



# ESTUDIO SOBRE EL ESTADO DE LA DIGITALIZACIÓN EN LA INDUSTRIA ESPAÑOLA DEL METAL.

**Edita:**

Fundación del Metal para la Formación, Cualificación y el Empleo

C/. Príncipe de Vergara, 74 - 5ª Planta - 28006 Madrid

Tel: 91 562 55 90 | 91 177 01 31

[observatoriometal@fmfce.org](mailto:observatoriometal@fmfce.org)

[www.fmfce.com](http://www.fmfce.com)

# ESTUDIO SOBRE EL ESTADO DE LA DIGITALIZACIÓN EN LA INDUSTRIA ESPAÑOLA DEL METAL.

Junio 2026

## Agradecimientos

Desde el inicio del proyecto muchas han sido asociaciones territoriales que han contribuido en distintos ámbitos, participando en sesiones grupales y de validación de datos como el Focus Group y/o identificando empresas en sus comunidades para poder pasar a hacer el estudio de campo de consultoría que hemos realizado entre los meses de febrero y mayo de 2026. Especial agradecimiento a las siguientes:

- AECIM – Asociación de Empresas del Metal de Madrid
  - FEDEME – Federación de Empresarios del Metal de Sevilla
  - FEMEVAL – Federación Empresarial Metalúrgica Valenciana
  - FEMETAL – Federación de Empresarios del Metal y Afines del Principado de Asturias
  - FEMPA – Federación de Empresarios del Metal de la Provincia de Alicante
  - FEMEPA – Federación Provincial de la Pequeña y Mediana Empresa del Metal y Nuevas Tecnologías de Las Palmas
  - FEMETE – Federación Provincial de Empresarios del Metal y Nuevas Tecnologías de Santa Cruz de Tenerife
  - FEMZ – Federación de Empresas del Metal de Zaragoza
  - FER – Federación de Empresas de La Rioja
  - FREMM – Federación Regional de Empresarios del Metal de Murcia
  - UPM – Unió Patronal Metal·lúrgica
- 
- P Cruz – Murcia
  - Industrias SIMA – Valencia.
  - Industrias Oriol – Barcelona.
  - ANUDAL – Barcelona.
  - José Combalía – Girona.
  - TSK – Asturias.
  - Montrasa – Asturias.
  - INESPASA – Sevilla
  - MTECH – Madrid.
  - Talleres Quintana – Tenerife.
  - Canary Welding – Gran Canaria.
  - Mecanizados V. Rodríguez – Zaragoza

**Coordina:** Confemetal

**Maqueta:** FMF

**Edita:** FMF

**Edición:** Junio 2026

## Equipo de Trabajo:

Francisco Rojo. CTIC Centro Tecnológico  
Pablo Coca. CTIC Centro Tecnológico  
Servicios Técnicos de Confemetal

---



# ÍNDICE

<b>0. RESUMEN EJECUTIVO</b>	<b>11</b>
0.1. Contexto estratégico y alcance del diagnóstico	11
0.2. Fotografía ejecutiva de la madurez digital	12
0.3. Brechas críticas: tamaño, subsector, dato y cultura	13
0.4. Barreras y riesgos que condicionan la transformación	14
0.5. Oportunidades de mayor impacto y prioridades de actuación	14
0.6. Roadmap estratégico 2026-2030	15
0.7. Conclusión ejecutiva	16
<b>1. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO ESTRATÉGICO</b>	<b>17</b>
1.1. Contexto macroeconómico y estratégico del sector del metal	17
1.1.1. El peso del metal en la economía española	17
1.1.2. Estructura empresarial y subsectores	19
1.1.3. Exportaciones e integración en la economía europea	20
1.1.4. Principales retos estratégicos del sector	20
1.1.5. La transición energética y el mecanismo CBAM	20
1.1.6. La competencia asiática y la sobrecapacidad global	20
1.1.7. La digitalización como imperativo competitivo	21
1.2. Evolución de los paradigmas industriales: de la Industria 1.0 a la Industria 5.0	21
1.2.1. Las cuatro revoluciones industriales y el origen de la quinta	21
1.2.2. La Industria 4.0 y sus tecnologías habilitadoras en el sector metal	23
1.2.3. La Industria 5.0: el paradigma europeo emergente	23
1.2.4. La dimensión humano-céntrica	24
1.2.5. La dimensión sostenible	24
1.2.6. La dimensión resiliente	24
1.2.7. Estado de adopción de la Industria 4.0 en el sector metal español	25
1.3. Reindustrialización, autonomía estratégica y soberanía industrial en Europa	25
1.3.1. El mandato europeo de reindustrialización	25
1.3.2. Autonomía estratégica abierta y cadenas de valor críticas	26
1.3.3. El Critical Raw Materials Act (CRMA) y el sector metal	26
1.3.4. El Net Zero Industry Act (NZIA) y la cadena de valor del metal verde	26
1.3.5. El impacto de la guerra de Ucrania y la guerra en Irán y el bloqueo de Ormuz en la industria del metal europea	27
1.3.6. España como polo de reindustrialización en el sur de Europa	27
1.4. El papel del sector metal en el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia	28
1.4.1. Arquitectura general del PRTR	28
1.4.2. Componentes y programas clave para el sector metal	28
1.4.3. PERTEs y proyectos estratégicos con impacto en el metal	29
1.4.4. Horizon Europe y la Clean Steel Partnership	30
1.4.5. Estado de ejecución del PRTR y retos de absorción para el sector metal	30
1.5. Objetivos y alcance del estudio	31
1.5.1. Propósito y motivación del estudio	31
1.5.2. Objetivos específicos	31
1.5.3. Alcance y delimitación del estudio	32
1.5.4. Metodología de referencia	32
1.5.5. Estructura del documento	32

<b>2. METODOLOGÍA Y MARCO DE REFERENCIA</b>	<b>34</b>
2.1. Enfoque metodológico del estudio	34
2.1.1. Componente Cuantitativo	34
2.1.2. Componente Cualitativo	34
2.2. Fases del proyecto	35
2.2.1. Fase 1: Recogida y sistematización de información	35
2.2.2. Fase 2: Análisis, validación e identificación de necesidades	36
2.2.3. Fase 3: Síntesis de conclusiones y elaboración del informe final	36
2.3. Fuentes de información utilizadas	36
2.3.1. Fuentes de información primarias	37
2.3.2. Fuentes de información secundarias	37
2.3.3. Diseño del instrumento de recogida (Cuestionario)	38
2.3.4. Criterios de anonimización y protección de datos	38
2.3.5. Calidad del dato y normalización	39
2.4. Modelo multidimensional de análisis de madurez digital	39
2.4.1. Las Siete Dimensiones de la Transformación Digital Industrial	39
2.4.2. Construcción del Índice Sintético Global	40
2.4.3. Segmentación y Tipologías Operativas	41
<b>3. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA. DISEÑO DEL TRABAJO DE CAMPO</b>	<b>42</b>
3.1. Perfil y distribución de la muestra	42
3.1.1. Distribución por tamaño empresarial	42
3.1.2. Implicaciones estructurales del tamaño en la digitalización	43
3.1.3. Distribución por subsector industrial (CNAE)	44
3.1.4. Análisis cualitativo por subsector	45
3.1.5. Distribución de la muestra	46
<b>4. CONTEXTO TECNOLÓGICO DEL SECTOR INDUSTRIAL</b>	<b>47</b>
4.1. Tecnologías de gestión empresarial y operación	47
4.1.1. Sistemas de Planificación de Recursos Empresariales (ERP)	47
4.1.2. Facturación Electrónica y Digitalización Administrativa	50
4.1.3. Computación en la Nube (Cloud Computing)	54
4.1.4. Gestión de Relaciones con Clientes (CRM)	56
4.1.5. Sistemas de Ejecución de Manufactura (MES)	59
4.2. Tecnologías de producción avanzada y automatización	62
4.2.1. Robótica Industrial y robótica colaborativa	62
4.2.2. Visión Artificial y Control de Calidad Automatizado	62
4.2.3. Fabricación aditiva (Impresión 3D Metálica)	63
4.2.4. Sistemas Ciberfísicos y Mecanizado Avanzado (CNC)	63
4.3. Tecnologías de conectividad y gestión de datos	65
4.3.1. Internet de las Cosas Industrial (IIoT)	65
4.3.2. Business Intelligence (BI) y Analítica de Datos	65
4.3.3. Ciberseguridad Industrial (OT/IT Security)	65
4.3.4. Trazabilidad Digital y Cadena de Suministro	65
4.4. Tecnologías emergentes y disruptivas	68
4.4.1. Inteligencia Artificial (IA) y Machine Learning	68
4.4.2. Inteligencia Artificial Generativa y Agentes Autónomos	68
4.4.3. Mantenimiento Predictivo	68
4.4.4. Gemelos Digitales (Digital Twins) y Simulación	68
4.5. Tendencias tecnológicas relevantes para el sector metal	71
4.5.1. La convergencia hacia la Industria 5.0	71
4.5.2. Tecnologías para la Descarbonización y el “Acero Verde”	71
4.5.3. Servitización y nuevos modelos de negocio	71
4.5.4. Computación Cuántica y Materiales Avanzados (Horizonte a largo plazo)	71

<b>5. RESULTADOS DEL ESTUDIO: ESTADO ACTUAL DE DIGITALIZACIÓN</b>	<b>74</b>
5.1. Nivel de madurez digital del sector	76
5.1.1. Lectura por tamaño empresarial	77
5.2. Digitalización de procesos productivos	80
5.2.1. Lectura por subsector productivo	81
5.2.2. Implicaciones operativas	81
5.3. Digitalización de gestión empresarial	84
5.3.1. Interpretación cualitativa	87
5.4. Integración de sistemas y uso del dato	87
5.4.1. Principales brechas observadas	90
5.4.2. Líneas de mejora con mayor retorno	90
5.5. Automatización, robotización y sensorización	90
5.5.1. Casos de uso con mayor potencial	93
5.6. Uso de inteligencia artificial y analítica avanzada	93
5.6.1. Secuencia recomendada de adopción	96
5.7. Implicaciones estratégicas del diagnóstico	96
5.8. Conclusiones operativas	96
<b>6. BRECHAS Y RETOS PARA LA DIGITALIZACIÓN</b>	<b>97</b>
6.1. Brecha digital por tamaño empresarial	97
6.1.1. Microempresas (< 10 empleados): El reto de la supervivencia y la ciberhigiene	98
6.1.2. Pequeñas empresas (10-49 empleados): El síndrome de las “islas de información”	98
6.1.3. Medianas empresas (50-249 empleados): La crisis de gobernanza y la convergencia OT/IT	99
6.1.4. Grandes empresas (>250 empleados): Gestión de la complejidad y escalado de la innovación	99
6.2. Brecha digital por subsector industrial	100
6.2.1. Fabricación de productos metálicos (CNAE 25): El reto de la variabilidad y el control del taller	100
6.2.2. Maquinaria y equipo (CNAE 28): El reto de la ingeniería, la servitización y el ciclo de vida	100
6.2.3. Metalurgia y primera transformación (CNAE 24): El reto del proceso continuo, la energía y la sostenibilidad	101
6.3. Barreras tecnológicas y de inversión	102
6.3.1. La deuda tecnológica y el desafío de la interoperabilidad (Legacy Systems)	102
6.3.2. La convergencia OT/IT y la fragmentación de la arquitectura	103
6.3.3. El déficit de Gobernanza y Calidad del Dato	103
6.3.4. La Ciberseguridad Industrial como barrera crítica	104
6.3.5. Barreras de Inversión: La incertidumbre del ROI y el cambio de modelo financiero	104
6.4. Barreras organizativas y culturales	104
6.4.1. Ausencia de Liderazgo Digital y Visión Estratégica	105
6.4.2. El déficit de talento y la escasez de “Perfiles Híbridos”	105
6.4.3. Relevo generacional, conocimiento tácito y resistencia al cambio	105
6.4.4. La estructura en “Silos” y la falta de colaboración transversal	106
<b>7. TALENTO, CULTURA Y FACTOR HUMANO EN LA TRANSFORMACIÓN DIGITAL</b>	<b>108</b>
7.1. Nuevas competencias digitales en la industria del metal	109
7.1.1. Evolución del perfil profesional en el sector metal-mecánico	109
7.1.2. Competencias técnicas (Hard Skills) emergentes	110
7.1.3. Competencias transversales (Soft Skills) en el entorno digital	110
7.1.4. La emergencia de los perfiles híbridos y el “Propietario del Dato”	111

7.2. Gestión del cambio en entornos industriales	112
7.2.1. Naturaleza y raíces de la resistencia al cambio en el sector metal	112
7.2.2. Modelos metodológicos de gestión del cambio aplicados a la pyme industrial	113
7.2.3. Comunicación, transparencia y el rediseño de procesos (BPR)	114
7.2.4. Captura y transferencia del conocimiento tácito: El reto del relevo generacional	114
7.3. Necesidades de formación y cualificación	115
7.3.1. Diagnóstico de la brecha de habilidades (Skills Gap) por tamaño empresarial	115
7.3.2. Estrategias de Upskilling y Reskilling	116
7.3.3. Modelos de aprendizaje continuo (Lifelong Learning) y Microlearning	116
7.3.4. El papel de la Formación Profesional (FP) Dual y la colaboración público-privada	117
7.3.5. Herramientas digitales inmersivas para la formación industrial	117
7.4. Cultura organizativa y liderazgo digital	118
7.4.1. De la cultura analógica a la cultura del dato (Data-Driven Culture)	118
7.4.2. El rol indelegable de la alta dirección y los mandos intermedios	119
7.4.3. Fomento de la innovación, agilidad y tolerancia al error (Bimodalidad)	119
7.4.4. Estructuras organizativas transversales: Rompiendo los silos	120
7.4.5. Hacia la Industria 5.0: Sostenibilidad, resiliencia y centralidad humana	120
7.5. Análisis Diferencial del Factor Humano por Subsectores (CNAE)	121
7.5.1. Fabricación de productos metálicos (CNAE 25): El operario conectado en entornos de alta variabilidad	121
7.5.2. Maquinaria y equipo (CNAE 28): Ingeniería, servitización y perfiles STEM	121
7.5.3. Metalurgia y primera transformación (CNAE 24): Relevo generacional en procesos continuos	121
7.6. Conclusiones del Capítulo	122
<b>8. SOSTENIBILIDAD INDUSTRIAL Y EFICIENCIA ENERGÉTICA</b>	<b>124</b>
8.1. Digitalización y sostenibilidad productiva	125
8.1.1. Industria 5.0 y sostenibilidad basada en datos	125
8.1.2. Trazabilidad digital como motor de sostenibilidad	125
8.1.3. Pasaporte Digital de Producto (DPP)	125
8.1.4. Gemelos digitales para la optimización sostenible	126
8.2. Eficiencia energética y optimización de recursos	127
8.2.1. Intensidad energética en los subsectores del metal	127
8.2.2. Sistemas de Gestión Energética (EMS) basados en IA y analítica de datos	127
8.2.3. Monitorización IoT y reducción de consumos ocultos	128
8.2.4. Transición hacia vectores energéticos limpios: El rol del Hidrógeno Verde	129
8.3. Impacto ambiental y economía circular	129
8.3.1. Descarbonización y el Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono (CBAM)	130
8.3.2. Reciclaje de metales y la Ley de Materias Primas Críticas (CRMA)	130
8.3.3. Servitización (Equipment-as-a-Service) como modelo circular	131
8.3.4. Gestión de mermas, reprocesos y optimización de la huella material	131
8.4. Hoja de ruta estratégica para la pyme del metal	132
<b>9. BUENAS PRÁCTICAS DETECTADAS EN EMPRESAS DEL METAL</b>	<b>135</b>
9.1. Matriz resumen de buenas prácticas detectadas	136
1. Dirección general: definir una hoja de ruta digital vinculada al negocio	137
2. Producción: digitalizar una línea crítica antes de extender la transformación a toda la planta	138
3. Mantenimiento: evolucionar desde el correctivo hacia el mantenimiento basado en condición	139
4. Calidad: conectar controles de calidad con datos de proceso y trazabilidad	140
5. Oficina técnica e ingeniería: gestionar versiones, planos y datos técnicos de forma controlada	141
6. Compras y proveedores: digitalizar la cadena de suministro con criterios de trazabilidad y riesgo	142

7. Almacén y logística interna: implantar trazabilidad de materiales y movimientos	143
8. Comercial y relación con clientes: profesionalizar el CRM industrial	144
9. Administración y finanzas: consolidar la digitalización administrativa como base de control	145
10. Sistemas de información: reducir aplicaciones aisladas y ordenar la arquitectura tecnológica	146
11. Datos y BI: convertir datos operativos en cuadros de mando útiles	147
12. Ciberseguridad: implantar una ciberhigiene industrial mínima y verificable	148
13. Personas y talento: desarrollar perfiles híbridos técnico-digitales	149
14. Energía y sostenibilidad: medir consumos y vincularlos al proceso productivo	150
15. Innovación y colaboración sectorial: compartir aprendizajes, pilotos y soluciones replicables	151
9.2. Cierre: lectura integrada de las buenas prácticas	152
<b>10. TENDENCIAS FUTURAS: HACIA LA INDUSTRIA 5.0</b>	<b>153</b>
10.1. La visión de la Industria 5.0	153
10.1.1. El pilar humano-céntrico (Human-Centricity)	153
10.1.2. El pilar de la sostenibilidad (Sustainability)	154
10.1.3. El pilar de la resiliencia (Resilience)	155
10.2. Impacto de la inteligencia artificial en la industria	155
10.2.1. Inteligencia Artificial Analítica y Machine Learning (ML)	155
10.2.2. Inteligencia Artificial Generativa (GenAI) en el entorno industrial	156
10.2.3. Agentes de IA Autónomos (Autonomous AI Agents)	156
10.3. Nuevas arquitecturas digitales industriales	157
10.3.1. La convergencia IT/OT y el Espacio de Nombres Unificado (Unified Namespace)	157
10.3.2. El continuo Cloud-to-Edge (Computación en la Frontera)	157
10.3.3. Espacios de Datos Industriales (Data Spaces) y Soberanía del Dato	158
10.3.4. Ciberseguridad Industrial: Arquitecturas Zero Trust	158
10.4. Convergencia entre digitalización, sostenibilidad y resiliencia	158
10.4.1. El Pasaporte Digital de Producto (DPP) y la Economía Circular	158
10.4.2. Descarbonización y Sistemas de Gestión Energética (EMS) Inteligentes	159
10.4.3. Torres de Control de la Cadena de Suministro (Supply Chain Control Towers)	159
10.5. Tecnologías emergentes a medio plazo (computación cuántica, edge AI, nuevos materiales)	159
10.5.1. Computación Cuántica (Quantum Computing) en la Industria del Metal	160
10.5.2. Edge AI (Inteligencia Artificial en la Frontera) y Micro-Machine Learning	160
10.5.3. Nuevos Materiales, Metamateriales y Manufactura Aditiva Avanzada	160
<b>11. ROADMAP DE TRANSFORMACIÓN DIGITAL DEL SECTOR METAL</b>	<b>163</b>
11.1. Principios estratégicos para la transformación del sector	163
Principio 1: La digitalización como medio, no como fin (Alineación a negocio)	163
Principio 2: Convergencia IT/OT y la consolidación del “Hilo Digital”	163
Principio 3: Gobernanza del dato como cimiento innegociable	164
Principio 4: Centralidad humana y transición a la Industria 5.0	164
Principio 5: Sostenibilidad y resiliencia integradas desde el diseño	164
Principio 6: Ciberseguridad como habilitador de la continuidad de negocio	164
11.2. Prioridades tecnológicas	165
Fase 1: Consolidación de la Base Digital y Ciberhigiene	165
Fase 2: Conectividad, Visibilidad Operativa y Trazabilidad	165
Fase 3: Inteligencia Analítica y Automatización Avanzada	165
Fase 4: Tecnologías de Frontera, Ecosistemas y Servitización	166
11.3. Prioridades organizativas y de talento	166
1. Liderazgo Digital y Gobernanza Transversal	166
2. Desarrollo de Perfiles Híbridos y Nuevos Roles	166

3. Estrategias Agresivas de Upskilling y Reskilling	167
4. Gestión del Cambio y Captura del Conocimiento Tácito	167
11.4. Recomendaciones para empresas	167
Recomendaciones por Segmento de Madurez y Tamaño. Hoja de Ruta Operativa: Las 4 Oleadas de Implantación	168
11.5. Recomendaciones para organizaciones sectoriales y administraciones	168
1. Rediseño de los Instrumentos de Financiación Pública	168
2. Impulso a la Formación Profesional (FP) Dual y Ecosistemas de Talento	169
3. Fomento de Ecosistemas de Innovación y Colaboración Abierta	169
4. Acompañamiento Regulatorio y Estandarización	169
<b>12. CONCLUSIONES FINALES DEL INFORME</b>	<b>171</b>
12.1. Diagnóstico global del sector	171
12.1.1. Una base digital asentada, pero todavía fragmentada	172
12.1.2. La planta productiva como principal frontera de integración	173
12.1.3. El tamaño empresarial como gran determinante, pero no como única explicación	173
12.1.4. La heterogeneidad subsectorial como condición de diseño	174
12.1.5. De la herramienta al dato: la brecha decisiva	175
12.1.6. Talento, cultura y liderazgo como condiciones de madurez	175
12.1.7. Sostenibilidad, resiliencia y competitividad: una misma agenda	175
12.2. Principales retos y oportunidades	176
12.2.1. Retos estratégicos prioritario	176
12.2.2. Oportunidades de mayor impacto	178
12.2.3. Lectura integrada de retos y oportunidades	180
12.3. Claves estratégicas para la competitividad futura	180
12.3.1. Digitalización alineada a negocio	180
12.3.2. Cimientos digitales y ciberhigiene antes de escalar	181
12.3.3. Hilo digital e integración IT/OT	181
12.3.4. Gobernanza del dato como capacidad competitiva	181
12.3.5. Talento híbrido y centralidad humana	182
12.3.6. Sostenibilidad integrada desde el diseño	182
12.3.7. Segmentación de actuaciones por tamaño, madurez y subsector	182
12.3.8. Roadmap operativo y disciplina de ejecución	182
12.3.9. Ecosistema público-privado como acelerador	183
12.3.10. Conclusión final: de la base digital a la ventaja industrial	183
<b>ANEXOS</b>	<b>185</b>
1. Anexo I. Glosario de términos técnicos	186
2. Anexo II. Resumen de fuentes consultadas para la ejecución del documento	218

## 0. RESUMEN EJECUTIVO

### IDEA FUERZA

La industria española del metal no parte de cero: dispone de una base digital real en gestión administrativa, sistemas ERP, sistemas en la nube (cloud) y facturación electrónica. Sin embargo, esa base sigue siendo fragmentada. La ventaja competitiva de los próximos años no dependerá de tener más herramientas, sino de conectarlas, gobernar los datos que generan y convertir esa información en decisiones operativas sobre producción, calidad, mantenimiento, logística, energía, servicio y resiliencia.

El sector se encuentra en un punto intermedio de madurez, ha superado la digitalización básica, pero todavía no ha consolidado una transformación integrada. La brecha ya no es únicamente tecnológica, es una brecha de arquitectura, dato, ejecución, talento y liderazgo. Por ello, este resumen ejecutivo debe tomarse como una síntesis orientada a conocer qué ocurre, qué riesgos existen, dónde está el valor y qué secuencia de actuación permite avanzar con realismo.

<b>6,2% PIB</b> Peso económico estructural	<b>1,15 M+ Empleo</b> Trabajadores vinculados	<b>218.000+ Empresas</b> Ecosistema metal amplio	<b>99,2% PYMES</b> Condición de diseño
<b>318 Empresas</b> Muestra analizada	<b>50,4/100 Madurez</b> Estadio intermedio	<b>87,5% Factura-e</b> Base administrativa	<b>36,2% Inteligencia de negocio (BI)</b> Salto analítico pendiente

### 0.1. CONTEXTO ESTRATÉGICO Y ALCANCE DEL DIAGNÓSTICO

La industria del metal constituye una de las columnas vertebrales de la economía productiva española. Su peso no se limita a la fabricación: conecta con automoción, construcción, energía, defensa, aeronáutica, maquinaria, mantenimiento industrial y servicios vinculados. En ese entorno, la digitalización ya no puede tratarse como una modernización periférica, sino como una condición estructural para competir, proteger márgenes, sostener empleo cualificado y responder a clientes y reguladores con garantías.

El contexto del sector combina presión competitiva internacional, transición energética, mayores exigencias de trazabilidad, sostenibilidad y seguridad, necesidad de resiliencia en cadenas de suministro y aceleración de tecnologías industriales. La agenda digital se cruza así con la agenda de productividad, coste energético, cumplimiento regulatorio, continuidad de negocio y autonomía estratégica.

Digitalizar no es introducir tecnología de forma aislada: es aumentar la capacidad de medir, conectar, anticipar, controlar y demostrar.

La metodología seguida en este estudio se apoya en una muestra de 318 empresas del sector metal-mecánico español, con lectura por tamaño, subsector y territorio. La distribución reproduce la realidad PYME del tejido: microempresas 20,1%, pequeñas 50,4%, medianas 26,3% y grandes 3,1%. Además, el análisis se complementa con una interpretación cualitativa sobre barreras, patrones de adopción y dificultades reales de implantación.

ELEMENTO	LECTURA EJECUTIVA
Objeto	Diagnosticar la madurez digital del metal español e identificar brechas, oportunidades y hoja de ruta.
Enfoque	Modelo multidimensional de madurez digital con lectura tecnológica, organizativa, humana y estratégica.
Dimensiones	Estrategia y liderazgo; organización y personas; producción y automatización; cadena de suministro; sistemas de información y datos; relación con clientes; innovación y sostenibilidad.
Resultado global	Índice sintético de madurez digital de 50,4 sobre 100: base digital existente, pero transformación integrada todavía incompleta.
Advertencia	La autodeclaración empresarial debe leerse con contraste cualitativo: disponer de una herramienta no implica necesariamente integrarla en procesos ni explotarla para decidir.

### LECTURA DIRECTIVA

La pregunta ya no es si el sector debe digitalizarse. La cuestión relevante es qué empresas serán capaces de pasar de una digitalización funcional, parcial y administrativa a una digitalización integrada, gobernada y orientada a resultados industriales medibles.

## 0.2. FOTOGRAFÍA EJECUTIVA DE LA MADUREZ DIGITAL

El índice de madurez digital del sector se sitúa en 50,4/100. Este valor describe un estadio intermedio: la digitalización básica está ampliamente extendida, pero la integración entre sistemas, la explotación analítica del dato y la conexión real entre oficina y planta no están todavía consolidadas. El sector tiene herramientas; el reto es convertirlas en arquitectura y en disciplina operativa.

INDICADOR	VALOR	INTERPRETACIÓN
Rezago estructural	5,4%	Empresas con bases digitales insuficientes y prioridad en ciberhigiene, gestión básica y continuidad operativa.
Transición	42,4%	Empresas con herramientas implantadas, pero con integración limitada, hojas de cálculo paralelas y uso parcial del dato.
Avanzada	46,9%	Empresas con capacidades relevantes, aunque todavía con recorrido en gobernanza, automatización y escalado.
Líder	5,4%	Empresas con mayor capacidad de integración, analítica, innovación y extensión a cadena de valor.

La capa administrativa es la más consolidada. La facturación electrónica alcanza el 87,5%; el ERP, el 62,9%; los sistemas en la nube, el 57,1%; y el CRM, el 46,4%. Estos datos muestran una base de gestión significativa, aunque no garantizan por sí solos madurez digital: el ERP puede estar infrautilizado, el cloud puede ser simple alojamiento y el CRM puede estar desconectado de planificación, producción o servicio.

