suministro, gestión de proyectos, herramientas prácticas.
	Título de usuario SAP en Planificación de la Producción (EQF 4 a 6)	navegación por sistemas SAP, gestión de datos maestros, órdenes de producción, movimientos de materiales, gestión del inventario, integración con módulos SAP (gestión de materiales, ventas), herramientas de notificación, gestión de capacidades y recursos
	Preparación eficaz del trabajo – planificación y control del proceso de producción (EQF 4 a 6)	Optimización de la programación de pedidos, control de la producción, gestión de materiales, sistemas ERP/MES, planificación de la capacidad, dimensionamientos de lotes, herramientas de planificación TI, mejora del servicio de entrega.
Italia	Cadena de Suministro, Logística y Operaciones (EQF 6)	Capacidades relacionadas con la cadena de suministro, optimización del flujo logístico, gestión del inventario, ERP, *blockchain*, RFID, IoT, automatización, robótica, IA, aprendizaje automático, análisis de datos, toma de decisiones estratégicas, gestión del riesgo
	Gestión de la Cadena de Suministro (EQF 5)	Gestión de compras, prácticas colaborativas, procesos de *order-to-delivery* y *demand-to-supply*, integración de socios del negocio, eficacia, efectividad y capacidad de respuesta
	Gestión de la Cadena de Suministro	Compra de material, gestión de la producción, gestión de la cadena de suministro integral, modelos de gobierno corporativo

4.2.3. PROGRAMAS DE ESPECIALIZACIÓN EN EL PAÍS VASCO

El País Vasco ha desarrollado una gama global de programas de especialización de un año de duración (EQF5), que se llevan a cabo en formato dual combinando el aprendizaje en el aula con formación práctica en empresas. Estos cursos están diseñados para estudiantes que dispongan de un título de FP superior (dos años de duración) y pretendan conseguir competencias avanzadas alineadas con las necesidades de la transformación digital y la fabricación avanzada. Estos programas reflejan una estrategia con miras al futuro en el sistema de la FP del País Vasco destinada a alinear la formación con las necesidades reales y futuras de la industria. Puede obtener más información en el sitio web oficial del Instituto Vasco del Conocimiento de la Formación Profesional (https://ivac-eei.eus/es/)

La oferta actual de cursos de especialización, incluidos los relacionados con el sector digital y de la inteligencia es la siguiente:

Tabla 6. Programas de especialización en el País Vasco

PROYECTO	CAPACIDAD GENERAL
Fabricación inteligente	Desarrollar y gestionar proyectos que adapten los procesos de producción identificando objetivos de producción, aplicando indicadores clave del rendimiento (KPI) y usando tecnologías avanzadas para el control de la producción, al tiempo que se garantiza el cumplimiento de los requisitos de calidad y seguridad.
Digitalización del mantenimiento industrial	Poner en práctica y gestionar proyectos de digitalización para el mantenimiento en entornos industriales, aplicando tecnologías vanguardistas y satisfaciendo los requisitos medioambientales y de calidad y seguridad.
Robótica colaborativa	Desarrollar proyectos de robótica colaborativa, tanto de brazos robóticos como de robots móviles autónomos, así como realizar el montaje, puesta en marcha y mantenimiento de dichos sistemas.

Ciberseguridad en entornos de las tecnologías de la información (TI)	Definir y poner en práctica estrategias de seguridad en sistemas de la información llevando a cabo diagnósticos de la ciberseguridad, identificando vulnerabilidades y aplicando medidas de mitigación en línea con las actuales regulaciones y estándares del sector, al tiempo que se garantiza el cumplimiento de los protocolos de protección medioambiental, seguridad en el trabajo y calidad.
Ciberseguridad en entornos de las tecnologías de operación (OT)	Definir y poner en práctica estrategias de ciberseguridad en organizaciones industriales a través del diagnóstico, la identificación de vulnerabilidades y la aplicación de medidas de mitigación de acuerdo con las actuales regulaciones y estándares de la industria, garantizando el cumplimiento de los protocolos medioambientales, de seguridad en el trabajo y calidad.
Control de calidad metrológico	Realizar el control de la calidad de los productos, los sistemas de producción y los sistemas de medición, asegurando la validez de las mediciones realizadas en ensayos y verificaciones de acuerdo con las normas de calidad aplicables y emitiendo la documentación apropiada al tiempo que se cumplen las regulaciones medioambientales y de seguridad.
Inteligencia Artificial y *big data*	Diseñar y aplicar sistemas de inteligencia artificial que optimicen la gestión de la información y el uso de *big data*, garantizando la seguridad del acceso a los datos y el cumplimiento de las normas de accesibilidad, usabilidad y calidad establecidas, así como de los principios éticos y legales.

4.2.4. PRIORIDADES Y CARENCIA DE CAPACIDADES

De acuerdo con el informe PdM, los centros de formación identificaron la inteligencia artificial (IA) y la sostenibilidad como las áreas prioritarias entre las tecnologías emergentes En el campo de la Gestión de la Cadena de Suministro (SCM), el foco cambia hacia el IoT, la sostenibilidad y la ciberseguridad. Casi el 70 % de los centros destacaron lagunas clave en las capacidades relativas a sistemas IoT, herramientas IA y análisis de datos. La computación en la nube fue citada por un 40 %, mientras que solo el 14 % mencionó el trabajo colaborativo, sugiriendo que ya se disponía de un nivel adecuado de esta capacidad blanda. Los resultados específicos a cada país muestran que:

- Francia carece de capacidades en IA y análisis de datos,
- Italia en sistemas IoT,
- Turquía en computación en la nube y análisis de datos y
- Eslovenia en IoT y herramientas IA.