La capa analítica y productiva presenta mayor distancia respecto a una industria plenamente conectada. La inteligencia de negocio (BI) se sitúa en el 36,2%, la ciberseguridad avanzada en el 44,6%, la IA aplicada al negocio en el 17,4% y los sistemas MES en el 11%. En producción, el IoT industrial se valora en 4,59/9, la robótica y automatización en 4,77/9, el big data productivo en 4,54/9 y la trazabilidad digital en 5,25/9. El patrón es claro: hay digitalización, pero falta densidad, integración y explotación sistemática.

CAPA	SITUACIÓN	SALTO PENDIENTE
Gestión	Base administrativa razonablemente consolidada.	Parametrización profunda, integración entre ERP, CRM, compras, almacén y producción.
Planta	Automatización y equipos presentes, pero con datos discontinuos.	Captura automática de estados, tiempos, incidencias, consumos, calidad y mantenimiento.
Dato	Información disponible, pero dispersa y con confianza desigual.	Gobernanza, datos maestros fiables, 3-5 KPIs operativos y revisión periódica.
Decisión	Reporte todavía manual en muchas empresas.	Cuadros de mando estables, trazabilidad causal y cultura de decisión basada en evidencia.

### 0.3. BRECHAS CRÍTICAS: TAMAÑO, SUBSECTOR, DATO Y CULTURA

El tamaño empresarial es el principal determinante de la brecha digital, aunque no el único. Las microempresas concentran las mayores limitaciones de recursos, tiempo y capacidad interna; las pequeñas sufren el síndrome de las islas de información; las medianas afrontan la crisis de gobernanza y la convergencia IT/OT; y las grandes gestionan complejidad, escalado, sistemas heredados (legacy) y ciberseguridad en entornos amplios.

SEGMENTO	DIAGNÓSTICO	PRIORIDAD EJECUTIVA
Microempresas	ERP y cloud en torno al 31,1%; IA residual; exposición por ciberhigiene insuficiente.	SaaS sencillo, orden documental, copias, MFA, facturación-contabilidad y apoyo externo.
Pequeñas	Base digital parcial, pero convivencia de ERP, Excel y procesos manuales.	Parametrizar ERP, conectar comercial-producción, eliminar duplicidades y estabilizar KPIs.
Medianas	Adopción sólida en ERP y cloud, pero reto fuerte en dato, BI, OT/IT y ciberseguridad industrial.	Gobernanza del dato, MES/IIoT focalizado, BI operativo y seguridad por diseño.
Grandes	Mayor madurez tecnológica, pero elevada complejidad de sistemas, centros, proveedores y legacy.	Arquitectura corporativa de datos, escalado de pilotos, ciberresiliencia y tracción de cadena.

La heterogeneidad subsectorial exige evitar recetas únicas. En fabricación de productos metálicos pesan la variabilidad, el control de taller, la trazabilidad y la calidad. En maquinaria y equipo son claves la ingeniería, la gestión de versiones, el ciclo de vida, la conectividad remota y la servitización. En metalurgia y primera transformación predominan la continuidad de proceso, la eficiencia energética, la sensorización robusta y la descarbonización.

SUBSECTOR	RETO PRIORITARIO	OPORTUNIDAD DIGITAL
CNAE 25 productos metálicos	Variabilidad, tiempos, lotes, no calidad y control de taller.	MES, captura de datos de planta, trazabilidad, visión artificial y análisis de scrap.
CNAE 28 maquinaria y equipo	Ingeniería, versiones, servicio, repuestos y ciclo de vida.	CAD/CAM/ERP integrado, gemelo digital, telemetría, mantenimiento remoto y servitización.
CNAE 24 metalurgia	Proceso continuo, energía, estabilidad, emisiones y cumplimiento.	IIoT energético, EMS, analítica predictiva, trazabilidad de carbono y optimización de consumos.

#### LA BRECHA DECISIVA

No está entre empresas que tienen o no tienen tecnología, sino entre organizaciones capaces de integrar y explotar información fiable frente a aquellas que mantienen silos, reporting manual y baja trazabilidad causal.

## 0.4. BARRERAS Y RIESGOS QUE CONDICIONAN LA TRANSFORMACIÓN

Los documentos analizados coinciden en una conclusión: la financiación importa, pero no basta. Las barreras decisivas se sitúan en la estrategia, el liderazgo, la capacidad de ejecución, la calidad del dato, el talento híbrido, la resistencia cultural y la ciberseguridad industrial. El mayor riesgo es la digitalización cosmética: implantar soluciones que no modifican los flujos de trabajo, no reducen errores, no aceleran decisiones y terminan conviviendo con procesos manuales en la sombra.

RIESGO	MANIFESTACIÓN HABITUAL	CONSECUENCIA
Fragmentación tecnológica	Herramientas aisladas, maquinaria conectada de forma parcial, hojas de cálculo paralelas.	Duplicidades, baja trazabilidad, dependencia de personas y visión incompleta del proceso.
Interoperabilidad limitada	Legacy, protocolos cerrados, integraciones costosas y ERPs muy personalizados.	Dificultad para conectar oficina, planta, calidad, mantenimiento, logística y dirección.
Gobernanza débil del dato	Datos maestros inconsistentes, definiciones no homogéneas, falta de propietarios de información.	Baja confianza en indicadores; BI e IA sin base fiable.
Separación IT/OT	Lenguajes, prioridades y responsabilidades desconectadas entre sistemas y planta.	Proyectos lentos, inseguros o difíciles de mantener.
Ciberseguridad insuficiente	Inventario incompleto, accesos débiles, redes no segmentadas, copias no verificadas.	Riesgo operativo directo: parada, pérdida de datos, fraude, sanción o interrupción de servicio.
Talento y cultura	Falta de perfiles híbridos, silos, resistencia al cambio y relevo generacional no gestionado.	Tecnología infrautilizada y pérdida de conocimiento tácito crítico.

La ciberseguridad merece una lectura específica. La convergencia entre IT y OT aumenta la superficie de ataque. Por tanto, inventario de activos, segmentación, MFA (multifactor de autenticación), copias 3-2-1 verificadas, control de accesos, monitorización y respuesta a incidentes deben tratarse como capacidades de continuidad de negocio, no como un añadido técnico.

El factor humano es el otro gran cuello de botella. La tecnología está disponible, pero el sector necesita perfiles capaces de traducir entre oficio, proceso industrial, datos e integración de sistemas. Propietarios de datos, analistas de planta, integradores OT/IT, responsables de ciberseguridad industrial y mandos intermedios con cultura digital serán piezas críticas para sostener la transformación.

## 0.5. OPORTUNIDADES DE MAYOR IMPACTO Y PRIORIDADES DE ACTUACIÓN

La secuencia de valor debe ser realista. En empresas de baja madurez, el retorno no vendrá de proyectos complejos de IA, sino de ordenar datos maestros, estabilizar ERP, automatizar informes de reporte, asegurar copias, digitalizar almacén, eliminar papel y conectar una línea crítica. En empresas más avanzadas, el valor se concentra en mantenimiento predictivo, visión artificial, analítica industrial, gemelos digitales, servitización y espacios de datos.

ÁMBITO	PRIORIDAD RECOMENDADA	RESULTADO ESPERADO
Dirección	Hoja de ruta digital integrada en la estrategia de la empresa vinculada a objetivos de negocio y revisada periódicamente.	Foco, responsabilidad interna y retorno medible.
Procesos	Empezar por una línea, activo o flujo crítico antes de escalar.	Aprendizaje rápido y menor riesgo de implantación.
Datos	Depurar datos maestros, seleccionar 3-5 KPIs esenciales y automatizar actualización.	Decisiones basadas en información fiable.
Producción	Conectar planta con ERP/MES y registrar paradas, mermas, tiempos y estados.	Mejor OEE, trazabilidad y planificación.
Calidad	Relacionar controles con lote, turno, equipo, proveedor y parámetros de proceso.	Análisis causal y reducción de no calidad.
Mantenimiento	Evolucionar del correctivo al mantenimiento predictivo.	Menos paradas no planificadas y mayor disponibilidad.
Sostenibilidad	Medir energía y materiales por proceso, línea o producto.	Eficiencia, control de costes y preparación regulatoria.

La eficiencia energética digitalizada es una de las palancas de retorno más claro. Medir consumos por línea, activo, proceso o familia de producto permite detectar pérdidas ocultas, optimizar cargas, vincular energía a coste real, preparar evidencias de sostenibilidad y anticiparse a exigencias regulatorias o de cliente. En un sector intensivo en energía, sostenibilidad y competitividad convergen.

La trazabilidad digital y la economía circular también deben entenderse como capacidades industriales, no solo regulatorias. Conectar lote, material, proveedor, operación, certificado, control de calidad e incidencia mejora auditorías, reclamaciones, residuos, cumplimiento y diferenciación en cadenas de valor exigentes.

### MANDATO DE IMPLANTACIÓN

Cada proyecto digital debe formularse con una pregunta de negocio, una métrica de éxito, un responsable interno, un alcance acotado y una decisión explícita de escalado. Sin esta disciplina, la empresa corre el riesgo de acumular herramientas sin aumentar capacidad industrial.

## 0.6. ROADMAP ESTRATÉGICO 2026-2030

La hoja de ruta consolidada propone una secuencia de maduración. No se trata de adoptar todas las tecnologías al mismo tiempo, sino de construir capacidades en orden: fundamentos, conectividad, inteligencia y nuevos modelos de valor. La madurez digital industrial exige cimientos seguros antes de escalar analítica avanzada o IA.

FASE	HORIZONTE	PRIORIDAD	RESULTADO ESPERADO
1. Cimientos digitales y ciberhigiene	2026-2027	ERP bien parametrizado, reducción crítica de Excel, cloud con continuidad, inventario de activos, MFA, copias verificadas y segmentación IT/OT.	Base operativa segura, ordenada y medible.
2. Conectividad, visibilidad y trazabilidad	2027-2028	IIoT/edge, MES en taller, captura automática de tiempos, mermas, estados, consumos y trazabilidad de lote.	Planta como fuente fiable de información.
3. Inteligencia analítica y automatización avanzada	2028-2029	BI industrial, cuadros de mando, mantenimiento predictivo, visión artificial y robótica colaborativa.	Decisiones basadas en información fiable.
4. Tecnologías de frontera y servitización	2029-2030	IA a escala, gemelos digitales, pasaporte digital de producto, espacios de datos y modelos Equipments-a-Service.	Eficiencia proactiva, mejora continua y reducción de no calidad.

El ecosistema público-privado debe acompañar esta transición. La atomización del sector limita la capacidad individual de muchas PYMES, por lo que las ayudas deben evolucionar desde la compra de activos hacia la construcción de capacidades: la línea en el camino ya abierta por algunas ayudas como el Kit Consulting (Red.es) o las ayudas a PYMES a través del programa de apoyo en Digital Innovation Hubs (EOI / MINTUR) para integración de sistemas, ciberseguridad gestionada, software, consultoría técnica, horas internas de implantación, formación, demostradores, acompañamiento regulatorio, estandarización y FP Dual adaptada al taller.

## 0.7. CONCLUSIÓN EJECUTIVA

El metal español tiene base, pero necesita densidad. La etapa de digitalización administrativa está ampliamente recorrida; la ventaja competitiva se decidirá en la integración de sistemas, planta, datos, personas y sostenibilidad. La transformación no debe medirse por el número de soluciones instaladas, sino por su efecto en productividad, calidad, servicio, seguridad, eficiencia energética, trazabilidad y resiliencia.

La prioridad para los próximos años es pasar de una digitalización funcional y fragmentada a una digitalización dirigida, integrada y gobernada. Para las PYMES, el objetivo no es saltar directamente a tecnologías de frontera, sino construir la siguiente capacidad necesaria. Para el sector en su conjunto, el reto es convertir la base digital existente en una ventaja industrial real antes de que la presión competitiva, energética y regulatoria ensanche las brechas actuales.

La competitividad futura dependerá de transformar datos en decisiones, decisiones en mejora operativa y mejora operativa en capacidad industrial sostenible. La tecnología está disponible; el desafío es gobernarla con método, liderazgo y sentido de negocio.

# 1. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO ESTRATÉGICO

El presente estudio nace en un momento de profunda transformación para la industria española del metal. Las fuerzas de cambio que la atraviesan son simultáneas, interdependientes y de diferente naturaleza: tecnológica, geopolítica, regulatoria y medioambiental. La digitalización (entendida no como una tendencia pasajera sino como el nuevo substrato de la competitividad industrial) se ha convertido en el principal eje sobre el que las empresas del sector deben articular su estrategia de futuro.

El sector del metal en España es un pilar estructural de la economía nacional. Con más de un millón de trabajadores, más de 220.000 empresas entre industria, comercio y servicios vinculados, y una aportación al PIB que supera el 6%, el metal no es un sector más: es la columna vertebral de la cadena de valor industrial española.

Sin su fortaleza, difícilmente pueden sostenerse sectores tructores como la automoción, la construcción, la energía, la defensa o la aeronáutica.

Sin embargo, este protagonismo histórico se enfrenta hoy a un conjunto de desafíos sin precedentes.

- La transición a una economía descarbonizada exige reconfigurar los procesos productivos más intensivos en energía y materias primas.
- La presión competitiva asiática, especialmente la sobrecapacidad siderúrgica china, erosiona los márgenes de los productores europeos.
- La digitalización avanza a ritmos desiguales, y la brecha entre las grandes empresas y las PYMES que conforman el 99% del tejido empresarial del metal amenaza con convertirse en una fractura estructural.
- Y, en el plano regulatorio, la aceleración legislativa de la Unión Europea introduce nuevas obligaciones y, al mismo tiempo, nuevas oportunidades.

Este capítulo introductorio tiene por objeto ofrecer el marco de referencia integral en el que se inscribe el estudio. Para ello, se articulan cinco grandes bloques de análisis: el contexto macroeconómico y estratégico del sector, la evolución histórica de los paradigmas industriales desde la primera revolución hasta la Industria 5.0, el proceso europeo de reindustrialización y soberanía industrial, el rol del sector metal en el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), y, finalmente, la definición de los objetivos y el alcance del propio estudio.

## 1.1. CONTEXTO MACROECONÓMICO Y ESTRATÉGICO DEL SECTOR DEL METAL

La industria del metal constituye el núcleo duro de la economía productiva española. Su relevancia no se circunscribe únicamente a las magnitudes macroeconómicas que genera empleo, valor añadido, exportaciones, sino también a su función articuladora del tejido industrial en su conjunto. Ningún análisis riguroso sobre la transformación digital de la industria española puede prescindir de una caracterización precisa de este sector, de sus fortalezas, de sus vulnerabilidades y de los vectores de cambio que lo atraviesan.

### 1.1.1. El peso del metal en la economía española

Según los datos más recientes publicados por CONFEMETAL y el Instituto Nacional de Estadística (INE), el sector del metal, entendido en su acepción amplia, que incluye industria, comercio y servicios vinculados, aporta el **6,2% del Producto Interior Bruto (PIB) español**. Esta cifra lo convierte en el subsector manufacturero con mayor peso específico en la economía nacional, por delante de sectores como la química, la alimentación o el textil.

Figura 1.0: Datos del sector metal en España



Para situar esta magnitud en perspectiva, conviene recordar que la industria manufacturera en su conjunto representa el 11,8% del Valor Añadido Bruto (VAB) total de España en 2024, mientras que el sector industrial en sentido amplio, incluyendo energía, alcanza el 16% del PIB. El metal, por tanto, concentra más de la mitad del peso de toda la industria manufacturera española.

Figura 1.1: Datos de empresas por número de trabajadores (CONFEMETAL 2025)

TRAMO TRABAJADORES EN CCC	Suma de NUM_CCC's
1 Trabajador	63.312,00
De 2 a 5 Trabajadores	86.420,00
De 6 a 50 Trabajadores	63.030,00
De 51 a 100 Trabajadores	3.356,00
De 101 a 500 Trabajadores	2.331,00
Mas de 500 Trabajadores	223,00
<b>Suma total</b>	<b>218.672,00</b>

CLASIFICACIÓN DE EMPRESAS SEGÚN NÚMERO DE TRABAJADORES (PARÁMETROS ESPAÑOLES*)			
MICROEMPRESA (1-9 trabajadores)	EMPRESA PEQUEÑA (10-49 trabajadores)	EMPRESA MEDIANA (50-249 trabajadores)	EMPRESA GRANDE (250 o más trabajadores)
<b>149.732</b> (68,45% del total)	<b>63.030</b> (28,80% del total)	<b>5.687</b> (2,60% del total)	<b>223</b> (0,10% del total)

\* Definición conforme a la Recomendación 2003/361/CE de la Comisión Europea y su transposición a la normativa española.

NOTA: CCC se refiere al código de cuenta de cotización reflejado en el informe. Es un identificador asignado por la Tesorería General de la Seguridad Social a cada cuenta de cotización de una empresa. Se utiliza para gestionar las altas, bajas y cotizaciones de los trabajadores.

El empleo es la magnitud que mejor refleja el impacto social del sector. De acuerdo con la Encuesta de Población Activa (EPA) del INE y los datos de afiliación a la Seguridad Social actualizados a 2025, el sector del metal ocupa a **1.155.100 trabajadores** (promedio anual), lo que representa un incremento interanual del 6% y consolida una tendencia de crecimiento sostenido del empleo iniciada en 2021. El número de afiliados a la Seguridad Social directamente vinculados a la industria del metal asciende a 826.061 personas (promedio 2025), con un crecimiento del 1,6% respecto al año anterior.

Estas cifras cobran mayor relevancia si se considera que el sector ha mantenido su capacidad de generación de empleo incluso en un contexto de desaceleración de la producción industrial. El Índice de Producción Industrial del Metal (IPIMET) registró caídas moderadas tanto en 2024 (-0,2%) como en los primeros meses de 2025 (-0,1%), lo que revela una cierta divergencia entre la dinámica del empleo que se mantiene y crece y la dinámica de la producción que atraviesa un período de debilidad estructural.

### 1.1.2. Estructura empresarial y subsectores

El tejido empresarial del sector industrial del metal comprende **55.592 empresas** registradas bajo los códigos CNAE 24 al 30 y 33 (industria manufacturera del metal), según las últimas estadísticas estructurales publicadas por el INE. Si se amplía el universo de análisis para incluir los servicios de comercialización y los servicios técnicos especializados vinculados al metal, el ecosistema supera las 220.000 empresas.

Una característica estructural de enorme relevancia estratégica es la **atomización del tejido empresarial**: las PYMES representan el 99,2% del total de empresas del sector metal. Esta predominancia de las pequeñas y medianas empresas determina, en gran medida, la velocidad y profundidad de la adopción tecnológica, las capacidades de inversión en I+D+i, el acceso a financiación y la exposición a los riesgos de la transformación digital.

Los grandes subsectores del metal en España, con sus principales magnitudes para el período 2023-2024, son los siguientes:

Figura 1.2: Principales subsectores del metal en España (datos 2023-2024).

Subsector (CNAE)	Facturación (M€)	N.º Empresas (aprox.)	Características clave
Automoción (CNAE 29)	76.855 M€	~3.200 empresas	• Principal subsector por facturación; producción 2024: 2,37 millones de vehículos (-3%)
Fabricación de productos metálicos (CNAE 25)	48.161 M€	~31.150 empresas	• Mayor número de empresas; muy atomizado; incluye estructuras, depósitos, herrería
Metalurgia (CNAE 24)	34.966 M€	~1.200 empresas	• Siderurgia, fundición y producción de metales no ferrosos; producción acero 2024: 11,9 Mt
Maquinaria y equipo (CNAE 28)	27.766 M€	~5.570 empresas	• Alta exportabilidad; traccionado por sectores energético y agroalimentario
Equipo eléctrico (CNAE 27)	23.737 M€	~1.790 empresas	• Crecimiento impulsado por la electrificación y la transición energética
Vehículos / otro material transporte (CNAE 30)	8.651 M€	~900 empresas	• Ferrovionario, aeronáutico y naval; alta cualificación tecnológica
Reparación e instalación de maquinaria (CNAE 33)	5.874 M€	~11.600 empresas	• Mantenimiento industrial; creciente en el contexto de economía circular

<b>FACTURACIÓN TOTAL APROX.</b> ~225.200 M€ Suma aproximada de los subsectores	<b>N.º TOTAL DE EMPRESAS APROX.</b> ~55.400 Suma aproximada de empresas del sector	<b>MEJOR PESO EN FACTURACIÓN</b> Automoción ~34% del total aprox.	<b>MEJOR NÚMERO DE EMPRESAS</b> Fabricación de productos metálicos ~54% del total aprox.
--	--	---	--

Fuentes: INE – Estadística Estructural de Empresas; CONFEMETAL – Metal en Cifras 2025; ANFAC – Informe Anual 2024; UNESID 2024.

La **siderurgia española** merece una mención específica. Con una producción de acero que alcanzó los 11,9 millones de toneladas en 2024, un incremento del 3,7% respecto al año anterior, España se consolida como el quinto productor de acero de la Unión Europea. Esta capacidad productiva se sustenta en un parque de hornos de arco eléctrico (EAF) que posicionan a la siderurgia española como una de las más eficientes energéticamente del continente, al tiempo que establece las bases para la producción de acero verde mediante el uso de hidrógeno renovable y la maximización del reciclaje de chatarra.

### 1.1.3. Exportaciones e integración en la economía europea

El sector del metal es un actor decisivo en el comercio exterior español. Los productos metálicos, la maquinaria, el material eléctrico y los vehículos representan las partidas de mayor valor en la cesta exportadora de España. Sin embargo, los datos de 2025 muestran una tendencia preocupante: las exportaciones del sector metal registraron un retroceso del **-1,5%**, mientras que las importaciones, especialmente de bienes de equipo y material eléctrico, crecieron de forma significativa, lo que situó el déficit comercial del metal en **-34.943 millones de euros**, un incremento del 68,4% respecto al período anterior.

Este deterioro del saldo comercial refleja una paradoja estructural del sector: España es un productor relevante de materiales y piezas metálicas semielaboradas, pero importa maquinaria de alta tecnología, componentes electrónicos y bienes de equipo sofisticados en cantidades crecientes. La solución a esta asimetría de aumentar la producción nacional de componentes y maquinaria de mayor valor añadido pasa, inevitablemente, por la modernización tecnológica y la digitalización del aparato productivo.

En el contexto europeo, España ocupa la **cuarta posición en valor añadido industrial** de la UE, tras Alemania, Francia e Italia. Esta posición la convierte en un actor industrial de primer orden, aunque la distancia con las economías líderes, especialmente Alemania, es notable en términos de intensidad tecnológica, inversión en I+D y productividad por trabajador. La inversión en activos intangibles en el sector industrial español se sitúa en el 10,6% del valor añadido, frente al 20% de media en la UE, lo que constituye uno de los principales cuellos de botella para la convergencia competitiva.

### 1.1.4. Principales retos estratégicos del sector

El sector del metal en España afronta un conjunto de retos estratégicos que interactúan entre sí y cuya gestión simultánea exige una transformación de calado en los modelos de negocio, las capacidades organizativas y los procesos productivos.

### 1.1.5. La transición energética y el mecanismo CBAM

Los costes energéticos constituyen uno de los factores de competitividad más sensibles para la industria del metal, especialmente en subsectores como la siderurgia, la fundición y el tratamiento de superficies. Aunque los precios de la electricidad han moderado su volatilidad extrema respecto al pico de 2022, siguen siendo significativamente superiores a los de economías competidoras fuera de la UE. La implantación progresiva del Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono (**CBAM**) a partir de 2026 introduce un nuevo elemento de incertidumbre: si bien busca proteger a la industria europea frente a importaciones de países con menor exigencia climática, también genera tensiones en las cadenas de suministro de materias primas y puede encarecer ciertos insumos estratégicos.

### 1.1.6. La competencia asiática y la sobrecapacidad global

China mantiene una capacidad instalada de producción de acero que supera ampliamente su demanda interna, lo que genera presiones deflacionistas crónicas sobre los precios internacionales del acero y obliga a los productores europeos a competir en segmentos de mayor valor añadido. La aceleración de la industria manufacturera china en sectores como el vehículo eléctrico, los componentes electrónicos y la maquinaria genera además una competencia directa con exportadores españoles del metal en mercados terceros. Esta presión competitiva exige a las empresas españolas una diferenciación basada en calidad, precisión, servicio y customización, atributos que dependen directamente del nivel de madurez tecnológica y digital.

### 1.1.7. La digitalización como imperativo competitivo

El VIII Informe Smart Industry 4.0 (2025) señala que el 60% de las empresas industriales españolas ha iniciado algún proceso de digitalización, pero solo el 20,8% puede considerarse en una fase avanzada de transformación digital.

En el sector del metal, esta proporción es aún inferior en el segmento de las PYMES, donde la falta de personal especializado, los costes de inversión y la complejidad de integración de los sistemas heredados (legacy) son las principales barreras. La brecha digital entre grandes empresas y PYMES no es solo una cuestión de eficiencia productiva: es un factor determinante de acceso a clientes, mercados y financiación.

#### NOTA DE CONTEXTO

El concepto de “sector del metal” utilizado en este estudio adopta la definición amplia de CONFEMETAL, que incluye la industria manufacturera metálica (CNAE 24-30, 33), así como las actividades comerciales y de servicios técnicos directamente vinculadas. Cuando se precisa, se distingue entre “industria del metal” (sentido estricto) y “sector del metal” (sentido amplio).

## 1.2. EVOLUCIÓN DE LOS PARADIGMAS INDUSTRIALES: DE LA INDUSTRIA 1.0 A LA INDUSTRIA 5.0

La historia de la industria es la historia de la superación de límites: los límites de la fuerza humana, los límites de la escala, los límites de la información y, ahora, los límites de la sostenibilidad y la inclusión. Cada salto cualitativo en la organización de la producción industrial ha tenido implicaciones profundas no solo en los procesos fabriles, sino en la estructura económica, el empleo, las relaciones laborales y el modelo de sociedad. Comprender esta trayectoria es imprescindible para contextualizar adecuadamente el momento actual en el que se encuentra el sector del metal y el tipo de transformación que exige la digitalización avanzada.

### 1.2.1. Las cuatro revoluciones industriales y el origen de la quinta

La periodización de las revoluciones industriales no es un ejercicio meramente académico: define el vocabulario conceptual con el que las empresas, los gobiernos y las organizaciones sectoriales interpretan los cambios tecnológicos y elaboran sus estrategias. En la actualidad, el paradigma dominante en los debates de política industrial europea es el de la Industria 5.0, formulado explícitamente por la Comisión Europea en 2021, aunque muchas empresas del metal español aún se encuentran transitando, o apenas iniciando, el camino de la Industria 4.0.

- **Industria 1.0 – La mecanización.** La primera revolución industrial nació en Gran Bretaña con la introducción de la máquina de vapor y la mecanización de los procesos de producción textil y metalúrgica. Desde 1784, la energía hidráulica y el carbón sustituyeron progresivamente al trabajo manual y animal. En el sector del metal, este período marcó el inicio de la producción a escala de hierro fundido y forjado, con la aparición de los primeros altos hornos modernos. La siderurgia de Bilbao, por ejemplo, tiene sus raíces en este período, con el aprovechamiento de los yacimientos de mineral de hierro vizcaíno desde mediados del siglo XIX.
- **Industria 2.0 – La producción en masa y la electrificación.** La segunda revolución industrial, a partir de 1870, introdujo la electricidad como fuente energética industrial, la organización científica del trabajo (taylorismo y fordismo) y la producción en masa mediante líneas de ensamblaje. En el sector del metal, este período fue transformador: el convertidor Bessemer (1856), seguido del proceso Thomas y el horno Siemens-Martin, permitieron por primera vez la producción masiva de acero de calidad a bajo coste, transformando la construcción, la ingeniería y el transporte a escala mundial. La siderurgia española experimentó su primera gran expansión industrial en este período, con la consolidación del País Vasco y Asturias como polos siderúrgicos de referencia.

- Industria 3.0 – La automatización y la electrónica.** La tercera revolución industrial trajo consigo la electrónica, la informática y los primeros sistemas de automatización industrial. El Controlador Lógico Programable (PLC), introducido en 1969, permitió automatizar procesos secuenciales sin necesidad de reprogramar hardware. Los centros de mecanizado de control numérico (CNC) y los primeros robots industriales transformaron la fabricación de piezas metálicas, reduciendo la dependencia del operario especializado para tareas de alta precisión. En el sector del metal, la Industria 3.0 supuso la aparición de la “fábrica automatizada”: eficiente en volumen, pero poco flexible y con sistemas de información fragmentados.
- Industria 4.0 – Los sistemas ciberfísicos y la fábrica inteligente.** El término “Industrie 4.0” fue acuñado en Alemania en la Feria de Hannover de 2011 como concepto estratégico para la modernización de la industria manufacturera germana. La cuarta revolución industrial se caracteriza por la interconexión total de los elementos del proceso productivo: máquinas, sensores, sistemas de gestión, trabajadores y clientes a través de redes digitales, habilitando la toma de decisiones en tiempo real basada en datos. A diferencia de la Industria 3.0, donde la automatización operaba sobre procesos discretos y aislados, la Industria 4.0 propone la integración horizontal (entre departamentos y empresas a lo largo de la cadena de valor) y vertical (desde el nivel de máquina hasta los sistemas de gestión empresarial), creando lo que se denomina el “sistema ciberfísico de producción” (CPPS). Es la industria conectada.
- Industria 5.0 – La convergencia entre tecnología, sostenibilidad y factor humano.** En enero de 2021, la Dirección General de Investigación e Innovación de la Comisión Europea publicó el documento fundacional “*Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*”, definiendo un nuevo paradigma que trasciende los objetivos de eficiencia productiva de la Industria 4.0 para incorporar tres dimensiones esenciales: la centralidad del ser humano, la sostenibilidad dentro de los límites planetarios y la resiliencia de los sistemas productivos.

Figura 1.3: Resumen de las cinco revoluciones industriales.



### 1.2.2. La Industria 4.0 y sus tecnologías habilitadoras en el sector metal.

La Industria 4.0 no es una tecnología singular, sino un ecosistema de tecnologías complementarias que, al integrarse, generan capacidades cualitativamente distintas de las que ofrece cada una por separado. Para el sector del metal, la relevancia de cada una de estas tecnologías habilitadoras varía según el subsector, el tamaño empresarial y el nivel de madurez digital de partida.

A continuación, se describen las principales con algunas posibles aplicaciones específicas en el sector del metal:

**Figura 1.4: Tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 y sus aplicaciones en el sector metal**

TECNOLOGÍAS HABILITADORAS EN LA INDUSTRIA DEL METAL		
Ocho tecnologías clave que impulsan la digitalización, la eficiencia y la competitividad del sector metal.		
Tecnología habilitadora	Descripción	Aplicación específica en el metal
1  Internet de las Cosas Industrial (IIoT)	Conexión en red de máquinas, sensores y actuadores para la captura y transmisión de datos en tiempo real.	✓ Monitorización de hornos de fusión, prensas y líneas de tratamiento de superficies; control de calidad en proceso.
2  Inteligencia Artificial y Big Data	Algoritmos de aprendizaje automático aplicados al análisis masivo de datos industriales.	✓ Mantenimiento predictivo de equipos, optimización de parámetros de sisección, control de defectos por visión artificial.
3  Robótica avanzada y cobótica	Robots con capacidades de percepción, adaptación y colaboración con operarios humanos.	✓ Soldadura automatizada, manipulación de piezas pesadas, logística interna mediante AGVs.
4  Manufactura aditiva (impresión 3D metálica)	Producción de piezas metálicas capa a capa mediante fusión de polvo metálico o deposición de material.	✓ Prototipado rápido, fabricación de útiles y matrices, piezas de reposición de bajo volumen y alta complejidad.
5  Gemelo digital (Digital Twin)	Réplica virtual y dinámica de activos físicos o procesos, sincronizada en tiempo real con el sistema real.	✓ Simulación de procesos de conformado, optimización de parámetros de laminación, planificación de mantenimiento.
6  Cloud industrial e informática de borde (Edge)	Procesamiento de datos en servidores remotos (cloud) o en la periferia del proceso (edge), con alta disponibilidad.	✓ Gestión de datos de producción, ERPs y MES en la nube, análisis en tiempo real sin latencia en edge.
7  Ciberseguridad industrial (OT Security)	Protección de redes de tecnología operacional (OT) frente a ataques e intrusiones.	✓ Segmentación de redes IIoT, protección de sistemas SCADA, cumplimiento de la Directiva NIS2.
8  Realidad aumentada y mixta (AR/MR)	Superposición de información digital sobre el entorno físico mediante dispositivos wearables o pantallas.	✓ Guía visual al operario en tareas de montaje y mantenimiento, formación técnica inmersiva, asistencia remota.

Fuente: elaboración propia a partir de datos del VIII Informe Smart Industry 4.0 (2025) y documentación técnica de CONFEMETAL y EUROFER.

La interconexión de estas tecnologías da lugar a lo que se denomina la “**fábrica inteligente**” o *smart factory* (en España *Industria Conectada*): un entorno productivo en el que los datos fluyen de forma continua y bidireccional entre el mundo físico (máquinas, materiales, personas) y el mundo digital (sistemas de planificación, análisis y decisión), generando una capacidad de auto optimización que las fábricas de generaciones anteriores no podían alcanzar.

Para el sector del metal, esta convergencia tecnológica tiene implicaciones prácticas muy concretas. En la siderurgia, los gemelos digitales y los algoritmos de IA permiten optimizar en tiempo real los parámetros de colada continua, reduciendo el consumo energético y la tasa de defectos. En la fabricación de productos metálicos, el IIoT y el análisis predictivo reducen las paradas no planificadas y alargan la vida útil de los equipos. En la maquinaria y el equipo eléctrico, la conectividad de los productos vendidos genera nuevos modelos de negocio basados en servicios postventa digitales (*servitización*).

### 1.2.3. La Industria 5.0: el paradigma europeo emergente

El concepto de **Industria 5.0** introduce un cambio fundamental de perspectiva respecto a la Industria 4.0. Mientras esta última se centró en la eficiencia, la productividad y la automatización y la interoperabilidad para alcanzar la industria conectada como objetivos centrales, la Industria 5.0, tal y como la define la Comisión Europea, reajusta el propósito de la industria en relación con tres grandes objetivos sociales y medioambientales.

#### 1.2.4. La dimensión humano-céntrica

La Industria 5.0 no postula la sustitución del trabajador por la máquina, sino la colaboración enriquecedora entre ambos. El objetivo es que la tecnología se adapte a las capacidades, necesidades y bienestar de los trabajadores, y no al revés. En la práctica, esto se traduce en el diseño de entornos de trabajo más seguros y ergonómicos mediante el uso de exoesqueletos y cobots; en la personalización de las interfaces hombre-máquina para operarios con distintos niveles de cualificación; y en la preservación del conocimiento tácito de los trabajadores expertos a través de sistemas de captura y transmisión del saber hacer. En el sector del metal, donde el envejecimiento de la plantilla y la escasez de talento técnico son preocupaciones crecientes, esta dimensión adquiere una relevancia estratégica particular.

#### 1.2.5. La dimensión sostenible

La Industria 5.0 exige que los sistemas de producción operen dentro de los límites planetarios definidos por la ciencia del clima y la ecología. Para el sector del metal, esto implica tres grandes vectores de transformación:

- la **descarbonización** de los procesos productivos (especialmente en siderurgia y fundición, grandes emisores de CO<sub>2</sub>).
- la adopción del modelo de **economía circular** (maximizando el reciclaje, minimizando los residuos y extendiendo la vida útil de los productos),
- y la **eficiencia energética** (reduciendo el consumo de energía por unidad producida mediante digitalización y optimización de procesos).

España recicló 9,4 millones de toneladas de acero en 2024. Prácticamente el 80% de su producción siderúrgica proviene de chatarra reciclada en hornos de arco eléctrico, lo que la posiciona entre los líderes europeos en circularidad del metal. Sin embargo, la descarbonización de los procesos siderúrgicos basados en altos hornos y coque, presentes aún en algunas instalaciones de la Península, requiere inversiones masivas en tecnologías de reducción directa con hidrógeno verde (DRI-H<sub>2</sub>) que superan las capacidades de financiación individual de la mayoría de operadores.

#### 1.2.6. La dimensión resiliente

La pandemia de COVID-19 (2020) y la invasión rusa de Ucrania (2022) o la guerra en Irán con el bloqueo del Estrecho de Ormuz (2026) ponen en evidencia la fragilidad de las cadenas de suministro industriales globales. La Industria 5.0 incorpora la resiliencia como atributo sistémico fundamental: la capacidad de los sistemas productivos para anticipar perturbaciones, adaptarse a ellas y recuperarse con rapidez. Para el sector del metal, la resiliencia implica la diversificación de proveedores, la digitalización de las cadenas de suministro, la constitución de reservas estratégicas de materias primas críticas y la flexibilización de los procesos productivos mediante tecnologías de fabricación avanzada.

### POSICIONAMIENTO CONCEPTUAL.

En el contexto de este estudio, utilizamos los términos “Industria 4.0” e “Industria 5.0” no como etapas cronológicas secuenciales, sino como marcos conceptuales que coexisten y se superponen en la realidad empresarial. La gran mayoría de las empresas del metal español se encuentra en la transición hacia la Industria 4.0, mientras que los principios de la Industria 5.0 impactan ya en las políticas europeas de I+D y los programas de inversión pública. El estudio analiza el estado de madurez digital desde esta perspectiva integrada.

### 1.2.7. Estado de adopción de la Industria 4.0 en el sector metal español

La fotografía de la digitalización industrial en España, según el *VIII Informe Smart Industry 4.0 (2025)*, muestra un sector que ha avanzado significativamente en la concienciación y en los primeros pasos de la transformación digital, pero que todavía se encuentra lejos de alcanzar los niveles de madurez de las economías industriales más avanzadas de Europa.

Los datos más relevantes de este diagnóstico son los siguientes:

- El **60% de las empresas industriales** españolas ha iniciado algún proceso de digitalización.
- Sin embargo, solo el **20,8% se encuentra en una fase avanzada** de transformación digital.
- Las tecnologías con mayor grado de implantación son la computación en la nube industrial (cloud), los sistemas ERP y MES, y la robótica de segunda generación.
- Las tecnologías con menor penetración, pero mayor potencial transformador, son la inteligencia artificial aplicada a producción, los gemelos digitales y la fabricación aditiva metálica.
- La brecha digital entre grandes empresas y PYMES es pronunciada: mientras las empresas de más de 250 empleados alcanzan niveles de madurez digital medio-alto, las empresas de menos de 50 empleados se encuentran mayoritariamente en las etapas iniciales.

Esta realidad tiene implicaciones directas para la competitividad del sector. En un entorno en el que los competidores internacionales, especialmente los fabricantes alemanes, italianos y surcoreanos, han avanzado de forma más decisiva en la digitalización de sus procesos, las empresas españolas del metal que no aceleren su transformación digital corren el riesgo de perder posiciones en segmentos de mercado donde la calidad, la precisión y la personalización del producto dependen directamente del nivel tecnológico de la planta de producción.

## 1.3. REINDUSTRIALIZACIÓN, AUTONOMÍA ESTRATÉGICA Y SOBERANÍA INDUSTRIAL EN EUROPA

El debate sobre la reindustrialización de Europa no es nuevo, pero ha adquirido una urgencia y una profundidad sin precedentes en los últimos años. La combinación de tres grandes perturbaciones sistémicas: la pandemia de COVID-19, la guerra de Ucrania, el actual conflicto en Oriente Medio con la guerra en Irán y el bloqueo de Ormuz y la aceleración de la rivalidad tecnológica entre Estados Unidos y China ha hecho evidente la vulnerabilidad estructural de la base industrial europea y ha impulsado un giro estratégico de calado en la política industrial comunitaria y de los Estados miembros.

Para el sector del metal, este giro tiene consecuencias directas y de gran alcance: desde la regulación de las importaciones de acero y aluminio mediante el mecanismo CBAM, hasta la definición de proyectos industriales estratégicos para el suministro de materias primas críticas, pasando por la movilización de fondos públicos sin precedentes para la modernización y descarbonización de la industria.

### 1.3.1. El mandato europeo de reindustrialización.

La política industrial de la Unión Europea ha pasado, en menos de una década, de un modelo centrado en la apertura de mercados y la liberalización competitiva a un modelo de **política industrial activa** que asume sin complejos la intervención pública en favor de la industria estratégica. Este cambio de paradigma tiene su origen más próximo en el Informe Draghi y Letta compartido por las instituciones europeas de que el proceso de desindustrialización experimentado por Europa desde los años 1990 supone una amenaza para la cohesión económica, la seguridad estratégica y la capacidad de alcanzar los objetivos del Pacto Verde Europeo.

El objetivo cuantitativo que durante años articuló el discurso europeo de reindustrialización, alcanzar el **20% del PIB industrial** para 2020, fijado en la Comunicación de la Comisión de 2014, no se alcanzó: la media de la UE se situó en el 14,3% en 2024. Lejos de abandonar la ambición, la Comisión Europea

elevó el objetivo: la propuesta de la **Industrial Accelerator Act (IAA)**, presentada el 4 de marzo de 2026 (COM(2026) 100 final), establece un nuevo objetivo vinculante del **20% del PIB para 2035**.

El recorrido histórico de la estrategia industrial europea en la última década puede resumirse en tres grandes hitos:

1. **Estrategia Industrial Europea de 2020 (COM(2020) 102)**: La primera gran actualización de la política industrial de la UE bajo la presidencia Von der Leyen, centrada en la “doble transición” verde y digital. Introdujo el concepto de ecosistemas industriales y reconoció por primera vez la necesidad de una política industrial activa a nivel comunitario.
2. **Actualización de la Estrategia Industrial de 2021 (COM(2021) 350)**: Publicada en mayo de 2021, en plena recuperación post-pandémica. Identificó 137 dependencias estratégicas en sectores críticos, materias primas, semiconductores, salud, energía y propuso medidas para reducir vulnerabilidades en las cadenas de suministro. Para el sector del metal, esta actualización fue especialmente significativa, al constatar la dependencia de la UE respecto a China y Rusia en minerales estratégicos y semielaborados metálicos.
3. **Industrial Accelerator Act de 2026**: La iniciativa legislativa más ambiciosa hasta la fecha, que introduce permisos industriales acelerados (máximo 27 meses), criterios de “Made in EU” en contratación pública para acero, aluminio y cemento, y nuevos instrumentos financieros para apoyar la inversión industrial estratégica.

### 1.3.2. Autonomía estratégica abierta y cadenas de valor críticas

El concepto de “**autonomía estratégica abierta**” acuñado por la propia Comisión Europea define el equilibrio al que aspira la UE: la capacidad de actuar de forma autónoma en áreas críticas (energía, salud, tecnología digital, defensa, materias primas) sin renunciar a los beneficios de la apertura comercial e internacional. No se trata de proteccionismo clásico, sino de garantizar que la UE no sea vulnerable a coerciones o disrupciones en sectores estratégicos.

Para el sector del metal, la autonomía estratégica se articula en torno a dos grandes ejes:

- el suministro de **materias primas críticas**
- y el desarrollo de capacidades de producción en segmentos de **tecnología intensiva**.

### 1.3.3. El Critical Raw Materials Act (CRMA) y el sector metal

El Reglamento (UE) 2024/1252, conocido como **Critical Raw Materials Act (CRMA)**, establece un marco jurídico vinculante para garantizar el suministro seguro y sostenible de materias primas críticas para la UE. Sus objetivos para 2030 son ambiciosos: que el 10% de las materias primas críticas consumidas por la UE se extraigan en territorio comunitario, que el 40% se procesen dentro de la UE y que el **25% provengan del reciclaje** (incrementado desde el 15% inicial).

Para el sector del metal español, el CRMA tiene implicaciones tanto en la demanda como en la oferta. En el lado de la demanda, garantiza el acceso a materiales como litio, magnesio, cobalto y tierras raras necesarios para la producción de vehículos eléctricos, aerogeneradores y equipos digitales todos ellos vectores de crecimiento del metal de alto valor añadido. En el lado de la oferta, abre oportunidades para proyectos nacionales de extracción y reciclaje de metales: el proyecto *CirCular* de Atlantic Copper en Huelva (para recuperación de metales no férricos) y el proyecto *Bidasoa Metal 78* en Zumárraga (para metales preciosos) son ejemplos de iniciativas estratégicas españolas catalogadas bajo el paraguas del CRMA.

### 1.3.4. El Net Zero Industry Act (NZIA) y la cadena de valor del metal verde

El **Net Zero Industry Act (NZIA)** establece el objetivo de que el 40% de las tecnologías de cero emisiones netas necesarias para la transición energética se fabriquen dentro de la UE para 2030. Este objetivo tiene una proyección directa sobre el sector metal, dado que la fabricación de aerogeneradores, módulos fotovoltaicos, sistemas de almacenamiento energético, bombas de calor y vehículos eléctricos requiere cantidades significativas de acero especializado, aluminio, cobre y otros metales. La NZIA, al impulsar la

localización de esta producción en Europa, genera una demanda creciente de materiales metálicos de alta calidad producidos localmente.

### 1.3.5. El impacto de la guerra de Ucrania y la guerra en Irán y el bloqueo de Ormuz en la industria del metal europea

La invasión rusa de Ucrania en febrero de 2022 provocó una perturbación sin precedentes en las cadenas de suministro de la industria del metal europea. La UE dependía de Ucrania y Rusia para el suministro de arrabio, semielaborados de acero (palanquilla y desbaste), gas natural industrial y diversas aleaciones estratégicas. El cierre repentino de estos flujos obligó a los productores europeos a diversificar urgentemente sus fuentes de aprovisionamiento hacia Brasil, India y Estados Unidos, con un impacto directo en los costes y los plazos de suministro.

El consumo aparente de acero en la UE cayó un **-8% en 2022** y un **-6% en 2023**, como consecuencia de la combinación de la contracción de la demanda industrial, el incremento de los costes energéticos y la incertidumbre estratégica. En España, el impacto fue relativamente menor gracias a la menor dependencia del gas ruso (España fue pionera en la diversificación del suministro de gas natural licuado) y a la fortaleza de la demanda interna en sectores como la construcción y la automoción en 2022.

El conflicto ucraniano aceleró el debate sobre el **reshoring y nearshoring** industrial en Europa. Aunque los datos disponibles muestran que la tendencia de relocalización industrial sigue siendo moderada (solo el 12-13% de las empresas manufactureras europeas declararon en 2025 haber trasladado o planear trasladar capacidades productivas de vuelta a Europa), la dirección del vector es inequívoca: la búsqueda de cadenas de suministro más cortas, más controlables y menos expuestas a riesgos geopolíticos es ya un criterio estratégico explícito en las decisiones de localización de la inversión industrial.

La escalada de tensión geopolítica en Oriente Medio y el riesgo de interrupción parcial o total del tráfico marítimo en el estrecho de Ormuz han añadido un nuevo factor de vulnerabilidad para la industria europea del metal y, en general, para el conjunto de la industria intensiva en energía. El estrecho de Ormuz constituye uno de los principales corredores energéticos del mundo, canalizando aproximadamente una quinta parte del comercio global de petróleo y una parte muy relevante del gas natural licuado (GNL). Cualquier amenaza sobre su operatividad genera inmediatamente volatilidad en los mercados energéticos internacionales, incrementando los costes del gas y de la electricidad para la industria europea. En sectores como la siderurgia, la fundición o la transformación metálica, altamente dependientes del consumo energético, estas tensiones se traducen en una pérdida de competitividad, mayores costes de producción y dificultades adicionales para mantener márgenes operativos estables.

Además del impacto energético, la crisis en la región refuerza la percepción de fragilidad estructural de las cadenas globales de suministro y acelera la revisión estratégica de la autonomía industrial europea. El aumento del coste de los fletes marítimos, los retrasos logísticos y la incertidumbre sobre el suministro de materias primas críticas están impulsando una mayor diversificación geográfica de proveedores y un creciente interés por estrategias de resiliencia industrial, almacenamiento estratégico y regionalización de determinadas capacidades productivas. En este contexto, conceptos como soberanía industrial, resiliencia estratégica y seguridad de suministro han dejado de ser debates exclusivamente políticos para convertirse en variables centrales en la planificación industrial y tecnológica de las empresas del metal europeas.

### 1.3.6. España como polo de reindustrialización en el sur de Europa

España ocupa una posición geográfica, energética e industrial que la convierte en un candidato privilegiado para ser un polo de reindustrialización en el sur de Europa. Esta posición estratégica se apoya en varios pilares:

- **Liderazgo en hidrógeno verde:** España concentra el 20% de los proyectos de producción de hidrógeno verde de la UE, impulsados por su extraordinario potencial de energía solar y eólica. El corredor de hidrógeno H2Med (BarMar), que conectará la Península Ibérica con Francia y el resto de Europa, reforzará este liderazgo. Para el sector siderúrgico, el hidrógeno verde es la tecnología clave para la descarbonización: la planta de reducción directa de hierro (DRI) que ArcelorMittal ha planteado desarrollar en Gijón y el proyecto *Hydnum Steel* en Puertollano son las apuestas más avanzadas de España en esta dirección.

- **Masa crítica industrial:** Con su cuarta posición en VAB industrial de la UE, España dispone de una base productiva diversificada y con capacidad de arrastre sobre proveedores y clientes en la cadena de valor.
- **Marco regulatorio en construcción:** La *Ley de Industria y Autonomía Estratégica*, aprobada por el Gobierno en diciembre de 2024 (aunque todavía en proceso parlamentario a fecha de abril de 2026), sienta las bases jurídicas para la creación de la Reserva Estratégica de Capacidades Nacionales de Producción Industrial (RECAPI), un instrumento pensado específicamente para proteger y movilizar capacidades productivas en sectores estratégicos como el metal.
- **Estrategia de Política Industrial España 2030:** Integrada en el Componente 12 del PRTR, con una dotación de 8.356 millones de euros, esta estrategia establece los objetivos de modernización productiva, digitalización y sostenibilidad para la industria española en el horizonte 2030.

## 1.4. EL PAPEL DEL SECTOR METAL EN EL PLAN DE RECUPERACIÓN, TRANSFORMACIÓN Y RESILIENCIA

El Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR) de España representa el mayor programa de inversión pública en modernización económica de la historia reciente del país. Dotado con los fondos del Mecanismo de Recuperación y Resiliencia (MRR) del programa europeo Next Generation EU, el PRTR ha supuesto una oportunidad singular para acelerar la transformación digital, ecológica y competitiva de la industria del metal española. Comprender su arquitectura, sus mecanismos de acceso y su estado de ejecución es imprescindible para contextualizar las posibilidades y también las frustraciones del proceso de digitalización del sector.

### 1.4.1. Arquitectura general del PRTR

Tras la Adenda de 2023, el PRTR de España moviliza un total de **163.000 millones de euros**, distribuidos en aproximadamente 80.000 millones en transferencias a fondo perdido y 83.000 millones en préstamos del MRR. Este volumen de financiación se estructura en torno a **10 políticas palanca y 31 componentes, articulados** sobre cuatro ejes transversales: transición ecológica, transformación digital, cohesión social y territorial, e igualdad de género.

El PRTR no es un fondo de subvenciones directas a empresas, sino un plan de reforma estructural del Estado y de su capacidad de movilizar inversión privada a través de instrumentos financieros, incentivos fiscales y reformas regulatorias. Esta característica explica, en parte, la complejidad de su acceso para las PYMES del sector metal y el desfase entre los fondos movilizados por la Administración y los fondos efectivamente recibidos por las empresas finales.

### 1.4.2. Componentes y programas clave para el sector meta

#### Componente 7: Despliegue de energías renovables

El **Componente 7** es relevante para el sector metal en su condición de fabricante de componentes para la transición energética. Las inversiones en generación renovable (solar fotovoltaica, eólica terrestre y marina, almacenamiento) generan una demanda creciente de estructuras metálicas, torres, cables, chasis, recipientes a presión y sistemas de fijación que los fabricantes españoles del metal pueden y deben capturar.

#### Componente 12: Política Industrial España 2030

El **Componente 12 del PRTR** es el que tiene mayor relevancia directa para el sector del metal, con una dotación de **8.356,5 millones de euros**. Sus objetivos son la modernización del tejido industrial, el aumento de la productividad, la descarbonización de los procesos industriales y la digitalización de la cadena de valor. Los principales instrumentos de este componente incluyen los Proyectos Estratégicos para la Recuperación y Transformación Económica (PERTEs) y el reforzamiento de los programas de financiación industrial como REINDUS/FAIIP.

## El Fondo de Apoyo a la Inversión Industrial Productiva (FAIIP)

El programa REINDUS, histórico instrumento de financiación pública a la inversión industrial productiva, ha evolucionado hacia el **Fondo de Apoyo a la Inversión Industrial Productiva (FAIIP)**, gestionado por SEPIDES (Sociedad Estatal de Participaciones Industriales). Las condiciones vigentes en 2025 ofrecen préstamos de entre 0,2 y 60 millones de euros, con plazo de hasta 10 años, carencia de 3 años y tipos de interés desde el 3,25%, condiciones netamente ventajosas respecto al mercado de crédito comercial. El FAIIP es accesible para empresas de los CNAE 10-32, lo que incluye la totalidad de los subsectores del metal industrial.

### Programa Activa Industria 4.0

El Programa Activa Industria 4.0 ofrece diagnósticos y acompañamiento en especie (valorados en 7.400 euros por empresa) para orientar a las PYMES industriales en su proceso de transformación digital. Este programa, que ha recibido fondos del PRTR ha llegado a miles de empresas del sector metal a lo largo del territorio nacional.

#### 1.4.3. PERTEs y proyectos estratégicos con impacto en el metal

Los Proyectos Estratégicos para la Recuperación y Transformación Económica (PERTEs) son el instrumento estrella del PRTR para la modernización de cadenas de valor industriales completas. Su diseño busca articular la cooperación entre grandes empresas tractoras, PYMES proveedoras y centros de I+D en proyectos de transformación de alto impacto. Varios PERTEs tienen una conexión directa y relevante con el sector del metal:

**Figura 1.5: PERTEs con impacto relevante en el sector del metal español (datos a 2025)**

**LOS PERTE Y SU IMPACTO EN LA INDUSTRIA DEL METAL**  
 Los Proyectos Estratégicos para la Recuperación y Transformación Económica (PERTE) movilizan inversiones clave para modernizar el tejido industrial español y generar demanda de productos y soluciones metálicas en sectores estratégicos.