Un centro de formación francés representativo destacó la importancia de centrarse en el desarrollo de capacidades más que en los conocimientos teóricos. También recalcaron el valor de la integración de la formación inicial y profesional así como el potencial de la IA y la XR, no solo como herramientas de formación, sino como apoyo para todo el proceso de aprendizaje global.

4.3. PAPEL ESTRATÉGICO DE LA FP

Los centros de formación profesional (FP) se están convirtiendo actualmente en actores dinámicos y estratégicos, capaces de actuar como catalizadores en las transiciones digital y verde. En vista de la rápida evolución de las tecnologías y el cambio en las demandas del mercado laboral, estos centros desempeñan un papel fundamental a la hora de adaptar las capacidades y dar soporte a los sectores industriales en transformación.

Tal como se ha destacado en este capítulo y a pesar de los retos existentes, las nuevas tecnologías ya están siendo integradas progresivamente en programas de formación y en las capacidades que se están enseñando.

Conscientes de estos retos, los centros de formación han fortalecido sus asociaciones estratégicas con la industria y, en menor medida, con otros centros de FP. Estas colaboraciones no solo fomentan el intercambio de conocimientos, sino que también facilitan el acceso a fuentes de financiación adicionales que son cruciales para abordar una de las principales barreras para la transición: su coste financiero.

En este contexto, los centros de formación también han girado hacia el patrocinio y la participación en proyectos financiados por la UE, especialmente en los incluidos en el programa Erasmus+.

Además, los centros han aprovechado esta oportunidad para expandir su oferta formativa, incrementando su especificidad y especialización, al tiempo que integran activamente nuevas tecnologías como parte de sus estrategias de enseñanza. Esto les ha posibilitado la puesta en práctica de enfoques educativos más modernos, interactivos y relevantes para la industria, enfoques mejor alineados con las realidades del entorno profesional actual.

Los centros de FP funcionan como impulsores esenciales de la transformación industrial, ya que posibilitan la innovación y el desarrollo del talento al tiempo que mejoran la competitividad regional. En la actualidad, los centros de FP van más allá de la simple función de formación básica y participan activamente en la cocreación de soluciones con los negocios, desarrollan programas especializados y llevan a cabo proyectos de innovación e investigación aplicada en entornos relacionados con la fabricación avanzada y la digitalización.

4.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.4.1. CONCLUSIONES

El papel estratégico de los centros de formación profesional (FP) como actores dinámicos de la transición digital y verde está claramente ratificado. Estas instituciones están avanzando rápidamente en la integración de tecnologías emergentes y campos tales como el de la inteligencia artificial (IA), la sostenibilidad, el internet de las cosas, la ciberseguridad, el *blockchain*, la computación en la nube, la realidad virtual y aumentada, el aprendizaje automático y la robótica.

De acuerdo con las encuestas realizadas en los centros de formación, se han identificado la IA y la sostenibilidad como prioridades en el campo del mantenimiento predictivo (PdM). En el área de la gestión de la cadena de suministro (SCM), el foco cambia hacia al IoT, la sostenibilidad y la ciberseguridad.

El contexto de la transición verde y digital ha planteado diversas oportunidades a los centros de FP, incluidas:

- El incremento de la demanda de formación, lo que ha permitido la expansión de la oferta educativa.
- La posibilidad de conseguir una mayor diversificación y especialización en programas de formación, que incorporan ahora no solo capacidades técnicas, sino también competencias interdisciplinares. Un claro ejemplo es la iniciativa llevada a cabo en el País Vasco, donde se han desarrollado programas de especialización de un año de duración centrados en capacidades avanzadas en fabricación inteligente, digitalización, robótica colaborativa, ciberseguridad y control de calidad.

- Colaboración más estrecha con el sector industrial.
- El uso creciente de nuevas tecnologías como herramientas pedagógicas.
- Mejora de la accesibilidad y la flexibilidad de la formación gracias a modelos de aprendizaje híbrido que combinan la formación en línea y presencial. Estos formatos resultan especialmente beneficiosos para los trabajadores.
- El impulso de las iniciativas europeas que fomentan la modernización de la FP.
- Acceso a financiación a través de programas de la UE.
- Diversificación de fuentes de financiación gracias a colaboraciones con otros centros de formación y con la industria.
- En el País Vasco, aunque persisten algunas barreras (por ejemplo, la falta de cultura digital en las empresas), los centros de FP desempeñan un papel fundamental como agentes de la transformación formando a profesionales capacitados para enfrentarse a los retos de la digitalización industrial

No obstante, la integración de nuevas tecnologías también ha planteado retos significativos, entre ellos:

- Una autonomía institucional limitada que obstaculiza la capacidad para dar una respuesta eficaz al cambio constante.
- Los costes cada vez más elevados asociados con la adopción de nuevas tecnologías.
- La carencia de formación especializada para los educadores, lo que limita la implementación eficaz.
- Se han identificado las lagunas actuales en las capacidades en el ámbito de la Gestión de la Cadena de Suministro (SCM). Los resultados específicos a cada país destacan las siguientes deficiencias: Francia se enfrenta a una carencia de capacidades en IA y análisis de datos; Italia en la integración de sistemas IoT; Turquía en computación en la nube y análisis de datos, y Eslovenia en herramientas tanto IoT como IA.
- Los centros de FP del País Vasco siguen sin considerar totalmente a los graduados de FP como una opción real para impulsar su transformación digital. Aunque muchos centros ofrecen programas avanzados en automatización y digitalización (EQF5), estos títulos no disfrutan de un amplio reconocimiento ni son muy demandados en la industria. Como resultado de ello, es frecuente que los estudiantes no dispongan de suficientes oportunidades en puestos de alta tecnología y el potencial de la FP para contribuir la innovación industrial sigue estando infrautilizado.