PERTE	Dotación	Relevancia para el sector metal
 <b>PERTE VEC</b> (Vehículo Eléctrico)	<b>-4.250 M€</b> (4 convocatorias acumuladas)	<ol style="list-style-type: none"> <li>Movilita la cadena de valor del vehículo eléctrico, que incluye fabricantes de componentes de estampación, conformado, masticaría, forja y fundición (Gestamp, Bellmont, Borgwarner, Basquevoit).</li> </ol>
 <b>PERTE ERHA</b> (Energías Renovables e Hidrógeno)	<b>-16.000 M€</b> (palanca total)	<ol style="list-style-type: none"> <li>Inversiones en fabricación de electrolizadores, torres eólicas, estructuras fotovoltaicas y sistemas de almacenamiento; demanda directa de acero especializado y aluminio.</li> </ol>
 <b>PERTE Chip</b>	<b>-12.250 M€</b> (palanca total)	<ol style="list-style-type: none"> <li>Refuerzo de la cadena de valor de semiconductores y electrónica; demanda de equipamiento metálico de precisión y salas limpias.</li> </ol>
 <b>PERTE Aeroespacial</b>	<b>4.533 M€</b> (2021-2025)	<ol style="list-style-type: none"> <li>Fabricación de componentes estructurales y de propulsión; tecnologías de manufactura aditiva metálica y titanio.</li> </ol>
 <b>PERTE Agroalimentario</b>	<b>-1.000 M€</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Modernización de maquinaria agrícola y de procesamiento de alimentos; impulso a fabricantes de equipo industrial del metal.</li> </ol>
 <b>PERTE Descarbonización Industrial</b>	<b>-3.100 M€</b> (palanca total)	<ol style="list-style-type: none"> <li>Transformación de procesos industriales intensivos en energía; eficiencia energética, electrificación de procesos, captura de CO<sub>2</sub> e hidrógeno renovable; demanda de equipos, calderías, tuberías, válvulas y soluciones metálicas avanzadas.</li> </ol>

Fuentes: Ministerio de Industria y Turismo; SEPIDES.

#### 1.4.4. Horizon Europe y la Clean Steel Partnership

En el ámbito europeo, el programa **Horizon Europe** (2021-2027) incluye la **Clean Steel Partnership**, una asociación público-privada dotada de hasta 350 millones de euros para la investigación y demostración de tecnologías de producción de acero con bajas o nulas emisiones de carbono, con especial foco en la sustitución del coque por hidrógeno verde y en la electrificación de los hornos de arco eléctrico. La participación española en esta asociación, a través de empresas como UNESID, ArcelorMittal y los centros tecnológicos del sector, es un elemento de la estrategia de liderazgo en acero verde.

El programa **Made in Europe Partnership** (anteriormente *Factories of the Future*), también en el marco de Horizon Europe, financia proyectos de investigación en fabricación avanzada, digitalización industrial y procesos de fabricación sostenible que benefician directamente a fabricantes de equipo y maquinaria del metal.

#### 1.4.5. Estado de ejecución del PRTR y retos de absorción para el sector metal

A octubre de 2025, España había recibido **cinco pagos parciales** del Mecanismo de Recuperación y Resiliencia por un total de **71.366 millones de euros**, de los 163.000 millones totales asignados al país. El número de hitos y objetivos cumplidos se sitúa en 264 de los 601 previstos para el total del plan, lo que representa menos del 50% de avance en el cumplimiento de las condiciones.

Estos datos globales, sin embargo, no reflejan adecuadamente la percepción del sector empresarial. Tanto CONFEMETAL como la CEOE han advertido, en sus respectivos informes de seguimiento, de que **la ejecución real en términos de fondos llegados efectivamente a las empresas no supera el 30%** del total comprometido. El *VII Informe de Seguimiento de Fondos de la CEOE* (julio de 2025) cifra en 51.355 millones de euros los fondos resueltos a junio de 2025, pero señala que “resuelto” no equivale a “recibido”: la cadena de tramitación, verificación y pago puede añadir meses o incluso años al proceso.

*“La complejidad normativa, la exigencia documental y los plazos de resolución de las convocatorias del PRTR están generando una barrera de entrada que afecta especialmente a las pequeñas y medianas empresas del metal, que carecen de los recursos administrativos para gestionar estas ayudas de forma eficiente.”*

- Boletín de CONFEMETAL, octubre de 2025

Esta tensión entre la magnitud del esfuerzo presupuestario comprometido y la velocidad de llegada de los fondos a las empresas es uno de los factores que explican la heterogeneidad del avance en la digitalización del sector metal. Las empresas con mayor capacidad para navegar la burocracia administrativa, generalmente las grandes empresas o las que cuentan con asesores especializados, han logrado capturar recursos del PRTR para sus proyectos de transformación digital. Las PYMES, en cambio, se han visto más limitadas para acceder a estas fuentes de financiación pública, perpetuando la brecha digital que el PRTR pretendía precisamente reducir.

A este desafío se suma la presión del plazo límite de agosto de 2026 para comprometer los préstamos pendientes del MRR, lo que introduce urgencia en la resolución de las convocatorias abiertas y puede generar tensiones adicionales en los procesos de adjudicación y verificación.

#### IMPLICACIÓN PARA EL ESTUDIO

El análisis del estado de digitalización del sector metal que se presenta en este estudio debe leerse en el contexto de los recursos del PRTR: una parte del avance observado en las empresas del sector está directamente vinculado a la captación de ayudas del PRTR, mientras que otra parte refleja la inversión privada autónoma. La distinción entre ambas fuentes de avance tiene implicaciones para la sostenibilidad futura del proceso de digitalización, una vez que los fondos extraordinarios del MRR se agoten.

## 1.5. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL ESTUDIO

Los capítulos precedentes han trazado el mapa del territorio en el que se inscribe este estudio: un sector del metal de gran peso macroeconómico, sometido a presiones de transformación tecnológica, regulatoria y competitiva de alta intensidad, y ante una oportunidad histórica de modernización impulsada por los fondos europeos del PRTR. En este contexto, el presente estudio tiene un propósito claro y una delimitación precisa que es necesario explicitar.

### 1.5.1. Propósito y motivación del estudio

Este estudio ha sido promovido por CONFEMETAL (Confederación Española de Organizaciones Empresariales del Metal) en el marco de su misión de servicio a las empresas y trabajadores del sector. Su propósito central es ofrecer un **diagnóstico riguroso, actualizado y accionable del estado de digitalización de la industria española del metal**, que sirva como base para la toma de decisiones estratégicas por parte de las empresas, las organizaciones sectoriales y las administraciones públicas.

La motivación que subyace a este trabajo es doble. Por un lado, la constatación de que la digitalización es ya un factor determinante de competitividad y supervivencia para las empresas del sector, y que el grado de avance en esta transformación es muy desigual entre empresas, subsectores y territorios. Por otro lado, la necesidad de dotar al sector de una visión compartida, basada en evidencia, sobre los retos y oportunidades de la transformación digital, que permita orientar los esfuerzos colectivos de formación, inversión, colaboración y representación en la dirección correcta.

El estudio se produce además en un momento especialmente propicio: con los fondos del PRTR aún disponibles, con una agenda regulatoria europea que premia la modernización industrial y con un mercado laboral que demanda perfiles técnicos digitales con urgencia creciente.

### 1.5.2. Objetivos específicos

El estudio persigue los siguientes objetivos específicos, ordenados de lo descriptivo a lo prescriptivo:

- **Mapear el estado actual de digitalización** del sector del metal en España, con desagregación por subsector, tamaño empresarial y territorio, identificando el nivel de madurez digital del conjunto del sector y sus segmentos.
- **Caracterizar la adopción tecnológica** en sus distintas dimensiones: tecnologías de gestión empresarial (ERP, CRM, MES), tecnologías de producción (automatización, robótica, manufactura aditiva), tecnologías de datos (IIoT, big data, IA) y tecnologías emergentes (gemelos digitales, realidad aumentada, computación cuántica).
- **Identificar las brechas y barreras** que impiden o ralentizan la digitalización del sector, distinguiendo entre barreras tecnológicas (falta de infraestructura, sistemas legacy), económicas (coste de inversión, acceso a financiación) y organizativas (resistencia al cambio, falta de talento digital, cultura corporativa).
- **Analizar el factor humano y el talento digital** en la transformación del sector, incluyendo las necesidades formativas, las competencias digitales demandadas y los modelos de gestión del cambio más eficaces en entornos industriales del metal.
- **Integrar la dimensión de sostenibilidad** en el análisis de la digitalización, explorando las sinergias entre transformación digital y eficiencia energética, economía circular y descarbonización industrial.
- **Documentar buenas prácticas y casos de éxito** de digitalización en empresas del sector metal español, que sirvan de referencia y fuente de inspiración para otras empresas del sector.
- **Proponer un roadmap de transformación digital** del sector para el período 2025-2030, con recomendaciones específicas para empresas, organizaciones sectoriales y administraciones públicas.

### 1.5.3. Alcance y delimitación del estudio

#### Alcance sectorial.

El estudio se centra en la **industria del metal en sentido estricto** (CNAE 24-30 y 33), que comprende los subsectores de metalurgia, fabricación de productos metálicos, fabricación de maquinaria y equipo, material eléctrico, automoción, otro material de transporte y reparación e instalación de maquinaria. Cuando los datos disponibles lo permiten, se ofrece desagregación por subsector. Las actividades de comercialización y servicios auxiliares del metal que forman parte del “sector del metal” en sentido amplio de CONFEMETAL se mencionan en el análisis de contexto, pero no constituyen el objeto principal de la investigación sobre digitalización.

#### Alcance geográfico.

El estudio tiene un alcance nacional, con cobertura del conjunto del territorio español. Cuando los datos estadísticos disponibles permiten análisis territorial, se identifican diferencias entre comunidades autónomas. Las referencias al contexto europeo son de encuadre estratégico, no objeto de análisis detallado propio.

#### Alcance temporal.

El estudio recoge el estado de digitalización del sector en el bienio 2024-2025 y proyecta recomendaciones para el horizonte 2026-2030. Los datos de contexto macroeconómico y estructural cubren el período 2020-2025, con especial énfasis en los años más recientes. Las proyecciones de futuro se articulan en torno al año 2030 como horizonte de referencia de los principales marcos estratégicos europeos y nacionales.

### 1.5.4. Metodología de referencia

El estudio combina análisis cuantitativo (basado en fuentes estadísticas secundarias (INE, Eurostat, CONFEMETAL, Ministerio de Industria y en trabajo de campo propio) con análisis cualitativo derivado de entrevistas en profundidad con directivos del sector, focus group y análisis de casos empresariales.

El **Modelo multidimensional de análisis de madurez digital** desarrollado específicamente para este estudio por CTIC Centro Tecnológico permite evaluar el nivel de digitalización de las empresas en múltiples dimensiones: estrategia digital, procesos productivos, gestión empresarial, datos y conectividad, talento y cultura, y sostenibilidad. La descripción detallada de la metodología se presenta en el Capítulo 2 del estudio.

### 1.5.5. Estructura del documento

El estudio se organiza en doce capítulos que avanzan desde el marco contextual hasta las recomendaciones operativas:

#### Estructura del estudio sobre digitalización en la industria española del metal.

1. Introducción	Marco macroeconómico y estratégico, paradigmas industriales, reindustrialización europea, PRTR y objetivos del estudio continuidad operativa.
2. Metodología	Enfoque metodológico, fases del proyecto, fuentes de información, trabajo de campo y modelo de madurez digital
3. Caracterización de la muestra	Perfil de empresas participantes, distribución territorial, tamaño, subsectores y nivel inicial de digitalización
4. Contexto tecnológico	Tecnologías de gestión y operación, producción avanzada, conectividad, tecnologías emergentes y tendencias relevantes
5. Resultados del estudio	Madurez digital del sector, digitalización de procesos y gestión, integración de datos, automatización e IA
6. Brechas y retos	Brecha digital por tamaño y subsector, barreras tecnológicas, económicas y organizativas

<b>7. Talento y factor humano</b>	Nuevas competencias digitales, gestión del cambio, formación y cualificación, cultura y liderazgo digital
<b>8. Sostenibilidad y eficiencia energética</b>	Digitalización y sostenibilidad productiva, eficiencia energética, economía circular, integración de objetivos
<b>9. Buenas prácticas</b>	Casos empresariales de digitalización, tecnologías aplicadas, factores de éxito y lecciones aprendidas
<b>10. Tendencias futuras</b>	Industria 5.0, IA industrial, nuevas arquitecturas digitales, convergencia digital-sostenibilidad-resiliencia
<b>11. Roadmap 2026-2030</b>	Principios estratégicos, prioridades tecnológicas y organizativas, recomendaciones para empresas y administraciones
<b>12. Conclusiones</b>	Diagnóstico global, principales retos y oportunidades, claves estratégicas para la competitividad futura

El presente capítulo ha establecido el marco contextual y estratégico necesario para comprender la posición de partida del sector del metal español en su proceso de transformación digital. Los capítulos siguientes profundizarán progresivamente en el diagnóstico empírico, los hallazgos del trabajo de campo y las propuestas de acción.

#### NOTA SOBRE LA ACTUALIZACIÓN DE DATOS

El contexto macroeconómico y estratégico del sector del metal es dinámico y está sujeto a cambios en los marcos regulatorios europeos, en las condiciones de los mercados internacionales de materiales y en la evolución del PRTR. Los datos presentados en este capítulo corresponden, salvo indicación expresa, a los disponibles a cierre de 2025 y primer trimestre de 2026. En un sector con la velocidad de cambio del metal en la actualidad, la vigilancia continua de estas variables es parte inherente de cualquier estrategia de transformación.

## 2. METODOLOGÍA Y MARCO DE REFERENCIA

El presente capítulo detalla exhaustivamente la arquitectura metodológica y el marco de referencia analítico que sustentan el *estudio sobre el estado de digitalización en la industria española del metal*. La transformación digital en el entorno industrial contemporáneo constituye un fenómeno multidimensional que trasciende la mera adquisición de activos tecnológicos. Por consiguiente, su medición y evaluación exigen un diseño metodológico robusto, capaz de capturar no solo la presencia binaria de herramientas digitales, sino también la profundidad de su integración, el grado de madurez organizativa y el impacto real en los procesos productivos y de gestión.

Para responder a esta complejidad, el estudio ha sido diseñado bajo un enfoque mixto que combina el rigor estadístico de la investigación cuantitativa con la profundidad interpretativa del análisis cualitativo. Este capítulo desglosa, de manera secuencial y detallada, el enfoque metodológico adoptado (Sección 2.1), las fases cronológicas y operativas del proyecto (Sección 2.2), las fuentes de información primarias y secundarias consultadas (Sección 2.3), el diseño técnico del trabajo de campo y la muestra (Sección 2.4), y, finalmente, la formulación matemática y conceptual del modelo multidimensional de análisis de madurez digital (Sección 2.5), el cual constituye el núcleo analítico de esta investigación.

### 2.1. ENFOQUE METODOLÓGICO DEL ESTUDIO

El enfoque metodológico de esta investigación se fundamenta en la premisa de que la digitalización industrial no puede evaluarse exclusivamente a través de inventarios tecnológicos. Como señala el marco conceptual del estudio, el objetivo principal es ir “más allá de la mera existencia de tecnología” para capturar el grado de integración y la capacidad organizativa real de las empresas para convertir la inversión tecnológica en resultados tangibles y ventajas competitivas sostenibles.

Para lograr este propósito, se ha adoptado un enfoque metodológico mixto (cuantitativo-cualitativo). La literatura académica en investigación industrial respalda ampliamente el uso de métodos mixtos (triangulación metodológica) para el estudio de fenómenos complejos como la adopción tecnológica, ya que permite compensar las limitaciones inherentes a los cuestionarios autoadministrados mediante la validación contextual y el juicio de expertos.

#### 2.1.1. Componente Cuantitativo

El componente cuantitativo constituye la base empírica y estadística del diagnóstico. Se ha estructurado en torno a la recopilación sistemática de datos primarios a través de un cuestionario estructurado y homogéneo, aplicado a una muestra representativa a nivel nacional. Este enfoque permite:

- **Análisis estadístico descriptivo e inferencial:** Procesamiento de las respuestas de 318 empresas del sector metal-mecánico, permitiendo la generalización de resultados con márgenes de error controlados.
- **Comparativa estandarizada:** La homogeneidad del instrumento de recogida de datos garantiza que los indicadores sean estrictamente comparables entre diferentes tamaños de empresa (micro, pequeñas, medianas y grandes), subsectores de actividad (CNAE) y territorios (provincias).
- **Construcción de índices sintéticos:** La cuantificación de variables permite la agregación matemática de datos en un Índice Sintético de Madurez Digital, facilitando la clasificación y segmentación del tejido empresarial.

#### 2.1.2. Componente Cualitativo

El componente cualitativo actúa como mecanismo de validación, profundización y contextualización de los hallazgos estadísticos. En un sector caracterizado por un alto peso de activos físicos tradicionales y una complejidad inherente en la integración OT/IT (Tecnología de Operaciones / Tecnología de la Información), los datos numéricos requieren una interpretación experta. Este componente incluye:

- **Interpretación contextual de patrones:** Análisis de las razones subyacentes a las tasas de adopción observadas, evitando lecturas simplistas (por ejemplo, asumir que la mera tenencia de una licencia de software ERP equivale a una digitalización completa de la gestión).
- **Análisis de barreras específicas:** Identificación de cuellos de botella operativos, culturales y financieros que no siempre afloran en las encuestas cerradas, tales como la tensión en el mercado laboral técnico-digital o la dependencia de proveedores externos.
- **Identificación de mejores prácticas (Best Practices):** Documentación profunda de casos de éxito reales y replicables, evaluando las necesidades previas de implantación y las dificultades superadas.
- **Desarrollo de recomendaciones accionables:** Formulación de una hoja de ruta estratégica adaptada a las tipologías empresariales identificadas, garantizando que las propuestas sean pragmáticas y ejecutables.

#### ENFOQUE INTEGRADOR MULTINIVEL:

La metodología combina tres niveles de análisis para cada tecnología evaluada:

1. **Adopción:** Medición binaria (presencia/ausencia) de tecnologías fundamentales.
2. **Intensidad:** Evaluación mediante escalas de percepción (1 a 9) sobre la profundidad de uso.
3. **Integración:** Análisis cruzado de variables para determinar si las tecnologías operan como “islas” o si existe un flujo de datos continuo (hilo digital).

## 2.2. FASES DEL PROYECTO

Para garantizar el rigor analítico, la trazabilidad de los datos y la coherencia en la formulación de conclusiones, el diseño metodológico del proyecto se ha estructurado en tres fases secuenciales e interrelacionadas. Este proceso ha sido liderado conjuntamente por CONFEMETAL y CTIC Centro Tecnológico, aportando este último su experiencia acumulada de más de 20 años en procesos de transformación digital, Industria 4.0 y desarrollo de proyectos de I+D+i.

### 2.2.1. Fase 1: Recogida y sistematización de información

El objetivo de esta fase inicial fue construir una base sólida, coherente y representativa de información cualitativa y cuantitativa para describir el estado actual de la digitalización en el sector. Esta fase se nutrió de tres vías de acción principales:

- **Diseño y lanzamiento del cuestionario homogéneo:** Se elaboró un instrumento de medición estructurado, diseñado para capturar tanto variables de contexto como indicadores de adopción tecnológica e intensidad de uso.
- **Diagnóstico profundo de empresas representativas:**
  - En distintos proyectos elaborados en los últimos años por CTIC Centro Tecnológico se desarrollaron consultorías especializadas a más de 300 empresas del sector metal en distintos proyectos cuyos resultados, de forma agregada se han puesto a disposición para este estudio
  - Dentro del marco de este proyecto concreto desde CTIC Centro Tecnológico llevó a cabo la evaluación directa y el diagnóstico in situ de 12 empresas seleccionadas por las federaciones territoriales. Este análisis comparativo y confidencial permitió identificar oportunidades reales y validar el método de evaluación.

- **Análisis del estado del arte y tendencias tecnológicas:** Se realizó una revisión exhaustiva de las tendencias tecnológicas globales (Industria 4.0, Industria 5.0, Inteligencia Artificial, Computación Cuántica) y su aplicabilidad específica al sector metal, aprovechando el conocimiento acumulado por CTIC en programas como *Activa Industria 4.0*, *Kit Consulting*, *Gijón Transforma Digital*, *Boletines de vigilancia tecnológica para la EOI Escuela de Negocios*, *Programa Soy Digital en Castilla la Mancha*, *Plan Industria 4.0 de Castilla y León*, *Servicio Industria 4.0 IGAPE (Galicia)*, *Centro de Excelencia e innovación de Oviedo (Asturias)*, *Programa TIC de Cámara España*, *la Red de Centros SAT (Asturias)* y *la red de Oficinas Acelera PYME*.

El análisis exhaustivo comprende 318 empresas de toda España con conocimiento profundo de sus procesos y estado de digitalización actual.

### 2.2.2. Fase 2: Análisis, validación e identificación de necesidades

Una vez consolidada la base de datos empírica, la segunda fase se centró en el procesamiento analítico y la validación cualitativa de los resultados, con el fin de avanzar hacia una visión compartida sobre la transformación digital del sector.

- **Análisis cuantitativo y clasificación:** Los datos recopilados fueron sometidos a procesos de limpieza, normalización y validación de consistencia. Posteriormente, se procedió a la clasificación de la muestra por tamaño empresarial y subsector (CNAE), y a la construcción de los índices sintéticos de madurez.
- **Evaluación comparativa y detección de brechas (gap analysis):** Se realizó un análisis integral para identificar patrones de adopción y carencias estructurales, prestando especial atención a la brecha digital existente entre las microempresas y las grandes corporaciones, así como a las asimetrías entre la digitalización administrativa (IT) y la operativa (OT).
- **Focus groups y validación experta:** Para contrastar los resultados estadísticos, se organizaron sesiones de trabajo (Focus Group) con la participación de las federaciones territoriales de CONFEMETAL, representantes empresariales y expertos del ecosistema industrial. Estas sesiones fueron fundamentales para validar las barreras identificadas y definir las prioridades estratégicas desde una perspectiva realista y pegada al terreno.

### 2.2.3. Fase 3: Síntesis de conclusiones y elaboración del informe final

La fase final del proyecto tuvo como propósito consolidar los hallazgos en un documento estratégico que sirva como herramienta para la toma de decisiones y el diseño de políticas industriales.

- **Interpretación de resultados y segmentación:** A partir del Índice sintético, se segmentó a las empresas en cuatro tipologías operativas de madurez digital (Rezago estructural, Transición, Avanzada y Líder), definiendo perfiles de necesidades específicas para cada grupo.
- **Desarrollo de la hoja de ruta (Roadmap) estratégica:** Se diseñó una cartera de proyectos tipo y un cronograma de actuación a 24 meses, dividido en cuatro oleadas (asegurar cimientos, integrar y medir, automatizar con datos, escalar y diferenciar), proporcionando recomendaciones accionables y métricas de seguimiento.
- **Presentación de resultados:** Elaboración del informe final y presentación de los resultados clave a los asociados de CONFEMETAL y a las instituciones pertinentes.

## 2.3. FUENTES DE INFORMACIÓN UTILIZADAS

La fiabilidad y validez de un estudio sectorial de esta envergadura dependen intrínsecamente de la calidad y diversidad de las fuentes de información consultadas. Para garantizar una visión holística y precisa, la investigación se ha sustentado en una combinación rigurosa de fuentes primarias (generadas *ad hoc* para este estudio) y fuentes secundarias (datos estadísticos oficiales, marcos regulatorios y literatura técnica). Hay una descripción detallada de fuentes bibliográficas en el anexo de este estudio.

### 2.3.1. Fuentes de información primarias

Las fuentes primarias constituyen el núcleo empírico del diagnóstico, aportando datos inéditos y específicos sobre la realidad operativa de las empresas del metal en España durante el periodo de estudio (2025-2026):

- **Encuesta nacional de digitalización del sector metal:** Base de datos principal conformada por las respuestas estructuradas del sector metal-mecánico, distribuidas a lo largo de 44 provincias españolas. Esta fuente proporciona los datos cuantitativos sobre adopción tecnológica, intensidad de uso y percepción de madurez.
- **Auditorías y diagnósticos in-situ (CTIC):** Información cualitativa y técnica de alto valor extraída de la evaluación directa de **12 empresas representativas** del sector identificadas por CONFEMETAL más todas las más de 300 consultorías realizadas por CTIC Centro Tecnológico en los años anteriores a empresas del sector. Estas visitas permitieron documentar el Anexo de “Buenas prácticas detectadas”, analizando la viabilidad de réplica, las necesidades previas y las dificultades de implantación en entornos reales.
- El total de empresas diagnosticadas / asesoradas por CTIC de las que obtenemos datos reales para este estudio es de **318 empresas**.
- **Paneles de expertos y focus groups:** Insights estratégicos, validación de hipótesis y priorización de retos obtenidos a través de las sesiones de trabajo colaborativo con directivos del sector, técnicos de CTIC y representantes de las federaciones territoriales de CONFEMETAL.

### 2.3.2. Fuentes de información secundarias

Para contextualizar los hallazgos primarios, dimensionar el sector y alinear las recomendaciones con las macro tendencias y normativas vigentes, se ha recurrido a un corpus exhaustivo de fuentes secundarias de máxima solvencia: las macro tendencias y normativas vigentes, se ha recurrido a un corpus exhaustivo de fuentes secundarias de máxima solvencia:

- **Fuentes Estadísticas Oficiales:**
  - *Instituto Nacional de Estadística (INE):* Datos de la Encuesta de Población Activa (EPA), Índice de Producción Industrial (IPIMET) y la Estadística Estructural de Empresas: Sector Industrial (EEESI), fundamentales para definir el peso macroeconómico del sector (6,2% del PIB) y su estructura atomizada (99,2% PYMES).
  - *Eurostat:* Estadísticas de producción industrial de la Unión Europea, utilizadas para el benchmarking internacional y la evaluación de la posición de España como cuarta potencia industrial de la UE.
- **Informes Sectoriales e Institucionales:**
  - *Informes CONFEMETAL:* Documentación interna, como el informe “Metal en Cifras”, para el seguimiento de exportaciones, importaciones y afiliación a la Seguridad Social.
  - *VIII Informe Smart Industry 4.0 (2025):* Elaborado por el Observatorio de Industria y Tecnología, utilizado como marco de referencia sobre el estado general de la industria española (donde se señala que solo el 20,8% está en fase avanzada).
  - *Informes EUROFER:* Perspectivas del mercado del acero y el impacto de factores geopolíticos y energéticos en la siderurgia europea.

- **Marcos Regulatorios y Estratégicos (Unión Europea y España):**

- Documentación de la Comisión Europea relativa a la Industria 5.0 (2021), el Critical Raw Materials Act (CRMA), el Net Zero Industry Act (NZIA) y la propuesta de la Industrial Accelerator Act (IAA) de 2026.
- Documentación oficial del Gobierno de España sobre el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), específicamente el Componente 12 (Política Industrial España 2030) y los PERTEs vinculados al sector (VEC, ERHA, Chip, etc.).
- Véase anexo de todas las fuentes utilizadas para el desarrollo de este documento.

### 2.3.3. Diseño del instrumento de recogida (Cuestionario)

El cuestionario fue diseñado con un enfoque multinivel para evitar el sesgo de la “adopción superficial”. Se estructuró en los siguientes bloques de medición:

1. **Variables de contexto:** Provincia de ubicación, código CNAE principal y tamaño empresarial (número de empleados).
2. **Adopción de tecnologías de base y gestión (variables binarias):** Preguntas de respuesta dicotómica (Sí/No) para evaluar la presencia o ausencia de tecnologías fundamentales como facturación electrónica, Cloud computing, ERP (Enterprise Resource Planning), CRM (Customer Relationship Management), Business Intelligence (BI) y medidas de Ciberseguridad avanzada.
3. **Adopción de tecnologías de frontera (variables binarias):** Evaluación de la presencia de Inteligencia Artificial aplicada al negocio, IA generativa, Agentes de IA autónomos, visión artificial y sistemas de mantenimiento predictivo.
4. **Escalas de percepción e implantación (variables en escala 1-9):** Para medir la intensidad y profundidad de la integración tecnológica en los procesos operativos, se utilizó una escala de 1 (incipiente/nulo) a 9 (avanzado/integración total). Las áreas evaluadas bajo esta escala incluyen:
  - Integración de Internet de las Cosas (IoT) en producción.
  - Nivel de robótica y automatización.
  - Uso de Big Data en entornos de producción.
  - Trazabilidad digital en la cadena de suministro.
  - Perfil tecnológico y competencias digitales de la plantilla.
  - Orientación y transformación hacia los principios de la Industria 5.0.