4.4.2. RECOMENDACIONES

- Fomentar modelos de aprendizaje híbrido: Expandir rutas de aprendizaje flexibles que combinen formatos en línea y presenciales para servir a perfiles de estudiantes diversos, especialmente profesionales, y fomentar el aprendizaje a lo largo de la vida.
- Diversificar la oferta formativa e incrementar el número de programas especializados.
- Abordar las lagunas críticas en las capacidades.
- Fortalecer la formación para los formadores.
- Reforzar la colaboración con las empresas y otros centros de formación.
- Diversificar las fuentes de financiación: Animar a los centros de FP para que movilicen financiación pública, patrocinios de la industria, proyectos europeos y mecanismos de financiación colaborativa con el fin de superar las limitaciones financieras.
- Aprovechar las iniciativas europeas: Maximizar el uso de herramientas y recursos proporcionados por la Unión Europea para dar soporte a las transiciones verde y digital, así como a la enseñanza en general.
- Desarrollar iniciativas de formación específicas a cada país para solventar las lagunas de capacidades clave en SCM: Análisis de datos y IA en Francia, sistemas IoT en Italia, computación en la nube y análisis de datos en Turquía y herramientas IoT y IA e Eslovenia.

- Priorizar el desarrollo de capacidades respecto a los conocimientos teóricos mediante la integración de formación inicial y profesional y utilizando la IA y la XR no solo como herramientas educativas, sino como soporte durante todo el proceso de aprendizaje.

5. CONCLUSIÓN Y PERSPECTIVAS

Para dar soporte al crecimiento continuo, la resiliencia y la sostenibilidad del sector de la fabricación avanzada en toda la Unión europea y otros países es esencial anticipar las necesidades en constante evolución de la población activa, mejorar los sistemas de enseñanza y formación, y fortalecer la alineación entre la industria y los proveedores de educación y formación profesional (FP). Este informe (una síntesis de tres investigaciones complementarias sobre mantenimiento predictivo (PdM), Gestión de la Cadena de Suministro (SCM) y los *insights* regionales del País Vasco [BC]) ofrece una perspectiva integrada sobre el modo en que las transiciones digital y verde están reconfigurando tanto el panorama industrial como los ecosistemas educativos que lo nutren.

Basándose en las investigaciones de campo, las encuestas en diversos países, los estudios de casos institucionales y la implicación directa con pymes, grandes empresas, educadores e instituciones de FP, este documento refleja un panorama dinámico y con matices de la transformación en acción. Al centrarse en dos dominios de alto impacto de la fabricación avanzada, el PdM y la SCM, el informe examina no solo las tecnologías que impulsan el cambio, sino también los cambios operativos, organizativos y humanos necesarios para una adaptación con éxito.

A través de seis áreas temáticas clave (cambios tecnológicos y operativos, integración verde y digital, barreras específicas de las pymes, capacidades y expectativas de la población activa en evolución y transformación de los sistemas de FP), los resultados convergen en un objetivo compartido: creación de un ecosistema de fabricación preparado para el futuro basado en una enseñanza flexible, una actualización inclusiva y una colaboración intersectorial potente. Por tanto, esta sección sobre conclusiones describe lecciones estratégicas, esboza recomendaciones vanguardistas y ofrece una visión orientada al futuro sobre el modo en que Europa puede liderar el camino de la alineación entre la innovación industrial y el desarrollo centrado en las personas.

5.1. RESUMEN DE OBSERVACIONES CLAVE

La fabricación avanzada está experimentando una rápida transformación, conformada por la digitalización, los imperativos relacionados con la sostenibilidad y las dinámicas evolutivas de la población activa. Los *insights* derivados del Mantenimiento Predictivo (PdM), la Gestión de la Cadena de Suministro (SCM) y el trabajo de campo regional del País Vasco (BC) resaltan tendencias comunes, retos estructurales y oportunidades factibles tanto para pymes como para el ecosistema de la FP. Estas conclusiones se organizan en seis áreas temáticas clave:

5.1.1. CAMBIOS TECNOLÓGICOS Y OPERATIVOS

El surgimiento de la IA, el IoT, los gemelos digitales, el *edge computing* y las soluciones en la nube están revolucionando los procesos operativos en el PdM y la SCM. El PdM mejora la fiabilidad de los activos, reduce las paradas improductivas y optimiza los costes del ciclo de vida. La SCM está llevando a cabo una transición hacia la resiliencia y la agilidad por medio de Redes de Suministro Digitales (DSN). A pesar de los diferentes entornos de aplicación, ambos dominios están

convergiendo en sistemas autónomos, explicables y basados en servicios que exigen flujos de trabajo reestructurados, colaboración interfuncional y toma de decisiones basada en datos. Los nuevos modelos (por ejemplo, los ecosistemas basados en plataformas, las arquitecturas orientadas al servicio y los bancos de pruebas respaldan la experimentación, la eliminación de riesgos y la innovación escalable en los *stakeholders*.

5.1.2. IMPACTO DE LA TRANSICIÓN DIGITAL Y VERDE

Las tecnologías en el PdM y la SCM no solo mejoran el rendimiento, sino que también posibilitan la sostenibilidad. El PdM proporciona soporte a objetivos verdes ampliando la duración de los equipos, reduciendo el consumo de energía, limitando las emisiones relacionadas con el transporte y contribuyendo a la circularidad. La SCM se alinea con las prácticas ecológicas mediante la trazabilidad de las emisiones, la reducción de los residuos materiales, la implantación de estrategias de suministro circular y el diseño colaborativo. Las herramientas digitales sustentan cada vez más la capacidad de las empresas para anticiparse a las obligaciones medioambientales y satisfacerlas, alineando la optimización operativa con los objetivos ecológicos.

5.1.3. BARRERAS Y RETOS ESPECÍFICOS PARA LAS PYMES

Tanto el PdM como la SCM se ven limitados por barreras estructurales compartidas. Las restricciones financieras siguen siendo el elemento fundamental y las pymes deben esforzarse para acceder a financiación destinada a mejoras tecnológicas, especialmente para sistemas modulares o interoperables. Entre los retos técnicos se incluyen la infraestructura heredada, la falta de interoperabilidad y los riesgos relacionados con la ciberseguridad. Organizativamente, las pymes se enfrentan con frecuencia a una escasa madurez digital, el limitado soporte TI interno, la resistencia al cambio y la falta de una visión estratégica clara. La puesta en práctica del PdM también sufre de un acceso insuficiente a asesores y un ROI poco claro. La transformación SCM se ve ralentizada por sistemas de planificación fragmentados, herramientas infrautilizadas y brechas en la gobernanza de datos.

5.1.4. NECESIDADES DE LA POBLACIÓN ACTIVA Y CAPACIDADES EN EVOLUCIÓN

El cambio a las operaciones digitales y ecológicas está reconfigurando el panorama de las capacidades industriales. Los roles se están hibridizando, lo que requiere una combinación de saber hacer tradicional, pensamiento sistémico y fluidez en plataformas digitales. Las capacidades de IA, diagnóstico, ciberseguridad, interfaces en la nube e interpretación de datos cada vez son más esenciales. Se espera que los trabajadores participen en un aprendizaje continuo, se adapten con rapidez y colaboren entre los diferentes dominios. También está creciendo la demanda de capacidades transversales y blandas (como la comunicación, la resolución de problemas y la adaptabilidad), especialmente a medida que evolucionan los flujos de trabajo y se expande la automatización.

Aun así, las lagunas en las capacidades digitales, la resistencia de los empleados y la desalineación entre los programas de formación y los sistemas industriales persisten como obstáculos significativos. El abordaje de estos retos exige la implementación de estrategias de gestión del cambio basadas en las personas que se ocupen de la adaptación junto con la formación técnica. Un enfoque de esta naturaleza no solo mejora la preparación de la población activa, sino que también garantiza una integración sostenible de las nuevas tecnologías en los procesos organizativos.

5.1.5. PERSPECTIVAS ESTRATÉGICAS Y MODELOS DE INNOVACIÓN

Mirando al futuro, el avance de la transformación tanto digital como ecológica en el ecosistema de la fabricación en Europa necesitará estrategias integradas y con visión de futuro que alineen el desarrollo tecnológico con la evolución de la población activa y la adaptabilidad organizativa. Este informe se basa en análisis transeuropeos (informes PdM y SCM) y en la investigación regional llevada a cabo en el informe del País Vasco (BC) para identificar modelos de innovación estratégica, surgimiento de mejores prácticas e *insights* útiles. El informe BC, en particular, destaca el papel de los centros de FP regionales como facilitadores clave de la innovación industrial, proporcionando ejemplos del mundo real de intentos de actualización colaborativa y marcos de experimentación de bajo riesgo.

En el **Mantenimiento Predictivo (PdM)**, la competitividad a largo plazo se basará en la ampliación del acceso a financiación, la inversión en la formación de la población activa y la alfabetización digital así como en la optimización de estrategias basadas en datos. En la **Gestión de la Cadena de Suministro (SCM)**, el éxito futuro depende del fomento de la transparencia, la creación de confianza entre los socios, la alineación de los objetivos digitales y verdes, y el fortalecimiento de la gobernanza de datos.

Para respaldar estos resultados, ya están surgiendo diferentes modelos de innovación y habilitadores:

- **Estrategias de transformación colaborativas y modulares**: Las pymes están adoptando enfoques escalonados que equilibran la innovación con la asequibilidad. Es frecuente que estos enfoques se elaboren alrededor de infraestructuras compartidas, proyectos de desarrollo dirigidos por consorcios y plataformas compartidas por los *stakeholders* que facilitan una asunción repartida de los riesgos y el beneficio mutuo.
- **Las arquitecturas orientadas al servicio** (por ejemplo, **PdMaaS [Mantenimiento Predictivo como Servicio])** proporcionan una ruta viable para que las pymes accedan a capacidades predictivas sin invertir en costosas infraestructuras. Estas soluciones, suministradas con frecuencia a través de OEM o plataformas en la nube, derivan la responsabilidad de los técnicos internos a los analistas de datos y los proveedores de servicios externos, incrementando la flexibilidad al tiempo que mantienen la fiabilidad operativa.
- **Los bancos de pruebas y las asociaciones público-privadas** continúan ganando impulso como mecanismos para la experimentación de bajo riesgo, la habilitación de I+D aplicado y la estimulación de la colaboración entre la FP y la industria. El informe BC refuerza esto con pruebas de centros de FP locales coliderando proyectos piloto de innovación con pymes y clústeres industriales.
- Las **estrategias de adopción gradual** respaldadas por **financiación pública y proyectos colaborativos de la UE** (por ejemplo, LCAMP) permiten a las pymes explorar tecnologías emergentes en entornos controlados de menor riesgo, un enfoque especialmente valioso para empresas con capacidades internas limitadas.
- **Centros de FP como catalizadores**: El informe BC y la investigación más amplia de la UE convergen en el rol estratégico de las instituciones de FP. Estos centros actúan como puente entre las necesidades industriales y la provisión de formación, al tiempo que facilitan la innovación aplicada. Su capacidad para adaptar los planes de estudio, fomentar el aprendizaje híbrido y formar al personal que ocupa actualmente puestos pedagógicos los convierte en actores clave de la transformación sectorial.
- Los **roles intermediarios con fluidez digital** son cada vez más esenciales en el contexto tanto del PdM como de la SCM. Estos nuevos perfiles de la población activa, conformados frecuentemente por la formación FP, conectan la experiencia tradicional del taller con herramientas digitales avanzadas. También sirven de conexión eficaz con proveedores de IA externos, especialistas del mantenimiento preventivo o integradores de software.