Nota metodológica. Los datos obtenidos por formulario son declaraciones de las empresas no contrastadas por ningún consultor.

### 2.3.4. Criterios de anonimización y protección de datos

Dada la sensibilidad estratégica de la información tecnológica y operativa recopilada, el diseño del trabajo de campo incorporó estrictos protocolos de protección de datos empresariales, alineados con las normativas vigentes:

- **Desidentificación directa:** La base de datos analítica no incluye nombres comerciales, números de identificación fiscal (NIF), dominios web ni identificadores personales directos.
- **Agregación de resultados:** Todos los resultados se presentan de forma agregada.

### 2.3.5. Calidad del dato y normalización

Para garantizar la fiabilidad de los análisis estadísticos y la comparabilidad entre empresas, las respuestas en bruto fueron sometidas a un riguroso proceso de limpieza y normalización (Fases 1 y 2):

- **Comprobaciones de consistencia:** Validación cruzada de datos para detectar tipologías de respuesta inválidas o contradictorias, y tratamiento estadístico de valores vacíos.
- **Estandarización:** Unificación de nomenclaturas (ej. nombres de provincias) y corrección de categorías de tamaño según las definiciones oficiales de la UE.
- **Conversión de escalas numéricas:** Como paso previo a la construcción del índice sintético, las variables medidas en escala 1-9 fueron normalizadas matemáticamente a una escala de 0 a 1.

#### LIMITACIONES METODOLÓGICAS DECLARADAS:

El estudio reconoce como limitación inherente que los datos se basan en la auto declaración de las empresas participantes no en la auditoría de las mismas. En consecuencia, algunas respuestas pueden reflejar percepciones subjetivas de la gerencia más que el estado de implantación técnica real. Por ello, el componente cualitativo y la recomendación de “validar con evidencias antes de invertir” son fundamentales en el marco de referencia del estudio.

## 2.4. MODELO MULTIDIMENSIONAL DE ANÁLISIS DE MADUREZ DIGITAL

El núcleo analítico de la metodología es el **modelo multidimensional de análisis de madurez digital**. Este modelo conceptual y matemático ha sido diseñado específicamente para este estudio, superando las limitaciones de los índices unidimensionales que miden únicamente el gasto en TI. El modelo evalúa la transformación digital a través de siete dimensiones clave y sintetiza los resultados en un índice global de madurez.

### 2.4.1. Las siete dimensiones de la transformación digital industrial

El marco de referencia evalúa a las empresas a través de siete áreas críticas que abarcan desde la estrategia corporativa hasta la operativa de planta y la sostenibilidad:

1. **Estrategia y liderazgo:** Evalúa la existencia de una visión digital formalizada, el gobierno de datos y la planificación estratégica. Mide si la digitalización está impulsada por un plan director o si es meramente reactiva.
2. **Organización y personas:** Analiza el factor humano, las competencias digitales de la plantilla, la existencia de roles híbridos (conocimiento de producción + gestión de datos) y las políticas de formación continua.
3. **Producción y automatización:** Dimensión central (OT) que mide la implantación de IoT industrial, la robotización, los sistemas ciberfísicos conectados y la explotación de datos de máquina para la mejora del OEE (Overall Equipment Effectiveness).
4. **Cadena de suministro:** Evalúa la trazabilidad digital de materiales y lotes, y el grado de integración de los sistemas de información con proveedores y operadores logísticos.
5. **Sistemas de información y datos:** Dimensión fundacional (IT) que analiza la arquitectura de datos, la implantación de ERP, herramientas de Business Intelligence (BI) y, de manera crítica, las políticas de ciberseguridad avanzada.

6. **Relación con clientes:** Mide la digitalización del ciclo comercial B2B, la implantación de CRM, la experiencia digital del cliente y la gestión del servicio posventa.
7. **Innovación y sostenibilidad:** Evalúa la orientación hacia los principios de la Industria 5.0, la I+D digital, la aplicación de tecnologías para la eficiencia energética y la economía circular.

### 2.4.2. Construcción del índice sintético global

Para clasificar a las empresas y permitir el benchmarking sectorial, las variables recogidas en el cuestionario se agrupan y ponderan matemáticamente para calcular el **índice sintético global de madurez digital**, expresado en una escala de 0 a 100 puntos.

El índice se compone de tres grandes bloques ponderados:

- **Base digital (Ponderación: 30%):** Mide los fundamentos tecnológicos esenciales. Incluye variables binarias como Facturación electrónica, Cloud computing, ERP, Presencia web y Presencia en redes sociales.
- **Gestión (Ponderación: 30%):** Evalúa la capacidad de la empresa para gestionar relaciones y explotar información. Incluye variables binarias como CRM, Business Intelligence (BI) y Ciberseguridad avanzada.
- **Capacidades avanzadas (Ponderación: 40%):** Mide la adopción de tecnologías de frontera y la profundidad de la integración operativa. Es el bloque con mayor peso, reflejando la importancia de la Industria 4.0. Incluye variables binarias (IA, IA generativa, Agentes de IA, Visión artificial, Mantenimiento predictivo) y variables de intensidad (escalas 1-9 en IoT, robótica, big data, trazabilidad y perfil tecnológico).

**Figura 2.1: Creación del índice sintético asignado a cada empresa en función de variables.**



### Proceso de normalización matemática.

Para integrar variables de diferente naturaleza en una única fórmula, se aplicó un proceso de normalización estricto:

- Las *variables binarias* (presencia/ausencia) asumen directamente los valores 0 o 1.
- Las *variables en escala de percepción (1 a 9)* se normalizan al rango 0-1 mediante la fórmula: (Valor obtenido - 1) / 8.

La fórmula final del índice se expresa como:  
 Índice Global (0-100) = [ (Puntuación Base Digital × 0.3) + (Puntuación Gestión × 0.3) + (Puntuación Capacidades Avanzadas × 0.4) ] × 100

### 2.4.3. Segmentación y tipologías operativas

El resultado del índice sintético (cuya media global en el estudio se situó en **50.4 puntos**) permite clasificar a las empresas de la muestra en cuatro segmentos o tipologías operativas. Esta segmentación es el pilar sobre el cual se construyen las recomendaciones y la hoja de ruta del informe, asumiendo que las estrategias de apoyo deben adaptarse de forma realista a las capacidades de cada segmento.

Figura 2.2: Niveles de madurez digital de las empresas participantes en el estudio



Como se observa en la distribución, la inmensa mayoría del tejido empresarial del metal (89.3%) se concentra en las fases de *Transición* y *Avanzada*. El modelo multidimensional demuestra así su capacidad discriminadora, evitando concentraciones artificiales en los extremos y proporcionando una radiografía precisa y accionable del estado real de la digitalización en la industria española del metal.

## 3. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA. DISEÑO DEL TRABAJO DE CAMPO

Este punto tiene como objetivo fundamental establecer el marco empírico sobre el cual se sustenta el diagnóstico del estado de digitalización en la industria española del metal. La validez, fiabilidad y representatividad de cualquier estudio sectorial dependen intrínsecamente de la calidad de la muestra analizada. Por consiguiente, se procede a desglosar de manera exhaustiva y sistemática el perfil de las organizaciones que han participado en este estudio, promovido por CONFEMETAL en colaboración con CTIC Centro Tecnológico.

El diseño analítico de la investigación se ha estructurado para capturar la heterogeneidad inherente al sector metal-mecánico español, un ecosistema caracterizado por una profunda atomización empresarial, una amplia diversidad de subsectores de actividad y una distribución territorial que refleja la historia industrial del país. A través de un enfoque metodológico mixto, que combina el rigor cuantitativo de la recolección de datos estructurados con la interpretación cualitativa derivada de la experiencia en consultoría tecnológica, se ha consolidado una base de información robusta.

El diseño del trabajo de campo es el componente crítico que asegura la representatividad, validez y fiabilidad de los datos cuantitativos recolectados. Esta sección detalla la composición de la muestra, la estructura del instrumento de medición, los protocolos de anonimización y los rigurosos procesos de control de calidad del dato aplicados.

### 3.1. PERFIL Y DISTRIBUCIÓN DE LA MUESTRA

El estudio se basa en una muestra nacional de 318 empresas pertenecientes a la industria metal-mecánica. La composición de la muestra refleja fielmente la estructura real del tejido empresarial español del sector metal, caracterizado por una profunda atomización y el predominio de las Pequeñas y Medianas Empresas (PYMES).

#### 3.1.1. Distribución por tamaño empresarial

El tamaño de la empresa ha sido identificado en este estudio como el *principal determinante de la madurez digital*. La muestra se distribuye de la siguiente manera, garantizando la representatividad de todos los estratos:

- **Microempresas (<10 empleados):** 64 empresas, representando el 20.1% de la muestra.
- **Pequeñas empresas (10-49 empleados):** 160 empresas, constituyendo el grupo mayoritario con el 50.4% de la muestra.
- **Medianas empresas (50-249 empleados):** 84 empresas, abarcando el 26.3% de la muestra.
- **Grandes empresas (>250 empleados):** 10 empresas, representando el 3.1% de la muestra.

En conjunto, las PYMES (micro, pequeñas y medianas) representan el 96.9% de la muestra analizada.

**Figura 3.1: Distribución porcentual de la muestra de 318 empresas según su tamaño (número de empleados)**



### 3.1.2. Implicaciones estructurales del tamaño en la digitalización

La concentración de la muestra en los segmentos de pequeña y mediana empresa (76.7% en conjunto) subraya la necesidad de que las políticas de digitalización y las hojas de ruta tecnológicas se diseñen con un enfoque pragmático y escalable. Las realidades operativas difieren drásticamente entre estratos:

- **Las Microempresas (20.1%):** Tienen características similares:
  - Se enfrentan a cuellos de botella críticos derivados de la limitación de tiempo y la ausencia de roles dedicados exclusivamente a la tecnología.
  - Su prioridad operativa no reside en la adopción de tecnologías de frontera, sino en consolidar una base operativa segura.
  - Los datos revelan que su adopción de sistemas ERP y Cloud se sitúa en un modesto 31.1%, mientras que la Inteligencia Artificial es prácticamente inexistente (4.4%).
  - El reto principal en este segmento es la supervivencia administrativa y la integración básica de la facturación con la contabilidad.
- **Las Pequeñas Empresas (50.4%):** Sus principales características comunes a este tipo de empresas son:
  - Representan a la mitad de la muestra, este segmento se encuentra en el punto de inflexión hacia la integración.
  - Han superado la digitalización básica pero se enfrentan a barreras operativas típicas como la desconexión entre la información comercial (CRM) y la planificación de la producción.

- Es común en este estrato la proliferación de “islas de información” y el uso excesivo de hojas de cálculo no integradas.
- Su oportunidad inmediata reside en la revisión y parametrización de los sistemas ERP que ya poseen parcialmente implantados.
- **Las Medianas Empresas (26.3%):** Más de una cuarta parte de las empresas analizadas están en este segmento con estas particularidades:
  - En este nivel, la complejidad de las operaciones exige una gobernanza de datos formalizada.
  - Con una adopción de ERP que salta al 86.4%, el desafío ya no es la captura del dato, sino su calidad y explotación.
  - La emergencia de roles específicos (propietarios de datos) y la necesidad de un plan director de ciberseguridad integral son características definitorias de este grupo.
  - Tienen el potencial de generar retornos inmediatos mediante la implementación de Business Intelligence (BI) combinada con trazabilidad avanzada.
- **Las Grandes Empresas (3.1%):** Hemos analizado pocas empresas de este segmento, pero podemos sacar en común algunas cosas:
  - Aunque minoritarias en número, actúan como líderes y proyectos tractores dentro de la cadena de valor.
  - Superan el 85% de adopción en tecnologías fundamentales (ERP, Cloud, BI)
  - Alcanzan un 57.1% en adopción de Inteligencia Artificial.
  - Su reto principal es la gestión de la complejidad en entornos multiplanta, la integración de sistemas heredados (legacy) y el establecimiento de arquitecturas de datos a escala corporativa (Data Lakes, Gemelos Digitales).

### 3.1.3. Distribución por subsector industrial (CNAE)

La diversidad de actividades dentro del metal exige una segmentación por subsectores para identificar matices y prioridades tecnológicas específicas. La muestra abarca las principales divisiones de la Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE) vinculadas al metal:

- **Fabricación de productos metálicos (CNAE 25):** 46.0% de la muestra, 146 empresas. Es el subsector más atomizado, incluyendo estructuras, calderería y mecanizado.
- **Maquinaria y equipo (CNAE 28):** 27.7% de la muestra, 88 empresas. Subsector con un perfil tecnológico orientado a la ingeniería y alta exportabilidad.
- **Metalurgia y primera transformación (CNAE 24):** 21.0% de la muestra, 67 empresas. Incluye siderurgia y fundición, caracterizado por procesos intensivos en energía.
- **Otros subsectores:** El porcentaje restante se distribuye entre Vehículos de motor (CNAE 29), Equipo eléctrico (CNAE 27), Otro material de transporte (CNAE 30) y Reparación e instalación (CNAE 33). Estamos hablando de 17 empresas.

Figura 3.2: Composición principal de la muestra según subsector de actividad (CNAE).



### 3.1.4. Análisis cualitativo por subsector

**Fabricación de productos metálicos (CNAE 25):** Siendo el subsector mayoritario (46.0%):

- Concentra el mayor volumen de PYMES.
- Incluye actividades muy diversas como la fabricación de estructuras metálicas, calderería, forja, estampación y tratamiento de superficies.
- Se caracteriza por procesos heterogéneos con alta personalización y producción bajo pedido.
- Su índice global de madurez digital se sitúa en 49.5 puntos.
- Los retos de digitalización en este subsector se centran en la ordenación del taller:
  - digitalización de la captura de tiempos,
  - trazabilidad por lotes,
  - control de calidad
  - y gestión de no conformidades.
- La mejora competitiva aquí suele provenir más de la estandarización de datos maestros (artículos, rutas, tiempos) que de la adopción de tecnologías de frontera.

**Maquinaria y equipo n.c.o.p. (CNAE 28):** Representando el 27.7% de la muestra.

- Este subsector exhibe un perfil tecnológico fuertemente orientado a la ingeniería.
- Lidera consistentemente los indicadores de madurez digital con un índice global de 53.64 puntos (superior a la media de 50.4).

- Destaca por una mayor adopción de tecnologías avanzadas:
  - IoT integrado (5.02 sobre 9),
  - Robótica avanzada (5.31)
  - y una notable penetración de la IA generativa (32.3%).
- Las empresas de este subsector fabrican bienes de equipo complejos, lo que requiere una profunda integración entre las fases de diseño (CAD/CAM/CAE), producción y servicios posventa (servitización).
- Su oportunidad estratégica reside en la digitalización del ciclo completo de ingeniería y la colaboración digital con los clientes.

**Metalurgia y primera transformación (CNAE 24):** Con un 21.0% de representación.

- Este subsector engloba la siderurgia, la fundición y la producción de metales básicos.
- Su índice de madurez es de 49.44 puntos.
- Se trata de una industria de procesos continuos, intensiva en consumo energético y materias primas.
- Las prioridades digitales difieren radicalmente de los subsectores manufactureros discretos
- El enfoque se sitúa en el control crítico de variables de planta (temperatura, presión, composición química) mediante sensorización avanzada (IoT).
- Destacan en el uso de Business Intelligence (38.3%) para la monitorización en tiempo real y la optimización de la eficiencia energética, un factor crítico de supervivencia ante las fluctuaciones de los costes energéticos y las exigencias de descarbonización (mecanismo CBAM).

### 3.1.5. Distribución de la muestra

El alcance geográfico del estudio es de carácter nacional, logrando la participación de empresas ubicadas en **44 provincias** españolas. Esta amplia cobertura permite capturar la realidad de las zonas con tradición industrial histórica (como País Vasco, Cataluña, Asturias o Madrid), así como de territorios con ecosistemas industriales emergentes o más dispersos.

La muestra utilizada de 318 empresas es estadísticamente significativa para representar a las 55.592 empresas registradas bajo los códigos CNAE 24-30 y 33, arrojando un margen de error del  $\pm 5,5\%$  para un nivel de confianza del 95%, situándose dentro de los estándares de precisión aceptados en investigaciones industriales y de mercado de ámbito nacional.

Además, la solidez del diagnóstico no reside solo en el número, sino en su equilibrada estratificación, que refleja la realidad del tejido productivo español. Al integrar una mayoría de micro y pequeñas empresas (70%) junto a medianas y grandes, y cubrir de forma proporcional los principales subsectores en 44 provincias, el informe garantiza una visión transversal y sin sesgos. Esto permite que las conclusiones sean proyectables y fiables para la toma de decisiones estratégicas en el sector.

## 4. CONTEXTO TECNOLÓGICO DEL SECTOR INDUSTRIAL

El presente capítulo profundiza en el ecosistema tecnológico que vertebra la transformación digital de la industria española del metal. Tras haber establecido el marco macroeconómico y estratégico, definido la metodología de evaluación y caracterizado la muestra de 318 empresas participantes, resulta imperativo diseccionar las herramientas, plataformas y arquitecturas que posibilitan el tránsito desde la manufactura tradicional hacia los paradigmas de la Industria 4.0 y 5.0.

La digitalización industrial no es un fenómeno monolítico, sino un proceso de estratificación tecnológica. En el sector metal-mecánico, caracterizado por una alta intensidad en capital físico, procesos de transformación complejos y una cadena de valor profundamente interconectada, la adopción tecnológica debe abordarse desde una perspectiva multidimensional. Este capítulo estructura el análisis del contexto tecnológico en cinco grandes bloques:

- Las tecnologías fundacionales de gestión y operación (IT).
- Las tecnologías de producción avanzada en planta (OT).
- Las infraestructuras de conectividad y explotación del dato.
- La irrupción de tecnologías emergentes
- Las macro tendencias que redefinirán la competitividad del sector en el horizonte 2030.

### NOTA METODOLÓGICA:

El análisis tecnológico presentado a continuación se fundamenta en los datos empíricos extraídos de la muestra nacional de 318 empresas del metal, contrastados con el modelo multidimensional de análisis de madurez digital desarrollado por CTIC Centro Tecnológico. Las tasas de adopción y las puntuaciones de intensidad (escala 1-9) citadas reflejan el estado del arte en el período 2025-2026.

### 4.1. TECNOLOGÍAS DE GESTIÓN EMPRESARIAL Y OPERACIÓN

Las tecnologías de gestión empresarial y operación constituyen la “base digital” y el núcleo de “gestión” de cualquier organización industrial. Representan el estrato fundacional sobre el cual se construyen las capacidades analíticas y predictivas superiores. En el sector del metal, donde la atomización es la norma (el 96.9% de la muestra son PYMES), la consolidación de estas tecnologías es el paso crítico para abandonar la gestión basada en papel y hojas de cálculo aisladas, avanzando hacia un modelo de dato único y centralizado.

#### 4.1.1. Sistemas de Planificación de Recursos Empresariales (ERP)

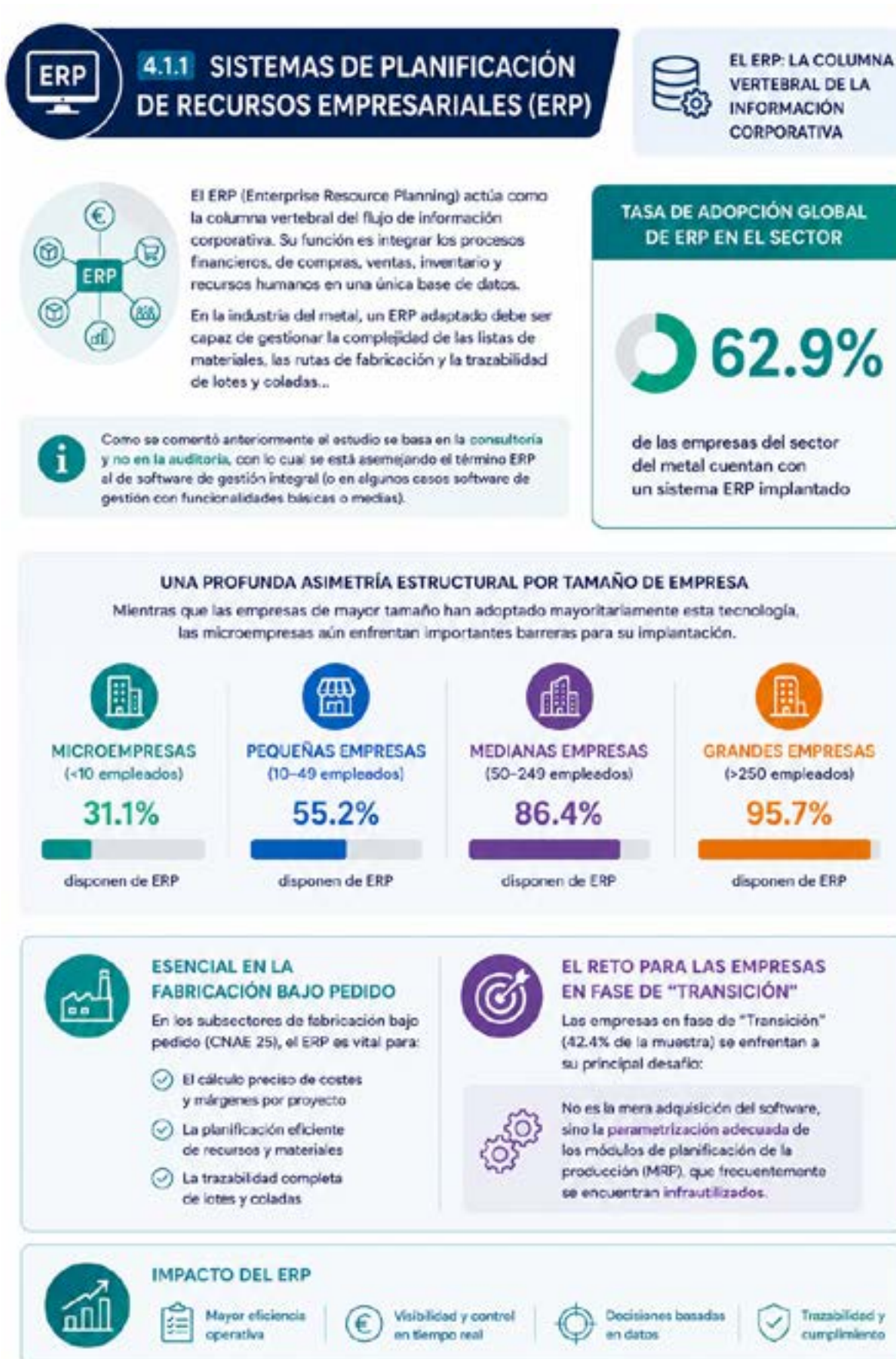
El ERP (*Enterprise Resource Planning*) actúa como la columna vertebral del flujo de información corporativa. Su función es integrar los procesos financieros, de compras, ventas, inventario y recursos humanos en una única base de datos. En la industria del metal, un ERP adaptado debe ser capaz de gestionar la complejidad de las listas de materiales, las rutas de fabricación y la trazabilidad de lotes y coladas...

Como se comentó anteriormente el estudio se basa en la consultoría y no en la auditoría con lo cual se está asemejando el término ERP al de software de gestión integral (o en algunos casos software de gestión con funcionalidades básicas o medias).

Según los datos del estudio, la tasa de adopción global de sistemas ERP en el sector se sitúa en el **62.9%**. Sin embargo, esta cifra oculta una profunda asimetría estructural: mientras que el 95.7% de las grandes empresas y el 86.4% de las medianas cuentan con un ERP implantado, apenas el 31.1% de las microempresas dispone de esta tecnología.

En los subsectores de fabricación bajo pedido (CNAE 25), el ERP es vital para el cálculo preciso de costes y márgenes por proyecto. El reto actual para las empresas en fase de "Transición" (42.4% de la muestra) no es la mera adquisición del software, sino la parametrización adecuada de los módulos de planificación de la producción (MRP), que frecuentemente se encuentran infrutilizados.

Figura 4.1: Uso del ERP en las empresas



#### 4.1.2. Facturación Electrónica y Digitalización Administrativa

La facturación electrónica se ha consolidado como el estándar de facto en el sector, alcanzando una penetración del **87.5%**.

Este alto grado de adopción responde tanto a las exigencias normativas (Ley Crea y Crece) como a la presión de las grandes empresas tractoras (ej. sector automoción o aeronáutico) que imponen el intercambio electrónico de datos (EDI) a sus proveedores.

En este momento ya existen muchas empresas con la obligación de facturación electrónica, son aquellas que acogidas al SII (sistema de suministro inmediato de información).

##### **El SII (Suministro Inmediato de Información del IVA)**

Constituyen un caso particular y relevante dentro del ecosistema de facturación electrónica en España. El SII afecta actualmente principalmente a:

- empresas con facturación superior a 6 millones de euros anuales.
- grupos de IVA.
- empresas inscritas en el REDEME (Registro de Devolución Mensual del IVA).
- algunas entidades acogidas voluntariamente.

Estas empresas ya remiten electrónicamente a la Agencia Tributaria (AEAT) los registros de facturación prácticamente en tiempo real y es importante entender que:

- el SII no equivale a factura electrónica B2B obligatoria
- pero sí supone un nivel de digitalización fiscal mucho más avanzado.

Las empresas ya integradas en SII parten con ventaja porque normalmente ya disponen de:

- ERP avanzado.
- integración contable-fiscal.
- automatización documental.
- procesos digitales estructurados.
- conectores con AEAT.

Por ello, la adaptación a factura electrónica B2B suele ser menos traumática. Las empresas acogidas al SII no estarán obligadas al sistema Verifactu.

La **Ley Antifraude** establece que:

- los contribuyentes que ya remiten información mediante SII quedan excluidos de determinadas obligaciones Verifactu
- porque Hacienda ya dispone de trazabilidad fiscal suficiente mediante el envío continuo de registros

El resto de empresas que no cumplen con esto tienen la obligación de adaptarse a lo que manda la ley e implementar la facturación electrónica en los próximos meses ya que los plazos previstos son inminentes.

Estas son las leyes de necesaria adaptación.

##### **Ley Crea y Crece**

El objetivo principal es impulsar la digitalización empresarial, reducir la morosidad comercial y fomentar el crecimiento de las PYMES mediante la implantación obligatoria de la factura electrónica entre empresas y autónomos.

Su impacto principal es que la ley obliga a que las operaciones B2B se gestionen mediante factura electrónica estructurada, sustituyendo progresivamente el uso de PDF y procesos manuales.

A quién afecta:

- Empresas.
- PYMES.
- Autónomos.
- Operaciones entre profesionales (B2B).

Por lo tanto y como principales obligaciones, las empresas deberán:

- Emitir facturas electrónicas.
- Recibir facturas electrónicas.
- Informar sobre estados de factura (aceptada, pagada, etc.).
- Garantizar interoperabilidad entre plataformas.
- Conservar trazabilidad documental.

Implicaciones empresariales:

- Modernización del ERP o software de gestión.
- Automatización administrativa.
- Digitalización documental.
- Reducción de errores manuales.
- Mayor control financiero y de pagos.

### **Sistema Verifactu**

El objetivo principal es evitar el fraude fiscal mediante el control técnico del software de facturación utilizado por empresas y autónomos.

No regula la factura electrónica en sí, sino el comportamiento del software de facturación y sus principales requisitos son que el software deberá:

- Impedir borrado o alteración fraudulenta de facturas
- Generar registros trazables e inalterables
- Incorporar huella digital o hash
- Garantizar integridad cronológica
- Permitir comunicación con la AEAT

Afecta a:

- Prácticamente todas las empresas y autónomos que emitan facturas
- ERP
- TPV
- Software de facturación

Excepción importante: las empresas acogidas al SII (Suministro Inmediato de Información del IVA) quedan parcialmente excluidas de Verifactu, al disponer ya de control fiscal continuo por parte de la AEAT.