Por último, **los modelos de innovación SCM recalcan el papel crítico de la colaboración basada en la confianza**. Aunque las herramientas digitales facilitan la transparencia, la comunicación en tiempo real y la trazabilidad, la dimensión humana de la **confianza sigue siendo fundamental** para las colaboraciones a largo plazo de la cadena de suministro. La creación de confianza, mediante la alineación cultural, la continuidad relacional y los objetivos compartidos, se reconoce cada vez más como un elemento básico de la innovación y la resiliencia industrial.

5.1.6. LOS SISTEMAS DE FP Y LA TRANSFORMACIÓN EDUCATIVA

Cada vez se reconoce más que los centros de formación profesional (FP) son facilitadores estratégicos de las transiciones digital y verde en la fabricación avanzada. En toda Europa (y, especialmente, en el País Vasco) estos centros están evolucionando y pasando de ser instituciones puramente educativas a centros dinámicos de innovación aplicada, desarrollo de la población activa y colaboración con la industria.

Las conclusiones muestran que los **proveedores de formación están estrechando sus lazos de colaboración con la industria**, codesarrollando planes de estudio que integran tecnologías fundamentales tales como IA, IoT, computación en la nube y ciberseguridad. También están experimentando con **modelos pedagógicos híbridos**, combinando el aprendizaje en línea y presencial con el fin de mejorar la flexibilidad y la accesibilidad. Estas innovaciones son fundamentales a la hora de abordar las necesidades en rápida evolución de las capacidades y la preparación de los estudiantes (tanto de los nuevos alumnos como de los trabajadores que se siguen formando) para adaptarse a las complejidades de los modernos entornos industriales.

Y aun así, siguen existiendo retos. **Es frecuente que los centros de FP se enfrenten a barreras estructurales**, incluida una autonomía limitada a la hora de elaborar programas, una formación insuficiente de los formadores (especialmente en el ámbito de las herramientas digitales y las nuevas metodologías de enseñanza), estructuras desfasadas de los planes de estudio y limitaciones en la financiación para la mejora del equipo y las infraestructuras. Como resultado de ello, muchos centros se enfrentan a graves problemas para poder mantener el ritmo de la transformación industrial.

Para resolver estas lagunas, las instituciones de FP están comenzando a explorar nuevos formatos, por ejemplo, **microcredenciales**, **rutas de formación modulares** y **colaboración entre centros** con el fin de poder dar una mejor respuesta al incremento de las matriculaciones y la demanda por parte de los empleadores de personal altamente especializado.

El **informe del País Vasco** ofrece ejemplos concretos del modo en que se están satisfaciendo estos retos por medio de **estrategias de adopción gradual de la tecnología** respaldadas por **financiación pública y proyectos de colaboración**. Estas iniciativas proporcionan entornos seguros y de bajo riesgo para experimentar con tecnologías emergentes y fomentar la innovación. Además, **los centros de FP del País Vasco están participando activamente en proyectos de innovación aplicada**, posicionándose como actores cruciales en las estrategias industriales regionales. Su contribución **a la actualización y la recapacitación** destaca el papel central que los centros de FP pueden desempeñar a la hora de apoyar a los ecosistemas locales y dirigir la transformación real.

Finalmente, las **iniciativas de la UE (por ejemplo, LCAMP)** constituyen un nivel crítico para la coordinación y el apoyo, alineando la experimentación local con objetivos estratégicos continentales. Al vincular la industria, la política y la educación, estos programas mejoran la capacidad de los centros de FP para actuar como **catalizadores de la innovación, la sostenibilidad y la inclusión** en el futuro de la fabricación avanzada.

5.2. LECCIONES ESTRATÉGICAS

La transformación de la fabricación avanzada a través de tecnologías digitales y ecológicas revela seis lecciones estratégicas críticas para la alineación de la evolución industrial con el desarrollo de la población activa y la renovación educativa:

- **La tecnología no es neutral y su adopción es contextual y desigual.** Es habitual que sean las grandes empresas las que lideren la innovación, beneficiándose de infraestructuras internas robustas y de una gran capacidad de inversión. Por el contrario, las pymes adoptan las tecnologías de forma más gradual, limitadas por las restricciones financieras, organizativas y técnicas. Por tanto, el éxito de las estrategias de transformación debe tener en cuenta estos puntos de partida divergentes y priorizar las soluciones modulares, escalables y orientadas a los servicios.
- **Las transiciones digital y verde están convergiendo y se refuerzan mutuamente.** Los objetivos de sostenibilidad ya no pueden separarse de las agendas tecnológicas. El PdM reduce el uso de energía, los residuos materiales y las emisiones mediante la aplicación de un mantenimiento proactivo. La digitalización SCM posibilita modelos de economía circular y facilita la trazabilidad de las emisiones. Cada vez es más frecuente que se intenten conseguir objetivos ecológicos a través de herramientas digitales. Esto da lugar a sinergias que deben ponerse en práctica conjuntamente.
- **Tanto en el PdM como en la SCM, las expectativas relativas a la experiencia técnica y la fluidez digital, la capacidad de analizar datos y la posibilidad de interactuar con la IA aparecen con más frecuencia en las descripciones de los puestos de trabajo, junto con la capacidad para colaborar fuera de los campos de estudio.** El surgimiento de estas expectativas refleja la creciente demanda de perfiles híbridos que combinen un conocimiento profundo del dominio con capacidades transfuncionales, digitales e interpersonales.
- **Los sistemas de FP se están convirtiendo en actores estratégicos en los ecosistemas de la innovación.**

El papel de los centros de FP va más allá de la proporción de formación. Tal como queda señalado de forma notable en el País Vasco, se están convirtiendo en facilitadores de la innovación industrial, en bancos de prueba de tecnologías aplicadas y en agentes de la resiliencia de la economía local. El fortalecimiento de su autonomía, su capacidad técnica y sus vínculos con la industria son críticos para garantizar rutas de transición inclusivas.

- **Las capacidades son la moneda de cambio de la transformación - y están evolucionando.**
- **La competencia técnica en IA, la computación en la nube y el IoT cada vez son más importantes**. No obstante, son igualmente importantes las competencias transversales: adaptabilidad, pensamiento crítico, colaboración y autonomía del aprendizaje. A medida que surgen roles híbridos y los entornos laborales disponen de un gran volumen de datos, los trabajadores deben combinar la fluidez operativa con la capacidad analítica y la resiliencia de las capacidades blandas.
- **La gestión del cambio es el eje de la transformación.**
- **La adopción de tecnología es tanto cultural como técnica**. El éxito de las transiciones industrial y educativa depende del liderazgo, la comunicación y la confianza. De la resistencia a la automatización a modelos pedagógicos desfasados, el progreso depende de la preparación tanto de las personas como de las instituciones para reinventarse continuamente.

5.3. RECOMENDACIONES

En respuesta a estas lecciones estratégicas, se proponen las siguientes recomendaciones transversales para los *stakeholders* en el ecosistema de la fabricación avanzada:

En el caso de los encargados de elaborar políticas y las autoridades responsables de la financiación

- Garantizar una inversión sostenida en la transformación digital y ecológica dando apoyo a su adopción por parte de las pymes mediante colaboraciones público-privadas, bonos de innovación y plataformas para la experimentación de bajo riesgo.
- Reconocer los centros de FP como agentes de la transformación estratégica y favorecer su autonomía, la mejora de sus infraestructuras y el incremento de su capacidad para participar en ecosistemas de la innovación.
- Fomentar la alineación entre marcos de cualificación nacionales y perfiles profesionales emergentes, garantizando que los puestos de trabajo en evolución y los conjuntos de capacidades híbridas sean reconocidos y transferibles en toda Europa.

En el caso de las pymes y los stakeholders industriales

- Adoptar tecnologías modulares y escalables (por ejemplo, PdM como servicio y plataformas SCM basadas en la nube) para reducir el riesgo de la inversión e incrementar la agilidad.
- Invertir en la actualización de la población activa por medio de microcredenciales y aprendizaje a lo largo de la vida, por ejemplo, en IA, interpretación de datos y operaciones sostenibles.
- Fomentar una cultura de la colaboración agrupando ecosistemas de plataformas, participando en redes de innovación regionales y creando confianza en las cadenas de suministro.

En el caso de los centros de FP y los proveedores de formación

- Desarrollar e integrar modelos de formación híbridos que combinen el aprendizaje en línea y presencial, facilitando la flexibilidad tanto de estudiantes como de profesionales.
- Colaborar con empresas en el diseño conjunto de planes de estudio y la aplicación de capacidades en el mundo real, especialmente por medio de bancos de pruebas, estudios de casos y proyectos de innovación.
- Fortalecer la formación de formadores, equipándoles tanto con experiencia digital como con enfoques pedagógicos modernos.

En el caso de la coordinación a nivel de la UE

- Continuar con iniciativas como LCAMP que creen metodologías estructuradas para observar las tendencias tecnológicas, la necesidad de capacidades y la innovación en la formación.
- Facilitar la armonización de estrategias de transición digital y verde en los Estados miembro, facilitando que los centros de FP y las pymes operen en un marco coherente de objetivos y soporte.

Si se aplican estas recomendaciones, Europa podrá garantizar que su sector de fabricación avanzada continúe siendo competitivo a nivel mundial, medioambientalmente sostenible y socialmente inclusivo, sustentado por un ecosistema de FP preparado para superar los retos del mañana.

5.4. PERSPECTIVAS

Las transiciones ecológica y verde que están reconfigurando actualmente el sector de la fabricación avanzada no son tan solo retos tecnológicos. Son oportunidades sistémicas y para el ser humano. Si miramos al futuro, vemos claro que el éxito de la transformación requiere algo más que el acceso a nuevas herramientas. Necesita la capacidad necesaria para integrar estas innovaciones en las operaciones cotidianas, las expectativas de la población activa y los sistemas educativos.

Tanto en el mantenimiento predictivo (PdM) como en la Gestión de la Cadena de Suministro (SCM), las perspectivas vienen definidas por la convergencia. Los objetivos verdes y digitales cada vez están más interrelacionados, no solo en términos de sostenibilidad, sino también en estrategias compartidas para lograr la eficiencia, la circularidad, la transparencia y la resiliencia. En ambos campos, tanto las pymes como las grandes empresas están experimentando con soluciones híbridas: combinando experiencia local con infraestructuras basadas en la nube, roles tradicionales con sistemas optimizados con IA y estrategias de adopción modular con una mayor alineación de la cadena de valor.

Los centros de FP son facilitadores clave de esta transición. Las perspectivas para la enseñanza profesional ya no se limitan a la formación técnica o a la certificación específica al sector. Se están expandiendo hacia el desarrollo de capacidades integradas. Los centros deben preparar a los estudiantes para el pensamiento sistémico, el trabajo en colaboración entre los diferentes dominios y la adaptación continua respecto a las demandas en evolución de las industrias facilitadas digitalmente y orientadas a la sostenibilidad. Esto conlleva el fomento de rutas de aprendizaje flexible, el fortalecimiento de colaboraciones con la industria y la garantía de que el profesorado se dote de las capacidades necesarias (y la libertad institucional) para experimentar, evolucionar y liderar.