Esto tienen un gran impacto tecnológico que obliga a las empresas a:

- Renovación de software antiguo
- Migración a soluciones cloud
- Trazabilidad integral
- Integración ERP-fiscalidad
- Control automatizado de registros

### Diferencia clave entre ambas normativas

#### Ley Crea y Crece

- Regula la factura electrónica B2B
- Busca impulsar la digitalización empresarial
- Se centra en el intercambio estructurado de facturas entre empresas

#### Verifactu

- Regula el software de facturación
- Busca evitar el fraude fiscal
- Se centra en la integridad y trazabilidad de los registros

Ambas normativas obligarán a las empresas a acelerar la modernización de sus sistemas de gestión.

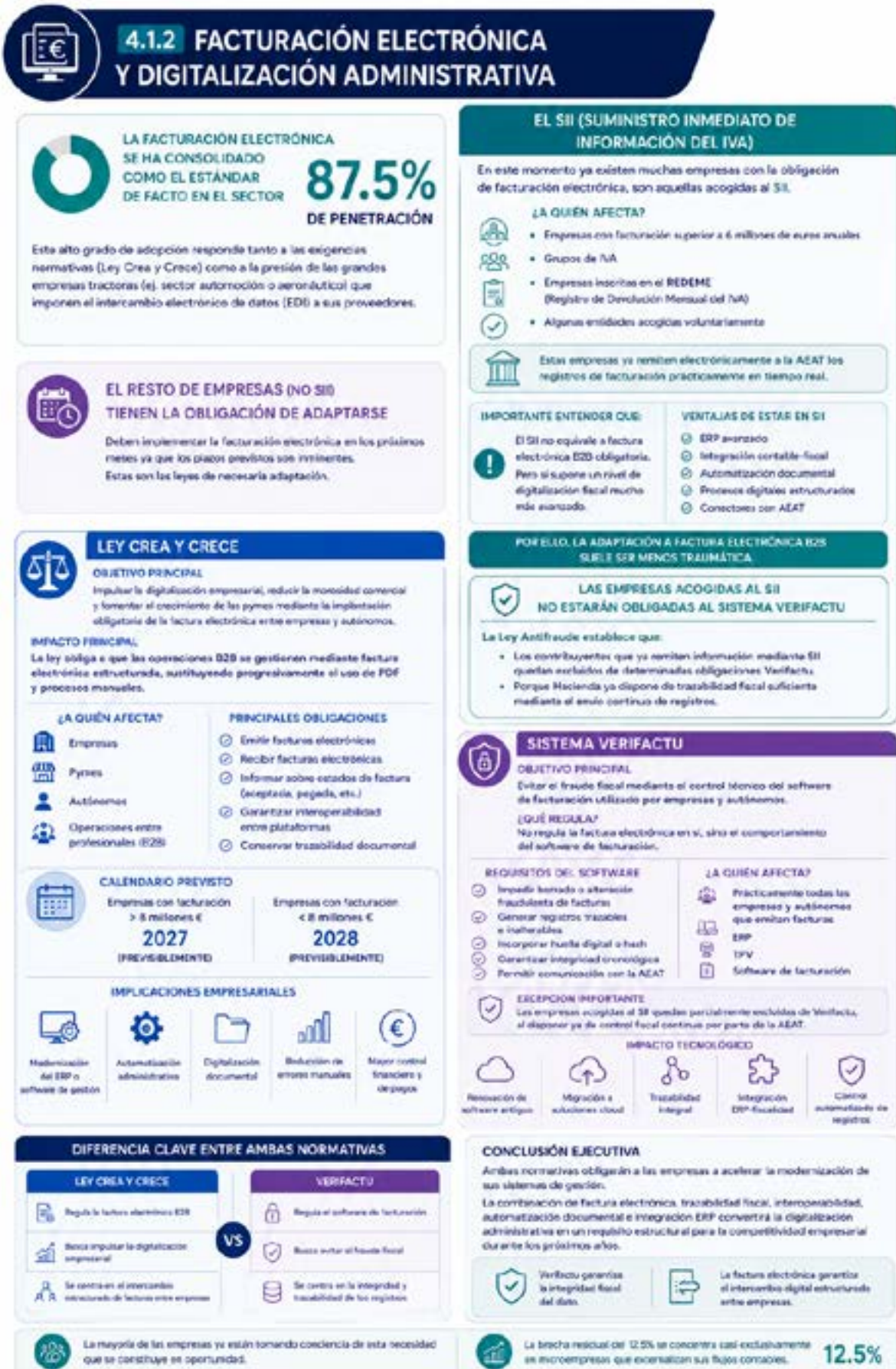
La combinación de factura electrónica, trazabilidad fiscal, interoperabilidad, automatización documental e integración ERP convertirá la digitalización administrativa en un requisito estructural para la competitividad empresarial durante los próximos años.

La factura electrónica y Verifactu no son alternativas, sino capas complementarias:

- Verifactu garantiza la integridad fiscal del dato.
- La factura electrónica garantiza el intercambio digital estructurado entre empresas.

La mayoría de las empresas ya están tomando conciencia de esta necesidad que se constituye en oportunidad. La brecha residual del 12.5% se concentra casi exclusivamente en microempresas que muchas veces externalizan su gestión contable.

Figura 4.2: Adopción de la facturación electrónica en las empresas



### 4.1.3. Computación en la nube (Cloud Computing)

La migración de infraestructuras locales (on-premise) hacia entornos Cloud constituye una de las transformaciones tecnológicas más relevantes dentro del sector metal, alcanzando actualmente una adopción global del 57.1% en las empresas analizadas.

Este proceso responde a la necesidad de disponer de sistemas más flexibles, escalables y accesibles, capaces de adaptarse a entornos productivos cada vez más digitalizados y distribuidos.

La computación en la nube permite a las empresas acceder a capacidades avanzadas de almacenamiento, procesamiento y gestión de datos sin necesidad de realizar grandes inversiones iniciales en servidores físicos, cabinas de almacenamiento o infraestructura de comunicaciones propia. Este modelo transforma el gasto tecnológico tradicional basado en inversión (CAPEX) hacia un modelo operativo (OPEX), más asumible para muchas PYMES industriales.

En el sector metal, el Cloud ya no se limita únicamente al alojamiento del correo electrónico corporativo o a servicios básicos de almacenamiento. Su utilización se ha extendido progresivamente hacia:

- plataformas ERP en modalidad SaaS (Software as a Service),
- herramientas colaborativas para oficina técnica e ingeniería,
- repositorios centralizados de documentación técnica,
- almacenamiento de planos CAD/CAM de gran tamaño,
- copias de seguridad automatizadas,
- sistemas de gestión documental,
- plataformas de análisis de datos y business intelligence,
- soluciones de mantenimiento y movilidad para personal de planta y asistencia técnica.

Asimismo, el Cloud se está convirtiendo en un facilitador clave para la integración de tecnologías Industria 4.0, permitiendo conectar sensores IoT, plataformas MES, sistemas de monitorización energética o cuadros de mando industriales accesibles en tiempo real desde cualquier ubicación.

Uno de los factores que más ha impulsado esta adopción ha sido la necesidad de mejorar la resiliencia operativa y la continuidad del negocio.

Las empresas son cada vez más conscientes de los riesgos asociados a la pérdida de información, ciberataques, averías físicas o interrupciones en planta, por lo que la nube aporta ventajas relevantes en materia de:

- redundancia y disponibilidad,
- recuperación ante desastres,
- acceso remoto seguro,
- actualización continua de sistemas,
- escalabilidad inmediata,
- reducción de costes de mantenimiento IT.

Resulta especialmente destacable que incluso dentro del segmento de microempresas el Cloud alcanza ya un 31.1% de adopción.

En muchos casos, esta implantación viene impulsada por soluciones sencillas y accesibles como Microsoft 365, Google Workspace, plataformas de copias de seguridad cloud o ERPs ligeros en modalidad online.

En las medianas y grandes empresas del sector metal, el Cloud está evolucionando hacia modelos híbridos, donde conviven infraestructuras locales con servicios cloud avanzados. Esto es especialmente habitual en organizaciones que manejan maquinaria industrial, software CAD/CAM especializado o entornos productivos donde todavía existen limitaciones de latencia, conectividad o integración OT/IT.

A pesar del crecimiento observado, persisten todavía **algunas barreras** relevantes para su adopción plena:

- preocupación por la ciberseguridad,
- dependencia de la conectividad,
- resistencia cultural al abandono del servidor local,
- desconocimiento técnico,
- dificultades de integración con maquinaria antigua o software heredado.

No obstante, la tendencia del mercado apunta claramente hacia un incremento progresivo del Cloud Computing como base tecnológica de la digitalización industrial, especialmente en ámbitos relacionados con colaboración empresarial, trazabilidad, analítica de datos, inteligencia artificial y automatización de procesos administrativos y productivos.

Figura 4.3: Uso de la computación en la nube en las empresas



#### 4.1.4. Gestión de Relaciones con Clientes (CRM)

Los sistemas CRM (Customer Relationship Management) alcanzan actualmente una adopción del 46.4% en las empresas analizadas del sector metal, reflejando un avance progresivo hacia modelos de gestión comercial más estructurados, orientados al dato y centrados en la relación a largo plazo con el cliente.

En el contexto B2B (Business-to-Business) característico del sector metal-mecánico, el proceso comercial presenta una complejidad significativamente superior a otros sectores más orientados a venta directa o transaccional.

Habitualmente se trata de ciclos de venta largos, técnicos y consultivos, donde intervienen múltiples interlocutores y donde las decisiones de compra suelen estar vinculadas a procesos de ingeniería, calidad, homologación, capacidad productiva o integración técnica.

En este escenario, la implantación de un CRM constituye un indicador claro de madurez organizativa y profesionalización comercial, permitiendo a las empresas:

- centralizar toda la información relacionada con clientes y oportunidades,
- realizar seguimiento estructurado de ofertas técnicas complejas,
- gestionar el pipeline comercial y las previsiones de ventas,
- registrar incidencias, visitas y comunicaciones,
- automatizar tareas administrativas y comerciales,
- mejorar la trazabilidad de las relaciones comerciales,
- y reducir la dependencia del conocimiento individual de determinados comerciales o responsables de cuenta.

El CRM permite además transformar la información comercial en conocimiento estratégico para la empresa, facilitando la segmentación de clientes, la identificación de oportunidades de crecimiento y el análisis de rentabilidad por cuenta, proyecto o sector industrial.

En muchos casos, especialmente dentro de pequeñas empresas industriales, la gestión comercial continúa realizándose mediante hojas Excel, correos electrónicos dispersos o sistemas no integrados con el ERP. Esto genera importantes dificultades para mantener una visión global del cliente, compartir información entre departamentos o realizar seguimiento real de oportunidades comerciales y presupuestos.

La integración entre CRM y ERP representa actualmente uno de los principales vectores de evolución digital en el sector metal. Esta integración permite conectar áreas tradicionalmente separadas:

- actividad comercial,
- planificación,
- producción,
- logística,
- servicio técnico,
- facturación,
- y posventa.

Gracias a ello, las organizaciones pueden disponer de una visión unificada del cliente y de todo su ciclo de relación con la empresa.

En subsectores como la fabricación de maquinaria y equipo (CNAE 28), el CRM adquiere una relevancia todavía mayor, ya que la relación comercial no finaliza con la entrega del bien de equipo. En estos entornos, el sistema CRM se convierte en una herramienta crítica para gestionar:

- contratos de mantenimiento,
- garantías,
- repuestos,

- incidencias técnicas,
- asistencia remota,
- revisiones periódicas,
- y oportunidades de venta recurrente asociadas al servicio posventa.

Este modelo evoluciona hacia estrategias de servitización industrial, donde las empresas complementan la venta de producto con servicios de alto valor añadido y relaciones comerciales continuadas en el tiempo.

Asimismo, el CRM comienza a integrarse progresivamente con otras tecnologías emergentes:

- herramientas de Business Intelligence,
- automatización comercial,
- plataformas de marketing industrial,
- sistemas de ticketing,
- portales de cliente,
- e incluso soluciones basadas en inteligencia artificial para análisis predictivo de ventas o recomendación de acciones comerciales.

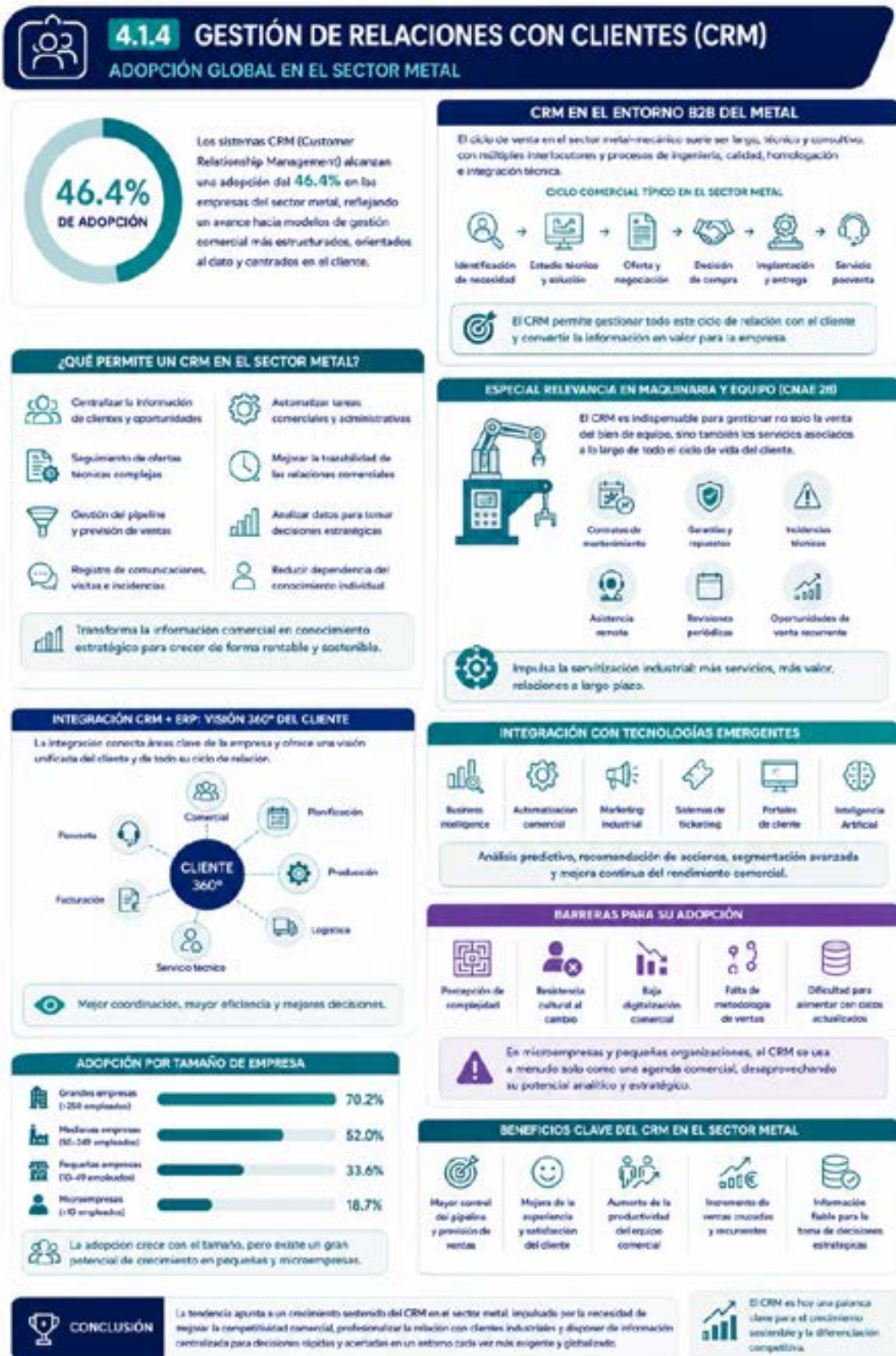
No obstante, la adopción del CRM todavía presenta barreras relevantes en parte del tejido industrial:

- percepción de complejidad,
- resistencia cultural al cambio,
- baja digitalización comercial,
- falta de metodología de ventas,
- y dificultad para alimentar correctamente el sistema con datos actualizados.

En las microempresas y pequeñas organizaciones, estas limitaciones provocan que muchas veces el CRM sea percibido únicamente como una agenda comercial avanzada, desaprovechando gran parte de su potencial analítico y estratégico.

A pesar de ello, la tendencia observada apunta hacia un crecimiento sostenido de este tipo de soluciones, impulsado por la necesidad de mejorar la competitividad comercial, profesionalizar la relación con clientes industriales y disponer de información centralizada para la toma de decisiones en entornos cada vez más exigentes y globalizados.

Figura 4.4: Uso de los CRM en las empresas



#### 4.1.5 Sistemas de Ejecución de Manufactura (MES)

Aunque el presente estudio agrupa su medición dentro del ámbito de integración operativa y digitalización industrial, los sistemas MES (Manufacturing Execution System) representan una de las tecnologías más estratégicas para avanzar hacia modelos reales de Industria 4.0 en el sector metal. Solamente un 11% de las empresas tomadas como muestra en este informe están utilizando este tipo de sistemas.

El sistema MES constituye el punto de unión entre el entorno IT (Information Technology), asociado a la gestión empresarial, y el entorno OT (Operational Technology), vinculado directamente con la operación industrial y la planta de producción.

En términos prácticos, mientras el ERP planifica qué fabricar, cuándo hacerlo y con qué recursos, el MES supervisa y controla cómo se está ejecutando realmente la producción en tiempo real.

En la industria metalúrgica y metal-mecánica, donde los procesos productivos suelen combinar múltiples operaciones, maquinaria heterogénea y una elevada variabilidad de órdenes de fabricación, el MES permite disponer de visibilidad operativa inmediata sobre lo que sucede en planta.

Entre sus principales funcionalidades destacan:

- gestión y secuenciación de órdenes de fabricación,
- captura automática de tiempos de operario y máquina,
- monitorización del estado de producción,
- control de paradas e incidencias,
- gestión de mermas y consumos de material,
- control de calidad en proceso,
- trazabilidad de lotes y operaciones,
- captura de datos desde maquinaria industrial,
- cálculo de indicadores OEE (Overall Equipment Effectiveness),
- y supervisión de productividad en tiempo real.

La implantación de sistemas MES resulta especialmente relevante en empresas del sector metal donde existen:

- procesos de mecanizado,
- corte y conformado,
- soldadura,
- tratamientos térmicos,
- líneas automatizadas,
- fabricación bajo pedido,
- o necesidad de trazabilidad industrial avanzada.

Uno de los principales problemas detectados en el estudio es la existencia de “islas de información”, especialmente presente en el 42.4% de las empresas situadas en fase de “Transición” digital. En estos entornos, es habitual encontrar:

- datos productivos registrados manualmente,
- hojas Excel independientes,
- software no conectado entre departamentos,
- máquinas sin integración,
- y ausencia de información fiable en tiempo real.

Esta desconexión provoca importantes limitaciones operativas:

- baja capacidad de análisis,
- dificultades de planificación,
- pérdida de trazabilidad,

- retrasos en la toma de decisiones,
- errores de producción,
- escasa visibilidad de costes reales,
- y dependencia de información verbal o manual.

El sistema MES permite precisamente eliminar gran parte de estas barreras mediante la integración continua entre planta y gestión empresarial, facilitando un flujo bidireccional de información entre producción, planificación, calidad, mantenimiento y dirección.

Además, el MES se convierte en la base tecnológica necesaria para evolucionar posteriormente hacia capacidades más avanzadas asociadas a la Industria 4.0, tales como:

- mantenimiento predictivo,
- inteligencia artificial aplicada a producción,
- analítica industrial avanzada,
- gemelos digitales,
- optimización energética,
- automatización adaptativa,
- o sistemas de trazabilidad integral.

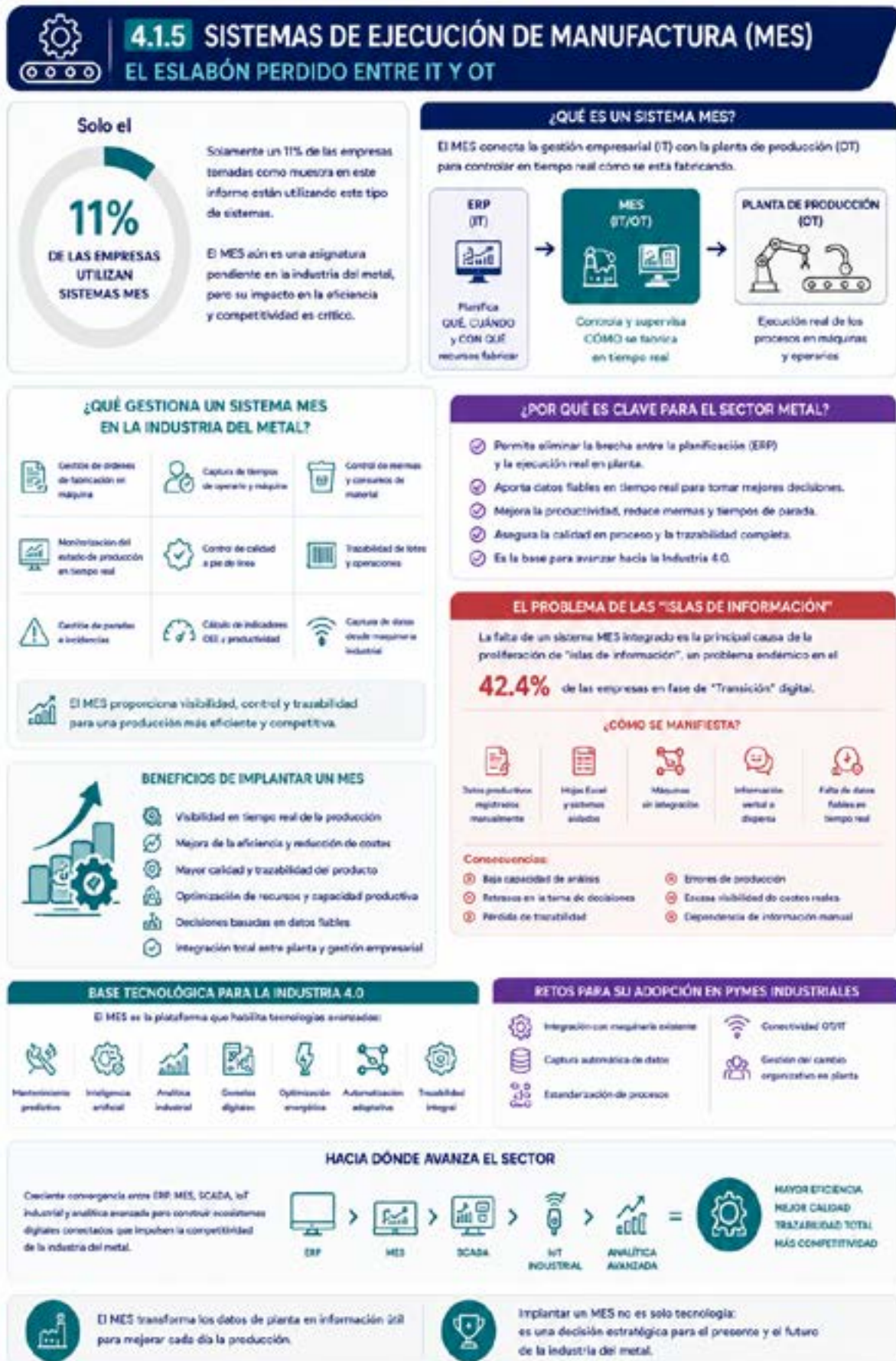
En muchas organizaciones del sector metal, especialmente PYMES industriales, el reto no reside únicamente en adquirir la tecnología, sino en abordar correctamente:

- la integración con maquinaria existente,
- la captura automática de datos,
- la estandarización de procesos,
- la conectividad OT/IT,
- y la gestión del cambio organizativo en planta.

Asimismo, se observa una tendencia creciente hacia soluciones MES más flexibles y escalables, muchas de ellas desplegadas en entornos cloud o híbridos, facilitando implantaciones progresivas y reduciendo la barrera económica tradicional que históricamente limitaba su adopción en pequeñas empresas.

La evolución del sector apunta claramente hacia una creciente convergencia entre ERP, MES, SCADA, IoT industrial y analítica avanzada, configurando ecosistemas digitales conectados que permitirán mejorar la eficiencia operativa, la calidad, la trazabilidad y la capacidad competitiva de la industria del metal durante los próximos años.

Figura 4.5: Uso de MES en las empresas



## 4.2. TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN AVANZADA Y AUTOMATIZACIÓN

Si las tecnologías de gestión representan el cerebro administrativo de la empresa, las tecnologías de producción avanzada constituyen el músculo operativo.

Este bloque tecnológico, propio del entorno OT (*Operational Technology*), es el que define la transición física desde la Industria 3.0 (automatización rígida) hacia la Industria 4.0 (sistemas ciberfísicos flexibles). En el sector del metal, donde la manipulación de cargas pesadas, las altas temperaturas y la precisión micrométrica son constantes, la automatización avanzada es un imperativo tanto de productividad como de seguridad laboral.

### 4.2.1. Robótica Industrial y robótica colaborativa

La robótica ha sido históricamente un pilar en subsectores como la automoción (CNAE 29), pero su democratización está transformando el conjunto del sector metal.

El estudio revela un nivel medio de implantación de robótica y automatización de **4.77 sobre 9**. Este valor intermedio indica que, si bien existe automatización física, esta frecuentemente opera en “islas” desconectadas de los sistemas de información superiores.

El contexto tecnológico actual se caracteriza por dos grandes vectores en este ámbito:

- **Robótica industrial tradicional:** Utilizada para tareas repetitivas, pesadas o peligrosas, como la soldadura por arco, el plegado de chapa, la paletización y la alimentación de centros de mecanizado CNC. Requieren vallados de seguridad y programación experta.
- **Robótica colaborativa (Cobots):** Representan la vanguardia de la Industria 4.0 y 5.0. Diseñados para compartir el espacio de trabajo con el operario humano sin barreras físicas, los cobots son más fáciles de programar (a menudo mediante guiado manual) y altamente flexibles. En talleres de mecanizado (CNAE 25), se utilizan cada vez más para tareas de machine tending (carga y descarga de piezas) en series cortas, liberando al operario cualificado para tareas de mayor valor añadido, alineándose perfectamente con la dimensión “humano-céntrica” de la Industria 5.0.

### 4.2.2. Visión Artificial y Control de Calidad Automatizado

La visión artificial presenta una tasa de adopción del **18.8%** en la muestra analizada. Esta tecnología utiliza cámaras de alta resolución combinadas con algoritmos de procesamiento de imágenes (y cada vez más, con Deep Learning) para inspeccionar piezas a velocidades y niveles de precisión inalcanzables para el ojo humano.

En la industria del metal, sus aplicaciones son críticas: detección de porosidades en piezas de fundición, verificación de cordones de soldadura, medición de tolerancias dimensionales en mecanizado de precisión y lectura de códigos DPM (*Direct Part Mark*) para trazabilidad.

En la última feria de Hannover se ha hablado con especial énfasis de los humanoides, una tecnología aún emergente pero que se espera estará presente en las fábricas en el medio plazo. Este año ha sido sin duda la principal novedad de la feria.

La adopción se ve frenada a menudo por la alta inversión inicial y, desde un punto de vista técnico, por la variabilidad de las condiciones de iluminación en los talleres metalúrgicos y los reflejos inherentes a las superficies metálicas mecanizadas. Sin embargo, las empresas en el nivel “Avanzado” (46.9% de la muestra) están comenzando a integrar estas cámaras directamente en los brazos robóticos para dotarlos de percepción espacial.