Al mismo tiempo, las formas de cooperación y experimentación que están surgiendo conformarán la siguiente fase de la transformación. Ya sea mediante bancos de pruebas, colaboraciones público-privadas o modelos de financiación experimentales, los centros de FP y la industria deben diseñar conjuntamente tanto la experiencia del aprendizaje como las hojas de rutas tecnológicas. El trabajo con diversos centros de FP y docenas de socios industriales ha dado lugar a este paquete de trabajo con valiosos *insights* sobre la base común de la formación académica, la preparación práctica, la formación profesional y la preparación de la población activa. El acceso directo a aspiraciones y actividades de formación así como las percepciones y protocolos de las pymes y las grandes empresas ha dado lugar a un análisis cuidadoso de dos áreas fundamentales en el panorama de la fabricación. Ha quedado claro el valor de la formación en los centros de FP, la necesidad de colaborar para el ámbito educativo y la industria, y el compromiso común que tenemos todos con el éxito del aprendizaje de los estudiantes y la satisfacción de los empleados en el mundo laboral. A través de la lente del mantenimiento predictivo y la gestión de la cadena de suministro, hemos observado que las transformaciones digital y verde comparten un futuro común respaldado por un compromiso común.

Para ello, la perspectiva de la integración colaborativa de estas dos conclusiones (y de las dos instituciones que respaldan estos objetivos) es, al mismo tiempo, positiva y posible. Está en nuestras manos, en cuanto instituciones individuales y como colectividad del sector educativo, trabajar con empresas de todos los tamaños para conseguir la transformación del aprendizaje, la enseñanza, la formación y el empleo. A través de recomendaciones tanto prácticas como operativas, orientadas al alumno y ampliables a toda la industria, locales, regionales y transnacionales, tenemos la oportunidad de volver a imaginar el futuro de la educación y la formación profesionales en fabricación avanzada en toda la Unión Europea y el resto del mundo.

Estos informes, y los *insights* que transmiten, no existirían sin la inteligencia, energía y dedicación colectivas de todos los interesados que han participado en este estudio.

Traspasando fronteras, husos horarios e instituciones, los contribuyentes han aportado sus experiencias y un compromiso común con la excelencia. Desde el mismo núcleo de la Unión Europea hasta las regiones circundantes, este espíritu de cooperación refleja lo mejor de la misión Erasmus+: la colaboración, la orientación a las personas y el foco en el futuro. Es un privilegio ser testigos y formar parte de un ejemplo vibrante de esta naturaleza del espíritu europeo en acción.

6. REFERENCIAS

Pablo Marino. (junio, 2025). Alineación de la oferta FP y las necesidades de la industria en Fabricación Avanzada en el País Vasco. Proyecto LCAMP – Observatorio WP3 – D3.2 – M36. https://lcamp.eu

Pichoutou Pascal, Ralf Steck, Camille Leonard y Jesús Rebolledo. (junio, 2025a). Impacto de las tecnologías digitales 4.0 y la transición verde en el mantenimiento preventivo. Proyecto LCAMP – Observatorio WP3 – D3.2 – M36. https://lcamp.eu

Pichoutou Pascal, Ralf Steck, Camille Leonard y Jesús Rebolledo. (junio, 2025b). Impacto de las tecnologías digitales 4.0 y la transición verde en la gestión de la cadena de suministro. Proyecto LCAMP – Observatorio WP3 – D3.2 – M36. https://lcamp.eu

7. ÍNDICE DE TABLAS

Table 1. Skills needs (extract) 32

Table 2. Examples of European Projects in technological trends and skills development in advanced manufacturing 40

Table 3. New technologies and fields into trainings related to PdM 40

Table 4. New technologies and fields into trainings related to SCM 41

Table 5. Trainings related to SCM and its main skills trained 43

Table 6. Specialisation programmes in the Basque Country 45

Table 7. Skills needs (from PdM, SCM and Basque Country reports) 59

8. ANEXO

8.1. ANEXO 1: NECESIDADES RELATIVAS A CAPACIDADES

Tabla 7. Necesidades relativas a capacidades (de los informes PdM, SCM y del País Vasco)

Área de competencia LCAMP	Categorización	Subcategorías recomendadas en el marco LCAMP	Ocupación / Origen del informe	Necesidades relativas a las capacidades
Alfabetización IA	**Competencia**	Competencia digital crítica	**Mantenimiento Predictivo (PdM)**	IA o Aprendizaje Automático básicos - conocimientos básicos de modelos IA/ML
	Capacidad	Visión artificial	**Técnico de control de calidad (BC)**	Visión informática y CNN para detección de defectos - aplicación de redes neuronales al control de calidad automatizado
		Aprendizaje automático	**Técnico de control de calidad (BC)**	Herramientas de inspección basadas en IA - uso de la inteligencia artificial para detectar defectos
Digital	**Actitud**	Ciberseguridad	**Mantenimiento Predictivo (PdM)**	Concienciación sobre ciberseguridad - concienciación sobre seguridad TI
			Gestión de la Cadena de Suministro (SCM)	Concienciación sobre ciberseguridad - concienciación sobre seguridad TI
		ICT	**Operario CNC /Técnico de control de calidad / Técnico de automatización-robótica (BC)**	Ciberseguridad en entornos OT - comprender los riesgos para la seguridad en los sistemas de producción
	Competencia	ICT	**Gestión de la Cadena de Suministro (SCM)**	Plataforma en la nube - capacidad para utilizar herramientas en la nube Capacidades para la resolución de problemas - capacidad para utilizar herramientas en la nube