#### 4.2.3. Fabricación aditiva (Impresión 3D metálica)

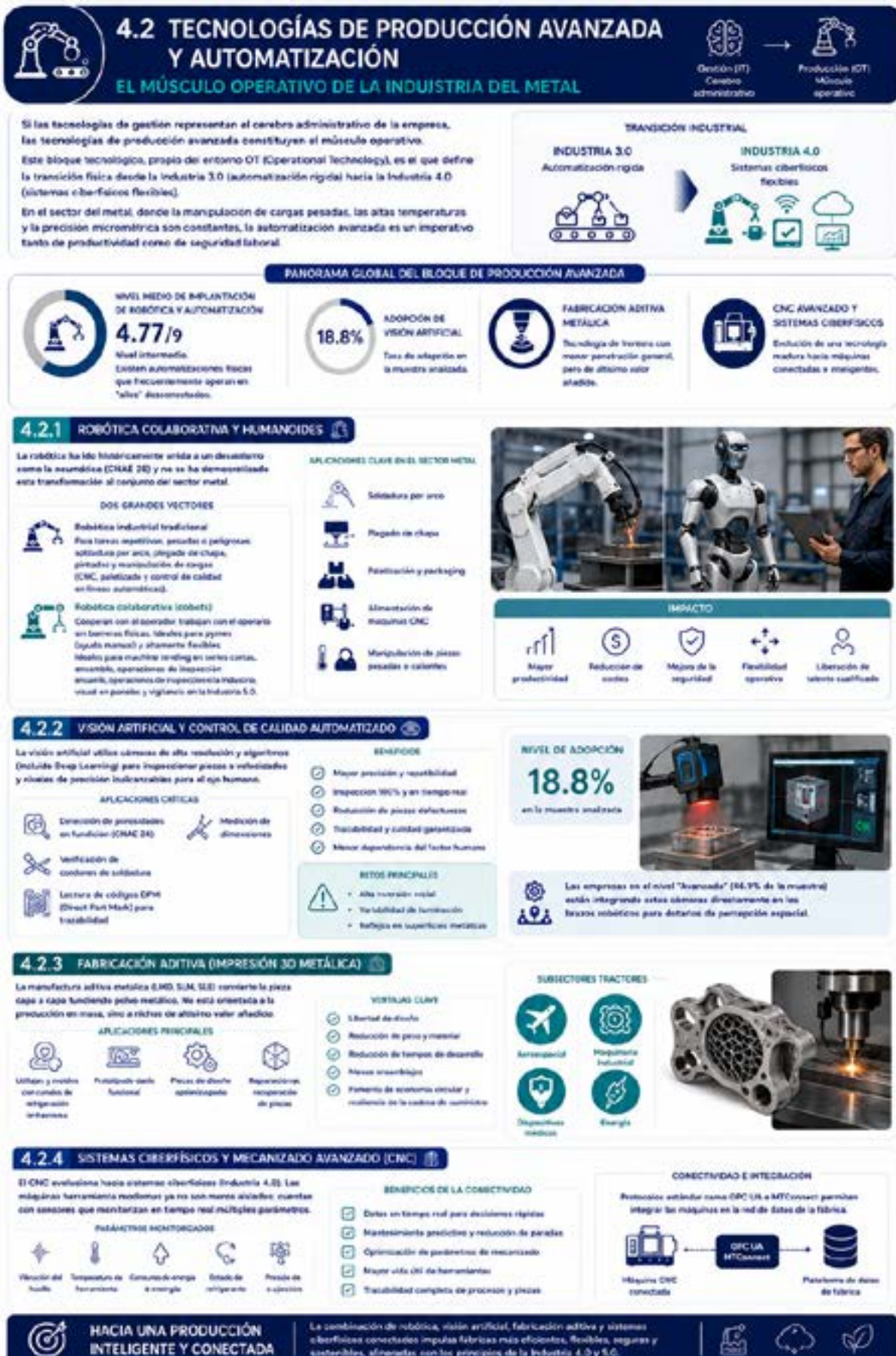
Aunque el estudio la enmarca dentro de las tecnologías de frontera con menor penetración general, la manufactura aditiva metálica (tecnologías como SLM - *Selective Laser Melting* o DMLS - *Direct Metal Laser Sintering*) está redefiniendo los límites del diseño industrial. A diferencia del mecanizado tradicional (sustractivo), la impresión 3D construye la pieza capa a capa fundiendo polvo metálico.

En el contexto del sector metal español, su uso no está orientado a la producción en masa, sino a nichos de altísimo valor añadido: fabricación de utillajes y matrices con canales de refrigeración conformados (imposibles de mecanizar tradicionalmente), prototipado rápido funcional, y producción de piezas de repuesto descatalogadas, lo cual fomenta la economía circular y la resiliencia de la cadena de suministro. Subsectores como el aeroespacial y la fabricación de maquinaria médica son los principales tractores de esta tecnología.

#### 4.2.4. Sistemas ciberfísicos y mecanizado avanzado (CNC)

El control numérico por computadora (CNC) es una tecnología madura (Industria 3.0), pero su evolución hacia sistemas ciberfísicos (Industria 4.0) marca el contexto actual. Las máquinas herramienta modernas ya no son entes aislados; están equipadas con sensores internos que monitorizan la vibración del husillo, la temperatura de la herramienta y el consumo de energía de los servomotores. La integración de estas máquinas mediante protocolos de comunicación estandarizados (como OPC UA o MTConnect) permite extraer datos en tiempo real, transformando un torno o una fresadora convencional en un nodo activo de la red de datos de la fábrica.

Figura 4.6: Tecnologías de producción avanzada y automatización.



### 4.3. TECNOLOGÍAS DE CONECTIVIDAD Y GESTIÓN DE DATOS

La promesa de la Industria 4.0 se fundamenta en la capacidad de capturar, transmitir, almacenar y analizar volúmenes masivos de información en tiempo real. Es la industria conectada.

Sin una infraestructura de conectividad robusta y una gobernanza de datos estructurada, las tecnologías de producción avanzada operan a ciegas. Este bloque analiza cómo la industria española del metal está construyendo su “hilo digital” (*digital thread*).

#### 4.3.1. Internet de las Cosas Industrial (IIoT)

El IIoT (*Industrial Internet of Things*) es la red de sensores, instrumentos y dispositivos autónomos conectados a través de internet a aplicaciones industriales. En el estudio, la implantación de IoT en producción obtiene una puntuación media de **4.59 sobre 9**.

En el sector metalúrgico (CNAE 24), caracterizado por procesos continuos e intensivos en energía, la sensorización avanzada es crítica. Se despliegan redes de sensores para monitorizar variables críticas de planta como la temperatura de los hornos de arco eléctrico, la presión de los gases, el caudal de fluidos refrigerantes y la composición química de la colada. El principal cuello de botella tecnológico identificado no es la disponibilidad de sensores (cuyo coste ha caído drásticamente), sino la integración de las señales de planta (PLCs, SCADAs) con los sistemas de gestión superior (MES/ERP). Frecuentemente, los datos se capturan pero se quedan atrapados en el nivel de máquina.

#### 4.3.2. Business Intelligence (BI) y Analítica de Datos

El Business Intelligence representa, según las conclusiones del diagnóstico, “la gran oportunidad perdida a corto plazo” para el sector. Con una tasa de adopción global de apenas el **36.2%**, existe una disonancia evidente: mientras el 62.9% de las empresas captura datos transaccionales en un ERP, solo un tercio utiliza herramientas analíticas (como Power BI, Qlik o Tableau) para explotarlos visualmente y convertirlos en inteligencia accionable.

La brecha digital por tamaño es abismal en esta tecnología: el 85.7% de las grandes empresas utiliza BI, frente a un exiguo 13.3% de las microempresas. En el ámbito de la producción, el uso de **Big Data** obtiene una puntuación de **4.54 sobre 9**. La falta de explotación analítica significa que métricas fundamentales como el OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) (que mide la disponibilidad, el rendimiento y la calidad de las máquinas) se calculan de forma manual, retrospectiva y, a menudo, inexacta, impidiendo la toma de decisiones ágiles en la planta.

#### 4.3.3. Ciberseguridad Industrial (OT/IT Security)

La convergencia entre las redes IT (oficinas) y OT (planta de producción) expone a la maquinaria industrial a vectores de ataque cibernético que antes eran exclusivos del entorno informático. A pesar de este riesgo crítico, la adopción de medidas de ciberseguridad avanzada se sitúa en un preocupante **44.6%**.

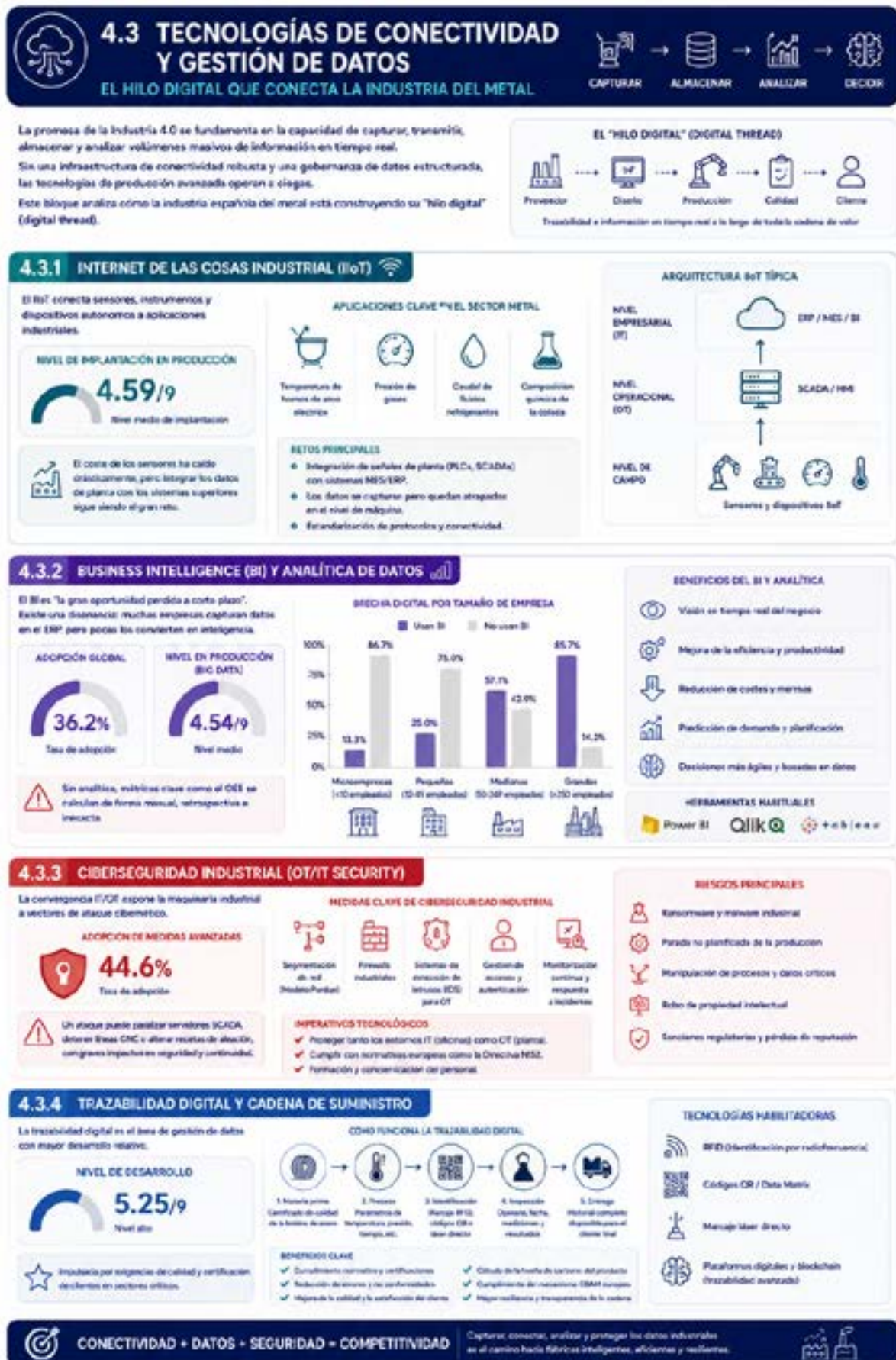
En el contexto tecnológico actual, un ataque de *ransomware* a una empresa del metal no solo cifra los ordenadores de contabilidad, sino que puede paralizar los servidores SCADA, detener las líneas de mecanizado CNC o alterar las recetas de aleación en un horno de fundición, con consecuencias catastróficas para la seguridad física y la continuidad del negocio. La implementación de arquitecturas de red segmentadas (modelo Purdue), firewalls industriales, sistemas de detección de intrusos (IDS) específicos para protocolos OT y el cumplimiento de normativas europeas como la Directiva NIS2 son imperativos tecnológicos ineludibles para el sector.

#### 4.3.4 Trazabilidad Digital y Cadena de Suministro

La trazabilidad digital de la cadena de suministro es el área de gestión de datos con mayor desarrollo relativo, alcanzando una puntuación de **5.25 sobre 9**. Este avance está fuertemente traccionado por las exigencias de certificación y calidad impuestas por los clientes finales en sectores críticos (automoción, aeronáutico, defensa, médico).

Tecnológicamente, esto implica el uso de sistemas RFID (identificación por radiofrecuencia), códigos QR y marcaje láser directo sobre el metal para rastrear el historial completo de una pieza: desde el certificado de calidad de la bobina de acero original, pasando por los parámetros exactos de temperatura y presión durante su estampación, hasta el operario que realizó la inspección final. Esta trazabilidad es también el fundamento tecnológico necesario para el cálculo de la huella de carbono del producto y el cumplimiento del mecanismo CBAM europeo.

Figura 4.7: Tecnologías de conectividad y gestión de datos



## 4.4. TECNOLOGÍAS EMERGENTES Y DISRUPTIVAS

Más allá de la consolidación de la Industria 4.0, el sector metal se enfrenta a la irrupción de tecnologías de frontera que prometen alterar radicalmente los modelos de producción y diseño.

Estas tecnologías, agrupadas en el bloque de “Capacidades avanzadas” del modelo de madurez, presentan actualmente tasas de adopción minoritarias, pero su potencial de disrupción exige una vigilancia estratégica constante.

### 4.4.1. Inteligencia Artificial (IA) y Machine Learning

La Inteligencia Artificial aplicada al negocio presenta una adopción del 17.4%, concentrada casi exclusivamente en las grandes corporaciones (57.1% de adopción en este segmento frente al 4.4% en microempresas).

La IA tradicional (Machine Learning) en el sector metal requiere una infraestructura de datos estructurada y una gobernanza previa muy madura; en palabras del estudio, es necesario “ordenar para automatizar”.

Los casos de uso más prometedores incluyen:

- **Optimización de procesos metalúrgicos:** Algoritmos que analizan el histórico de coladas para predecir la cantidad exacta de ferroaleaciones necesarias para alcanzar las propiedades mecánicas deseadas, minimizando el consumo de materias primas costosas.
- **Planificación avanzada (APS):** Sistemas de IA que optimizan la secuenciación de órdenes de fabricación en el taller, teniendo en cuenta las restricciones de capacidad de las máquinas, los tiempos de preparación (*setup*) y las fechas de entrega de los clientes.

### 4.4.2. Inteligencia Artificial generativa y agentes autónomos

Un fenómeno tecnológico reciente y notable es que la **IA Generativa** (modelos de lenguaje extenso como GPT) presenta una adopción mayor (**28.1%**) que la IA analítica tradicional. Esto se debe a su menor barrera de entrada técnica y a su utilidad inmediata en tareas de oficina técnica y administración: redacción de correos comerciales, traducción de manuales técnicos, soporte documental para licitaciones y asistencia en la redacción de código de programación básico.

Por otro lado, los **Agentes de IA autónomos**, sistemas capaces de tomar decisiones y ejecutar acciones en software sin intervención humana directa, se encuentran en una fase puramente exploratoria, con apenas un 8.0% de adopción, limitándose a pruebas de concepto en entornos muy controlados.

### 4.4.3. Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo es la aplicación más directa del IIoT y el Machine Learning en la planta.

A diferencia del mantenimiento reactivo (reparar cuando se rompe) o el preventivo (reparar por calendario), el predictivo utiliza algoritmos para analizar las firmas de vibración, el análisis de aceites y las variaciones térmicas de una máquina para predecir un fallo antes de que ocurra.

Aunque un **35.3%** de las empresas declara utilizarlo, las lecturas cualitativas del estudio indican que a menudo se limita a iniciativas puntuales (monitorización de un motor crítico específico) y no a despliegues escalados a toda la planta. La barrera principal es la falta de integración de datos históricos fiables y la dificultad de correlacionar las variables de condición con los modos de fallo reales.

### 4.4.4. Gemelos digitales (Digital Twins) y simulación

El gemelo digital es una réplica virtual y dinámica de un activo físico (una máquina, una línea de producción o una fábrica entera), sincronizada en tiempo real mediante datos de sensores. En el sector metal, esta tecnología es el pináculo de la madurez digital, reservada actualmente para las empresas clasificadas como “líderes digitales” (solamente un 5.4% de la muestra).

En la fabricación de maquinaria (CNAE 28), el gemelo digital permite realizar la puesta en marcha virtual (*virtual commissioning*) del equipo antes de construirlo físicamente, detectando colisiones y errores de programación del PLC en el simulador. En la siderurgia, permite simular el comportamiento termodinámico del acero en el tren de laminación para optimizar los parámetros de enfriamiento sin interrumpir la producción real.

Figura 4.8: Tecnologías emergentes y disruptivas



### 4.4.3 MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Aplicación directa del IoT y el Machine Learning en la planta para predecir fallos antes de que ocurran.



## 35.3%

de las empresas desean utilizar

• Análisis de vibraciones

• Análisis de aceites

• Variaciones térmicas

• Predicción de fallos

ENFOQUE DEL MANTENIMIENTO

REACTIVO

Reparar cuando se rompe



PREVENTIVO

Reparar por calendario



PREDICTIVO

Predecir y actuar antes del fallo



A pesar de su potencial, su adopción completa aún es limitada. La clave está en escalar de proyectos piloto a despliegues globales que generen valor real y sostenible.

### 4.4.4 GEMELOS DIGITALES (DIGITAL TWINS) Y SIMULACIÓN

Réplica virtual y dinámica de un activo físico, sincronizada en tiempo real mediante datos de sensores.

APLICACIONES CLAVE EN EL SECTOR METAL

**FABRICACIÓN DE HERRAMIENTA (CINAE 2E)**

Permite la puesta en marcha virtual (virtual commissioning) del equipo antes de comenzar físicamente, detectando colisiones y errores de programación del PLC en el simulador.

**SEDFURGIA Y PROCESOS CONTINUOS**

Simula el comportamiento termomecánico del acero en el horno de laminación para optimizar los parámetros de enfriamiento sin interrumpir la producción real.

BENEFICIOS PRINCIPALES

- Optimización de procesos y recursos
- Reducción de paradas no planificadas
- Validación y pruebas sin riesgo
- Mejora de la calidad del producto
- Decisiones basadas en datos en tiempo real

Adopción actual: **5.4%** de las empresas. Reservada actualmente para las empresas "Líderes Digitales".

TECNOLOGÍAS QUE HOY SON MINORITARIAS, MAÑANA SERÁN IMPRESCINDIBLES.

La vigilancia tecnológica y la experimentación controlada son esenciales para que el sector metal no solo se adapte al futuro, sino que lo lidere.



## 4.5. Tendencias tecnológicas relevantes para el sector metal

El contexto tecnológico no es estático. Las decisiones de inversión que las empresas del metal tomen hoy deben estar alineadas con las macro tendencias que definirán el panorama industrial de la próxima década.

Estas tendencias no son puramente tecnológicas, sino que surgen de la intersección entre la innovación digital, las presiones regulatorias europeas y los imperativos medioambientales.

### 4.5.1. La convergencia hacia la Industria 5.0

Como se expuso en el marco estratégico, la Comisión Europea ha definido la Industria 5.0 como un paradigma que complementa la eficiencia de la Industria 4.0 con tres pilares: sostenibilidad, resiliencia y centralidad del ser humano. Tecnológicamente, esto se traduce en:

- **Tecnologías humano-céntricas:** Desarrollo de interfaces de usuario (HMI) adaptativas, uso de Realidad Aumentada (AR) para guiar a operarios noveles en tareas complejas de ensamblaje, y exoesqueletos biónicos para reducir la fatiga física en la manipulación de piezas metálicas pesadas.
- **Tecnologías para la resiliencia:** Plataformas de software para el mapeo dinámico de la cadena de suministro (*Supply Chain Control Towers*) que utilizan IA para predecir disrupciones geopolíticas o logísticas y sugerir proveedores alternativos de materias primas críticas (alineado con el CRMA europeo).

### 4.5.2. Tecnologías para la descarbonización y el “acero verde”

La transición energética es el mayor reto estructural para los subsectores intensivos en energía (CNAE 24). La tecnología digital es el habilitador indispensable para la descarbonización. Las tendencias incluyen:

- **Sistemas de gestión energética (EMS) basados en IA:** Plataformas que monitorizan el consumo eléctrico y de gas en tiempo real, correlacionándolo con la producción para identificar ineficiencias y optimizar los picos de demanda según las tarifas del mercado eléctrico.
- **Digitalización del ciclo del hidrógeno verde:** Para los proyectos pioneros de reducción directa de hierro (DRI-H2) en España, se requieren sistemas de control de procesos (DCS) de nueva generación capaces de gestionar la volatilidad y las exigencias de seguridad del hidrógeno a escala industrial.
- **Pasaporte digital de producto (DPP):** Una tecnología emergente impulsada por la regulación europea que requerirá que cada lote de producto metálico lleve asociado un registro digital inmutable (posiblemente basado en *blockchain*) detallando su huella de carbono, composición de aleación y porcentaje de material reciclado.

### 4.5.3. Servitización y nuevos modelos de negocio

Especialmente relevante para los fabricantes de maquinaria y bienes de equipo (CNAE 28), la servitización implica pasar de vender un producto físico a vender el servicio o el rendimiento que ese producto proporciona (*Equipment-as-a-Service*).

Tecnológicamente, esto requiere una integración profunda de IIoT, conectividad 5G, Cloud y analítica de datos. El fabricante mantiene la propiedad de la máquina instalada en la fábrica del cliente y factura por “hora de husillo girando” o “tonelada de chapa plegada”. Para que este modelo sea rentable, el fabricante debe tener visibilidad total del estado de la máquina en tiempo real para aplicar mantenimiento predictivo y evitar paradas que penalicen su facturación.

### 4.5.4. Computación cuántica para materiales avanzados (Horizonte a largo plazo)

Aunque actualmente fuera del alcance operativo de las PYMES, la computación cuántica se perfila como una tecnología disruptiva para la ciencia de materiales. En la próxima década, los algoritmos cuánticos permitirán simular interacciones moleculares complejas para descubrir nuevas aleaciones metálicas más ligeras, resistentes y con menor huella de carbono, reduciendo drásticamente los tiempos de I+D que actualmente requieren años de pruebas físicas en laboratorio.

Figura 4.9: Tendencias tecnológicas relevantes para el sector metal



### CONCLUSIÓN DEL CONTEXTO TECNOLÓGICO:

El análisis del ecosistema tecnológico revela que la industria española del metal posee una base transaccional sólida (ERP, facturación electrónica), pero enfrenta un “cuello de botella” crítico en la integración de los datos de planta (OT) con los sistemas de gestión (IT).

La superación de este obstáculo, mediante la adopción generalizada de IIoT, sistemas MES y analítica de datos (BI), es el paso previo e ineludible antes de poder capitalizar el valor de tecnologías disruptivas como la inteligencia artificial o los gemelos digitales.

La hoja de ruta tecnológica debe ser, por tanto, secuencial, pragmática y adaptada a la realidad de un sector dominado por la pequeña y mediana empresa.

## 5. RESULTADOS DEL ESTUDIO: ESTADO ACTUAL DE DIGITALIZACIÓN

El análisis realizado a partir de una muestra nacional de 318 empresas distribuidas en 44 provincias confirma que la industria española del metal se encuentra en una fase de transición digital avanzada, aunque todavía heterogénea en intensidad, profundidad y capacidad de integración.

La fotografía agregada del sector muestra una base razonablemente asentada en ámbitos administrativos y de gestión, pero también revela brechas persistentes cuando la digitalización exige coordinación entre planta y oficina, gobierno del dato, ciberseguridad industrial y explotación analítica de la información.

Esta lectura obliga a evitar dos simplificaciones habituales.

- La primera consiste en presentar al sector como un conjunto homogéneamente retrasado, cuando la evidencia empírica refleja una realidad mucho más matizada, con empresas claramente avanzadas y con una masa crítica amplia situada en posiciones intermedias.
- La segunda consiste en confundir presencia tecnológica con madurez digital. El estudio demuestra que la existencia de software, automatización o conectividad no equivale por sí sola a transformación operativa, si no va acompañada de integración, disciplina de dato, rediseño de procesos y capacidad de decisión basada en evidencia.

La relevancia de este diagnóstico es particularmente alta en el caso del metal. Se trata de un sector que soporta cadenas de valor estratégicas de la economía española y que, por su elevada intensidad en activos físicos, energía, mantenimiento y requisitos de calidad, necesita una digitalización orientada no solo a reducir tareas manuales, sino a elevar productividad, resiliencia, trazabilidad y capacidad de adaptación.

En este contexto, la digitalización no es una capa accesorio, sino **un componente estructural de la competitividad industrial**.

Los resultados cuantitativos sintetizan bien este momento sectorial. La facturación electrónica presenta una adopción del 87,5%, el ERP del 62,9%, el cloud del 57,1% y el CRM del 46,4%.

Sin embargo, la penetración de BI (36,2%), ciberseguridad avanzada (44,6%), mantenimiento predictivo (35,3%) e inteligencia artificial aplicada al negocio (17,4%) todavía refleja una fase de desarrollo mucho menos consolidada.

A ello se suma un grado medio de implantación industrial intermedio en IoT (4,59/9), robótica/automatización (4,77/9) y uso de big data en producción (4,54/9).

La conclusión general del capítulo es clara: el sector ya no debate si digitalizarse, sino cómo pasar de una digitalización funcional y fragmentada a una digitalización integrada, gobernada por datos y conectada con los resultados del negocio.

Este tránsito es el que separa a las empresas que informatizan procesos de aquellas que empiezan a operar bajo una lógica real de Industria 4.0 y, de forma progresiva, de Industria 5.0.

Figura 5.1: Resumen de datos clave del diagnóstico de madurez digital del sector metal



## 5.1. NIVEL DE MADUREZ DIGITAL DEL SECTOR

El índice sintético de madurez digital sitúa la media sectorial en 50,4/100. Este valor refleja un estadio intermedio de desarrollo: suficientemente alto como para afirmar que la digitalización ya forma parte del funcionamiento ordinario de una porción relevante del tejido empresarial, pero todavía insuficiente para hablar de una transformación madura, estandarizada y plenamente integrada en el conjunto del sector.

La distribución por segmentos permite interpretar mejor esta cifra agregada.

- El 42,4% de las empresas se sitúa en el nivel de Transición,
- el 46,9% en el nivel Avanzada,
- el 5,4% aparece en Rezago estructural
- y otro 5,4% alcanza la categoría de Líder.

La forma de esta distribución resulta muy reveladora: la mayoría del sector ya ha superado el umbral de la digitalización básica, pero sigue situada en una franja donde la integración, el gobierno y la explotación avanzada son todavía parciales.

Desde una perspectiva estratégica, esta concentración en los niveles intermedios es una señal positiva. Sugiere que existe una masa crítica de empresas con capacidad de aprendizaje, con herramientas implantadas y con experiencia previa suficiente para absorber programas de modernización más ambiciosos.