		Resolución de problemas	**Mantenimiento Predictivo (PdM)**	Resolución de problemas (mantenimiento) - pensamiento analítico para la toma de decisiones basada en datos
		Diseño de sistemas	**Mantenimiento Predictivo (PdM)**	Gestión de modelos predictivos (análisis de patrones de fallos, umbrales de riesgos)
			Técnico de automatización-robótica (BC)	Integración de robótica industrial - conexión de robots con sistemas de líneas de producción
	Capacidad	Alfabetización en datos	**Mantenimiento Predictivo (PdM)**	Interpretación de datos de sensores - capacidad para leer y utilizar datos de sensores IoT
				Capacidad para el diagnóstico de datos (mantenimiento) - análisis de datos para diagnóstico de fallos
			Gestión de la Cadena de Suministro (SCM)	Alfabetización en datos - Alfabetización general en datos en la SCM
		ICT	**Gestión de la Cadena de Suministro (SCM)**	Perfiles híbridos (cadena de suministro + capacidades digitales) - por ejemplo, analistas de la cadena de suministro con capacidades digitales
				Alfabetización en sistemas ERP y SCM - Uso rutinario de software ERP/SCM
			Técnico de automatización-robótica (BC)	Protocolos de comunicación (OPC-UA, Ethernet) - implementación de estándares de comunicación industrial
			Operario CNC (BC)	Interfaces digital y HMI - uso de controles en pantalla táctil en máquinas CNC.
			Técnico de automatización-robótica / Técnico de mantenimiento (BC)	Aplicar protocolos de ciberseguridad básicos en entornos - poner en práctica procedimientos

				de seguridad y control de accesos en sistemas de producción
			Técnico de mantenimiento (BC)	Instalación y configuración de sensores IoT industriales - configuración de sensores conectados para recopilación de datos
				Utilizar sistemas de gestión de mantenimiento asistidos por ordenador (CMMS) - gestionar digitalmente los flujos de trabajo relativos al mantenimiento
		ICT	**Mantenimiento Predictivo (PdM)**	Usar plataformas PdM - usar cuadros de mando PdM, herramientas CMMS, etc.
		Resolución de problemas	**Mantenimiento Predictivo (PdM)**	Interpretación de datos (mantenimiento) - análisis de datos para diagnóstico de fallos
			Técnico de mantenimiento (BC)	Resolución de problemas de conectividad de datos en redes IoT - resolución de problemas de comunicación en sistemas conectados
		Alfabetización en datos	**Técnico de control de calidad (BC)**	Uso de sistemas digitales de inspección - utilización de equipo automatizado de medición y realización de pruebas
				Documentación digital y trazabilidad - mantener registros electrónicos de datos de calidad
				Configuración de sistemas de visión - configurar cámaras y procesamiento de imágenes para control de calidad

			Operario CNC (BC)	Integración de sistemas MES/ERP - conexión de las operaciones de las máquinas con los sistemas de la empresa
				Adquisición e interpretación de datos - recopilar y analizar datos de producción para optimización
			Técnico de mantenimiento (BC)	Datos de sensores de monitores (IoT) - analizar datos en tiempo real de sensores industriales conectados
				Utilización de plataformas basadas en la nube para monitorizar el rendimiento de las máquinas - acceso remoto a sistemas de monitorización
		Visión artificial	**Técnico de control de calidad (BC)**	Sistemas de visión de las máquinas - utilizar sistemas de inspección de calidad basados en cámaras
		Manufactura digital	**Operario CNC (BC)**	Utilización de software CAD/CAM - uso de programas de diseño y fabricación asistidos por ordenador
Transversal	**Actitud**	Comunicación	**Gestión de la Cadena de Suministro (SCM)**	Comunicación y coordinación - actitud receptiva y buena disposición a poner en práctica la transformación digital
		Flexibilidad/Agilidad	**Mantenimiento Predictivo (PdM)**	Adaptabilidad - buena disposición para adaptarse al cambio en los roles o tecnologías
	Competencia	Colaboración / trabajo en equipo	**Mantenimiento Predictivo (PdM)**	Colaboración - colaboración interdepartamental (mantenimiento, operaciones TI)
		Pensamiento crítico	**Gestión de la Cadena de Suministro (SCM)**	Pensamiento estratégico - comprensión holística

				de cadenas de suministro complejas
	Capacidad	Colaboración / trabajo en equipo	**Capacidades transversales (BC)**	Trabajo eficaz en equipo - colaborar con éxito en grupos de trabajo multidisciplinarios
				Colaboración interfuncional - trabajo eficaz con equipos multidisciplinarios en entornos digitales
		Comunicación	**Capacidades transversales (BC)**	Comunicación y coordinación - transmisión clara de la información entre los diferentes departamentos y turnos
		Flexibilidad/Agilidad	**Capacidades transversales (BC)**	Adaptación a tecnologías emergentes - buena disposición para aprender y utilizar nuevas herramientas tecnológicas
		Resolución de problemas	**Capacidades transversales (BC)**	Resolución de problemas y toma de decisiones - análisis de situaciones y puesta en práctica de decisiones técnicas
		Mejora continua	**Capacidades transversales (BC)**	Mentalidad de mejora continua - identificación de oportunidades de optimización en procesos digitales de fabricación
Profesional	**Competencia**	Diseño de sistemas	**Técnico de automatización-robótica (BC)**	Integración de robótica industrial - conexión de robots con sistemas de líneas de producción
	Capacidad	Diseño de sistemas	**Técnico de automatización-robótica (BC)**	Configuración de sistemas de visión - configuración de cámaras y procesamiento de imágenes para guía y automatización robótica

LCAMP

Learner Centric Advanced Manufacturing Platform



Co-funded by
the European Union

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.