Sin embargo, también pone de relieve que la mayor parte del tejido empresarial todavía necesita consolidar fundamentos antes de escalar hacia proyectos de mayor complejidad, como la analítica predictiva, la integración OT/IT completa o la inteligencia artificial aplicada a procesos críticos.

La madurez digital debe entenderse aquí como un concepto denso, no como una suma de checklists tecnológicas.

- Una empresa puede disponer de ERP, automatización, servicios cloud o presencia digital y seguir presentando debilidades severas en calidad del dato, conectividad entre áreas, trazabilidad, ciberseguridad o disciplina de ejecución.
- Precisamente por eso el índice sintético combina base digital, gestión y capacidades avanzadas; no premia solo la compra de soluciones, sino la coherencia del conjunto.

El comportamiento por tamaño empresarial refuerza esta lectura.

- Las microempresas registran niveles claramente inferiores en adopción de tecnologías de gestión y de capacidades avanzadas, lo que limita su velocidad de progresión en el modelo de madurez.
- Las medianas y grandes empresas, por el contrario, muestran bases más sólidas y una mayor capacidad para convertir la tecnología en rutinas organizativas estables.

El estudio evidencia que la brecha no es solo económica, sino también competencial, organizativa y cultural.

Otro hallazgo relevante es que la madurez no depende exclusivamente de la intensidad industrial o del peso de la automatización. También depende de la formalización de un marco de decisión. Allí donde la dirección dispone de un plan digital, responsables claros, indicadores priorizados y mecanismos de seguimiento periódico, la tecnología tiende a generar retornos más visibles. Donde estos elementos no existen, la adopción suele ser reactiva, oportunista o fragmentada, y la madurez resultante es mucho más baja de lo que la infraestructura tecnológica podría sugerir.

El sector se encuentra, por tanto, en una situación de **madurez media** con fuerte potencial de aceleración. La base ya no es marginal ni anecdótica.

Lo que falta, en muchos casos, es densidad organizativa: mejores datos, procesos más estables, conexiones entre funciones, arquitectura tecnológica más clara y una visión más deliberada de la transformación.

La transición desde esa madurez intermedia hacia una madurez avanzada será decisiva para sostener competitividad, servicio y resiliencia en los próximos años.

La interpretación cualitativa del índice obliga además a un enfoque segmentado.

- No todas las empresas necesitan el mismo tipo de intervención.
- Las organizaciones en rezago requieren fundamentos mínimos de continuidad digital y ciberhigiene;
- las situadas en transición necesitan consolidar integración y reporting; las avanzadas deben escalar analítica, automatización conectada y gobierno de datos;
- y las líderes están en condiciones de abordar espacios de datos, gemelos digitales o aplicaciones avanzadas de IA.

La utilidad del índice reside precisamente en esta capacidad de orientar prioridades con mayor realismo.

#### 5.1.1. Lectura por tamaño empresarial

- **Empresas Grandes (>250 empleados).**
  - En este segmento se observa un ecosistema digital ampliamente consolidado, con niveles muy elevados de implantación en cloud (85,7%), ERP (85,7%), CRM (85,7%), BI (85,7%) y ciberseguridad (71,4%). La adopción de IA (57,1%) e IA generativa (42,9%) confirma que estas organizaciones ya han superado mayoritariamente la fase de digitalización básica y comienzan a orientarse hacia capacidades avanzadas de explotación del dato y automatización inteligente.
  - La distancia respecto al resto de tamaños no responde únicamente a una mayor capacidad de inversión, sino a la existencia de estructuras organizativas capaces de sostener integración IT/OT, gobierno del dato, escalabilidad tecnológica y proyectos transversales entre áreas y plantas productivas.
  - En las empresas de este tamaño, el principal reto ya no consiste en incorporar nuevas herramientas, sino en gestionar la complejidad: integración de sistemas heterogéneos, arquitectura corporativa, gobierno del dato, ciberseguridad industrial y escalado coordinado de iniciativas de IA y automatización avanzada.
- **Empresas Medianas (50-249 empleados).**
  - Las empresas medianas muestran un nivel de madurez significativamente superior al promedio nacional en tecnologías de gestión, especialmente en ERP (86,4%), cloud (71,2%) y CRM (54,2%). La presencia de BI (52,5%) y ciberseguridad (61,0%) refleja además una transición progresiva desde la digitalización administrativa hacia modelos de gestión basados en datos.
  - Aunque la implantación de tecnologías avanzadas todavía es moderada —IA (25,4%) e IA generativa (27,1%)—, este segmento presenta una posición especialmente relevante por su capacidad potencial de escalado y profesionalización operativa.
  - El principal desafío de las empresas medianas es evolucionar desde sistemas parcialmente conectados hacia modelos integrados de gestión y explotación del dato. La prioridad estratégica pasa por consolidar gobierno de datos, integración entre planta y oficina, cuadros de mando operativos y capacidades internas para mantener y evolucionar el ecosistema digital.

- **Empresas Pequeñas(10-49 empleados).**
  - Las pequeñas empresas presentan una digitalización funcional centrada principalmente en la gestión operativa básica, con niveles intermedios de adopción en ERP (61,9%), cloud (58,4%) y CRM (48,7%). Sin embargo, la explotación avanzada del dato sigue siendo limitada, especialmente en BI (33,6%) e IA aplicada al negocio (15,9%).
  - Este segmento refleja una situación típica de digitalización parcial: existencia de herramientas relevantes, pero con bajo grado de integración, escasa normalización del dato y una elevada dependencia de procesos manuales o de conocimiento individual.
  - En estas empresas, la prioridad no debe centrarse inicialmente en tecnologías complejas, sino en ordenar procesos, mejorar la calidad del dato y conectar comercial, producción y gestión operativa. El mayor retorno suele provenir de integrar correctamente sistemas ya implantados antes de abordar proyectos avanzados de automatización o inteligencia artificial.
- **Microempresas (<10 empleados).**
  - Las microempresas muestran una brecha digital estructural respecto al resto del sector, con bajos niveles de implantación en cloud (31,1%), ERP (31,1%), CRM (24,4%) y especialmente en BI (13,3%) e IA (4,4%). La digitalización se concentra principalmente en necesidades administrativas básicas y herramientas aisladas de uso operativo.
  - La principal limitación no es exclusivamente económica, sino organizativa: ausencia de tiempo, perfiles especializados y capacidad interna para mantener procesos digitalizados de forma consistente y sostenible.
  - En este segmento, la prioridad estratégica debe centrarse en asegurar fundamentos mínimos de continuidad operativa y orden digital: facturación integrada, copias de seguridad verificadas, control básico de accesos, estructura mínima de datos y simplificación administrativa. La sofisticación tecnológica carece de sentido si previamente no existe disciplina operativa y estabilidad organizativa.

Figura 5.2: Adopción de tecnologías digitales por tamaño de empresa



El análisis por tamaño empresarial confirma que la madurez digital en el sector metal mantiene una relación directa con la dimensión de la organización. A medida que aumenta el tamaño de la empresa, se incrementa de forma significativa la implantación de tecnologías de gestión, analítica y automatización avanzada.

Las grandes empresas (>250 empleados) presentan el ecosistema digital más desarrollado, con tasas de implantación del 85,7% en cloud, ERP, CRM y Business Intelligence, junto con niveles elevados de ciberseguridad (71,4%) e Inteligencia Artificial (57,1%). Este comportamiento refleja organizaciones con estrategias digitales ya consolidadas, donde el reto principal no consiste únicamente en implantar herramientas, sino en optimizar su integración, escalabilidad y gobierno del dato.

Las empresas medianas (50-249 empleados) muestran un nivel de madurez claramente superior a la media del sector, especialmente en ERP (86,4%), cloud (71,2%) y ciberseguridad (61,0%). Se observa además una adopción creciente de tecnologías analíticas y de IA, aunque todavía con diferencias importantes respecto a las grandes corporaciones. Este segmento representa actualmente el núcleo de empresas con mayor capacidad de evolución hacia modelos avanzados de Industria 4.0.

Las pequeñas empresas (10-49 empleados) presentan una digitalización más heterogénea. Aunque tecnologías como ERP (61,9%) y cloud (58,4%) alcanzan niveles relevantes, la adopción de Business Intelligence, IA y ciberseguridad avanzada continúa siendo limitada. En muchos casos, la digitalización se centra todavía en resolver necesidades operativas básicas más que en explotar estratégicamente los datos o automatizar procesos complejos.

Por su parte, las microempresas (<10 empleados) concentran los niveles más bajos de madurez digital en prácticamente todas las tecnologías analizadas. La implantación de cloud y ERP apenas alcanza el 31,1%, mientras que Business Intelligence (13,3%) e IA (4,4%) muestran una presencia todavía residual. Este segmento continúa muy condicionado por limitaciones de inversión, falta de recursos especializados y baja estructuración organizativa.

Figura 5.3: Adopción de tecnologías digitales por tamaño de empresa (ii)



El estudio evidencia que la brecha digital del sector no depende de una única tecnología concreta, sino de la capacidad de las empresas para construir ecosistemas digitales integrados que combinen gestión, conectividad, analítica, automatización y gobierno del dato.

Asimismo, se concluye que las prioridades de transformación no son homogéneas dentro de cada tamaño empresarial. Mientras algunas organizaciones todavía deben consolidar fundamentos básicos de digitalización y disciplina operativa, otras necesitan avanzar hacia escenarios de integración avanzada, explotación analítica, ciberseguridad industrial e inteligencia artificial aplicada al negocio.

## 5.2. DIGITALIZACIÓN DE PROCESOS PRODUCTIVOS

La digitalización de los procesos productivos presenta un avance real, aunque claramente desigual.

Los valores medios de integración IoT (4,59/9), robótica/automatización (4,77/9) y uso de big data en producción (4,54/9) dibujan una situación intermedia: el sector no parte de cero, pero tampoco ha generalizado una planta plenamente conectada y gobernada por datos.

Esta lectura es coherente con la trayectoria histórica de la industria del metal. Durante décadas, muchas empresas han incorporado automatización, PLC, células robotizadas o control numérico (CNC) como respuesta a exigencias de productividad, precisión y repetibilidad. Sin embargo, la digitalización productiva contemporánea exige un salto adicional: convertir esas capacidades físicas en nodos informacionales conectados con planificación, calidad, mantenimiento, energía y dirección.

El principal problema observado es la persistencia de islas tecnológicas. En numerosas plantas existen máquinas avanzadas, líneas semiautomatizadas o sensores puntuales, pero la información generada no se integra de forma continua en un sistema común.

Como resultado, parte del potencial de la automatización se pierde: los datos no se transforman en visibilidad operativa, las desviaciones no se analizan con suficiente granularidad y la mejora continua sigue dependiendo en exceso de observación manual o de la experiencia tácita del personal.

La distinción entre automatizar y digitalizar es, en este contexto, crítica.

- Automatizar una tarea implica reducir intervención manual, aumentar precisión o estabilizar tiempos de ciclo.
- Digitalizar el proceso productivo significa, además, capturar la huella de esa operación, relacionarla con el resto del flujo de valor y convertirla en una base de decisión. Esta segunda capa es la que habilita gestión avanzada del rendimiento, trazabilidad en tiempo real, calidad preventiva y mantenimiento basado en condición.

La oportunidad inmediata del sector no está siempre en incorporar más equipamiento sofisticado, sino en hacer visible y comparable la operación existente.

Disponer de un registro estructurado de paradas, microparadas, rechazo, retrabajo, velocidad real, causas de incidencia, consumos o estados de máquina puede transformar la forma de gestionar la planta incluso sin alterar radicalmente el parque instalado. Para muchas PYMES industriales, esta fase de visibilidad operacional representa el retorno más rápido de la digitalización productiva.

La digitalización de producción también se ve condicionada por la naturaleza del producto y del proceso.

- En entornos de fabricación discreta con alta mezcla y lotes cortos, la prioridad puede estar en capturar tiempos, secuencias y no conformidades de taller.
- En procesos más continuos o intensivos en energía, la prioridad se desplaza hacia la monitorización de variables críticas, rendimientos energéticos y estabilidad del proceso.
- Por ello, no existe una única receta de digitalización de planta para todo el sector metal.

Otro elemento relevante es la relación entre digitalización productiva y perfil tecnológico de la plantilla.

- El valor medio del perfil tecnológico se sitúa en 4,75 sobre 9, lo que sugiere una base operativa razonable, pero no necesariamente suficiente para desplegar soluciones complejas de captura, explotación y mantenimiento de sistemas industriales conectados.
- Sin una inversión continuada en competencias, la digitalización de planta tiende a depender en exceso de proveedores, dificultando el aprendizaje interno y el escalado.

En síntesis, el sector se encuentra en una fase de consolidación incompleta. La automatización existe, la sensorización avanza y los casos de uso son reconocibles, pero todavía falta extender un hilo digital robusto que una máquina, proceso, calidad, mantenimiento y decisión. Ese es el verdadero umbral que separa la planta automatizada de la planta digitalmente madura.

### 5.2.1. Lectura por subsector productivo

#### Fabricación de productos metálicos (CNAE 25)

Este subsector combina una base de gestión con una realidad de planta propia. Sus niveles medios de IoT (4,41), robótica (4,70), big data (4,50) y trazabilidad (5,09) muestran que la digitalización productiva responde a exigencias diferentes según el tipo de proceso, el peso de la ingeniería, la complejidad del flujo físico y la presión de calidad.

El índice global (49,50) sugiere que el avance no depende solo de la tecnología industrial instalada, sino de su capacidad de conectarse con sistemas de gestión y con rutinas de decisión.

#### Maquinaria y equipo (CNAE 28)

Este subsector combina una base de gestión con una realidad de planta propia. Sus niveles medios de IoT (5,02), robótica (5,31), big data (4,76) y trazabilidad (5,44) muestran que la digitalización productiva responde a exigencias diferentes según el tipo de proceso, el peso de la ingeniería, la complejidad del flujo físico y la presión de calidad.

El índice global (53,64) sugiere que el avance no depende solo de la tecnología industrial instalada, sino de su capacidad de conectarse con sistemas de gestión y con rutinas de decisión.

#### Metalurgia y primera transformación (CNAE 24)

Este subsector combina una base de gestión con una realidad de planta propia. Sus niveles medios de IoT (4,98), robótica (4,62), big data (4,96) y trazabilidad (5,47) muestran que la digitalización productiva responde a exigencias diferentes según el tipo de proceso, el peso de la ingeniería, la complejidad del flujo físico y la presión de calidad.

El índice global (49,44) sugiere que el avance no depende solo de la tecnología industrial instalada, sino de su capacidad de conectarse con sistemas de gestión y con rutinas de decisión.

### 5.2.2. Implicaciones operativas

La primera implicación es metodológica:

- Conviene comenzar por una línea, proceso o familia de producto crítica, en lugar de intentar una cobertura total desde el inicio.
- Un piloto bien instrumentado, con objetivos de negocio definidos y trazabilidad de resultados, genera aprendizaje más útil que una implantación extensa sin criterios de priorización.

La segunda implicación es organizativa:

- La digitalización productiva necesita responsables claros de proceso y una conexión estable con mantenimiento, calidad y sistemas.
- Sin esa gobernanza mínima, la sensorización se convierte en un repositorio de señales sin lectura operativa.

La tercera es económica:

- En muchos casos, el retorno no proviene de reducir mano de obra directa, sino de disminuir pérdidas ocultas (paradas, scrap, consumos, reprocesos, urgencias...) que solo aparecen cuando la operación se mide con suficiente disciplina.

Figura 5.4: Digitalización de procesos productivos



### 5.3. DIGITALIZACIÓN DE GESTIÓN EMPRESARIAL

La digitalización de gestión es la dimensión más consolidada del diagnóstico. La facturación electrónica (87,5%), el ERP (62,9%), el cloud (57,1%) y el CRM (46,4%) evidencian que el sector ha recorrido una parte importante del camino en sus procesos administrativos, documentales, comerciales y de coordinación básica.

Esta situación tiene una explicación funcional.

- Las herramientas de gestión suelen ofrecer retornos más visibles a corto plazo, requieren menores transformaciones físicas sobre la planta y responden a necesidades administrativas cada vez más exigentes.
- Además, muchas de ellas actúan como requisitos de acceso a cadenas de suministro más profesionalizadas, a clientes de mayor tamaño y a circuitos de trazabilidad documental que ya no admiten procedimientos puramente manuales.

La **facturación electrónica** es el ejemplo más claro de estandarización.

- Su penetración muy elevada indica que ha dejado de ser una innovación para convertirse en una práctica operativa normalizada.
- Pero el mayor valor de esta digitalización básica no está en sustituir papel, sino en crear trazabilidad administrativa, integridad del registro y conexión con contabilidad, pedidos, albaranes y archivo electrónico.

El **ERP** ocupa un lugar central en esta dimensión.

- Es la espina dorsal de la gestión integrada y la principal fuente transaccional de datos de negocio.
- No obstante, el estudio muestra que el rendimiento real del ERP depende mucho más de la calidad de la implantación que de su mera existencia.
- Un ERP puede convivir con hojas de cálculo paralelas, con maestros inconsistentes, con registros incompletos o con módulos críticos infrautilizados, lo que reduce drásticamente su capacidad para coordinar compras, almacén, producción, calidad o mantenimiento.

La adopción de **servicios cloud** marca otro cambio estructural.

- La nube facilita continuidad operativa, colaboración, acceso remoto y reducción de dependencia de infraestructura local. Sin embargo, la migración a cloud no equivale automáticamente a madurez. Para capturar todo su valor, debe acompañarse de control de identidades, clasificación de información, políticas de copias, diseño de permisos y prácticas de ciberseguridad coherentes con el riesgo real del negocio.

El CRM, por su parte, ofrece una visión muy interesante del nivel de profesionalización comercial.

- En un entorno B2B industrial, donde la relación con el cliente se apoya en ofertas técnicas, seguimiento de incidencias, negociación de plazos y posventa, disponer de CRM supone un avance relevante.
- Aun así, su madurez depende de la calidad del proceso comercial que lo acompaña.
- Sin criterios homogéneos de oportunidad, seguimiento, motivos de pérdida o integración con entrega y servicio, el CRM corre el riesgo de convertirse en una agenda avanzada, pero no en un verdadero sistema de gestión relacional.

La principal debilidad de la digitalización de gestión no es, por tanto, la falta de herramientas, sino la insuficiente integración funcional entre ellas.

En numerosas empresas, el circuito comercial, el financiero, el operativo y el documental siguen manteniendo fricciones informativas: datos que se recapturan, estados que no coinciden, informes manuales y visibilidad parcial sobre el estado real del negocio. Estas fricciones consumen tiempo, generan errores y dificultan la toma de decisiones ágil.

Desde un punto de vista de madurez, la gestión empresarial actúa como la primera capa de orden. Allí donde esta capa está bien resuelta, se crean condiciones favorables para avanzar hacia:

- Inteligencia de negocio (BI).
- trazabilidad avanzada
- planificación más robusta
- integración de planta
- automatización de decisiones

Allí donde no lo está, el resto de iniciativas digitales se apoya sobre una base demasiado frágil. En consecuencia, la mejora de la gestión empresarial sigue siendo una prioridad estratégica incluso en empresas que ya han dado pasos relevantes.

Figura 5.5: Digitalización de gestión empresarial



### 5.3.1. Interpretación cualitativa

- En microempresas, la prioridad suele estar en asegurar una base mínima segura y sostenible en el tiempo: pedidos, facturas, cobros, copias y control de acceso.
- La limitación principal no es siempre presupuestaria; con frecuencia es de tiempo directivo y de ausencia de roles específicos para sostener la disciplina de los datos.
- En pequeñas empresas, el gran salto de valor suele venir de conectar comercial, compras, almacén y un mínimo de producción. Muchas organizaciones de este tamaño ya tienen ERP, pero con cobertura parcial; una mejora de parametrización y de uso puede aportar retornos significativos sin grandes inversiones adicionales.
- En medianas y grandes compañías, el reto deja de ser la implantación aislada y pasa a ser la arquitectura. Aparecen problemas de integración, coexistencia de soluciones heredadas, necesidades de reporting transversal y exigencias crecientes de gobierno y seguridad.

## 5.4. INTEGRACIÓN DE SISTEMAS Y USO DEL DATO

La distancia entre disponer de sistemas y utilizarlos como un ecosistema coherente sigue siendo una de las principales limitaciones del sector.

El contraste entre la adopción de ERP (62,9%) y la de BI (36,2%) ilustra con claridad este punto: una parte significativa de la información se captura, pero no se convierte todavía en inteligencia sistemática para el gobierno del negocio.

El problema tiene varias capas.

- La primera es técnica: coexistencia de aplicaciones no integradas, exportaciones manuales, duplicidades y ausencia de conectores estables.
- La segunda es semántica: definiciones distintas para clientes, artículos, estados, incidencias o familias de producto.
- La tercera es organizativa: nadie es plenamente responsable de la calidad del dato y, por tanto, los errores persisten, se toleran o se corrigen tarde.

Cuando estas tres capas coinciden, la empresa dispone de mucha información, pero de poca confianza sobre ella.

El gobierno del dato emerge así como uno de los factores más determinantes de la madurez digital. Gobernar no significa burocratizar, sino acordar definiciones básicas, asignar propietarios, establecer controles simples y garantizar que la información crítica se registra una sola vez y con criterios homogéneos.

En muchas PYMES industriales, este tipo de medidas produce más impacto que la adquisición de una herramienta adicional, precisamente porque mejora la fiabilidad del sistema ya existente.

La integración entre oficina y planta añade complejidad específica al sector metal. Los entornos OT y TI operan con lógicas, cadencias y riesgos distintos, y su conexión exige más que interoperabilidad técnica; requiere comprensión compartida del proceso industrial. Sin esa conexión, es difícil relacionar un problema de calidad con parámetros de máquina, un retraso de entrega con paradas no registradas o un incremento de coste con pérdidas ocultas de planta.

La trazabilidad digital, con una media de 5,25/9, ofrece una señal relativamente más positiva.

- Indica que muchas empresas han avanzado en el seguimiento de materiales, lotes, series o componentes críticos.

- Sin embargo, la trazabilidad sigue siendo incompleta allí donde el flujo debe mantenerse continuo desde la entrada de material hasta la expedición, pasando por operaciones, incidencias, controles y certificaciones.
- La falta de continuidad informativa limita la velocidad de respuesta ante reclamaciones, auditorías o necesidades de análisis causal.

El uso efectivo del dato también depende de la manera en que la empresa define su cuadro de mando.

- Cuando se intentan monitorizar decenas de KPIs mal definidos, el resultado suele ser dispersión y baja utilización.
- En cambio, un catálogo breve pero bien diseñado (servicio, rechazo, plazos, rotación, OEE, incidencias, consumo...) permite generar hábitos de revisión y conversación de gestión mucho más útiles.
- La madurez analítica empieza casi siempre por la selección y estabilización de unas pocas métricas decisivas.

Otro aspecto relevante es el tiempo de preparación de la información. En organizaciones con baja integración, gran parte del esfuerzo de análisis se consume en buscar datos, conciliarlos o comprobar su validez. Esa energía no se dedica a interpretar, anticipar o decidir, sino a reconstruir la realidad. La digitalización solo empieza a cambiar la calidad directiva cuando la preparación del dato deja de ser la tarea principal y se convierte en una rutina automatizada y confiable.

Por todo ello:

- La integración de sistemas y el uso del dato no deben considerarse apartados de soporte, sino el centro del salto cualitativo que necesita el sector.
- Muchas de las mejoras futuras en automatización, IA, calidad predictiva o mantenimiento basado en condición dependerán menos de la compra de nuevas soluciones que de la capacidad para ordenar, conectar y confiar en la información existente.

Figura 5.6: Integración de sistemas y uso del dato



#### 5.4.1. Principales brechas observadas

- Persistencia de hojas de cálculo (Excel) paralelas para consolidar información de sistemas ya implantados.
- Datos maestros inconsistentes o no gobernados, especialmente en artículos, clientes, listas de materiales y estados de proceso.
- Integración incompleta entre calidad, mantenimiento, producción y gestión comercial.
- Reporting tardío o elaborado manualmente, con escasa capacidad para la decisión en tiempo real.
- Baja estandarización de indicadores y dificultad para comparar resultados entre líneas, plantas o periodos.

#### 5.4.2. Líneas de mejora con mayor retorno

- Inventario de sistemas y mapa de flujos de datos para identificar duplicidades, vacíos y puntos de recaptura manual.
- Definición de un diccionario de datos maestros con responsables por dominio de información.
- Implantación de una primera capa estable de BI centrada en un número reducido de KPIs críticos.
- Automatización del reporting recurrente y revisión periódica de calidad de datos.
- Priorización de integraciones con mayor impacto de negocio antes de abordar arquitecturas más complejas.

### 5.5. AUTOMATIZACIÓN, ROBOTIZACIÓN Y SENSORIZACIÓN

La automatización y la robotización son dimensiones con una larga trayectoria en la industria del metal, pero el estudio pone de manifiesto que su evolución hacia modelos conectados sigue siendo desigual.

La media de robótica/automatización se sitúa en 4,77/9 y la de integración IoT en producción en 4,59/9, valores que describen una realidad de implantación moderada, heterogénea y todavía lejos de una automatización inteligente generalizada.

Esta situación debe interpretarse con matices. En muchas empresas, la automatización ya ha aportado beneficios claros en precisión, seguridad, repetibilidad o capacidad productiva. Sin embargo, esos beneficios no siempre se traducen en una mejor gobernanza operativa porque la señal producida por la máquina no entra en un sistema de lectura transversal. En otras palabras, la empresa automatiza, pero no necesariamente aprende de manera sistemática a partir de esa automatización.

La sensorización es el punto de inflexión.

- Incorporar sensores o explotar señales existentes de PLC y control industrial permite medir estados, vibraciones, tiempos, temperaturas, consumos, incidencias y variables de proceso con mucha mayor granularidad.
- Pero medir no es suficiente: la empresa necesita un modelo mínimo de datos, una taxonomía de eventos, umbrales de interpretación y una rutina de uso por parte de mandos, mantenimiento y calidad.
- Sin esta capa, la sensorización corre el riesgo de quedar infrutilizada.

El mantenimiento de maquinaria:

- El mantenimiento predictivo, con una adopción del 35,3%, representa de forma muy clara esta tensión entre potencial y madurez efectiva.
- El predictivo es una de las aplicaciones más atractivas de la digitalización industrial, pero también una de las que más dependen de datos fiables y contexto operativo.
- Requiere históricos consistentes, variables bien elegidas, conocimiento del modo de fallo y protocolos de respuesta.
- Allí donde estos elementos no existen, la iniciativa queda en piloto o produce alertas difíciles de convertir en acción.

La robotización aporta asimismo una lectura estratégica en clave de personas.

- En el paradigma de Industria 5.0, la automatización no persigue solo sustituir tareas, sino configurar entornos más seguros, ergonómicos y resilientes.
- En operaciones de manipulación de carga, soldadura, entornos calientes o tareas repetitivas, la robotización y la sensorización pueden reducir exposición al riesgo y liberar a la plantilla para funciones de mayor valor añadido.
- Este aspecto es especialmente relevante en un contexto de envejecimiento de parte del personal cualificado y de dificultad para captar determinados perfiles.
- La relación entre automatización y eficiencia energética tampoco debe subestimarse. En procesos intensivos, medir correctamente tiempos de funcionamiento, cargas parciales, consumos y estados permite identificar pérdidas que rara vez son visibles con métodos tradicionales.
- La automatización conectada, por tanto, no solo mejora output y calidad; también puede convertirse en una herramienta potente de sostenibilidad y de control de costes, especialmente bajo el actual entorno energético y regulatorio.

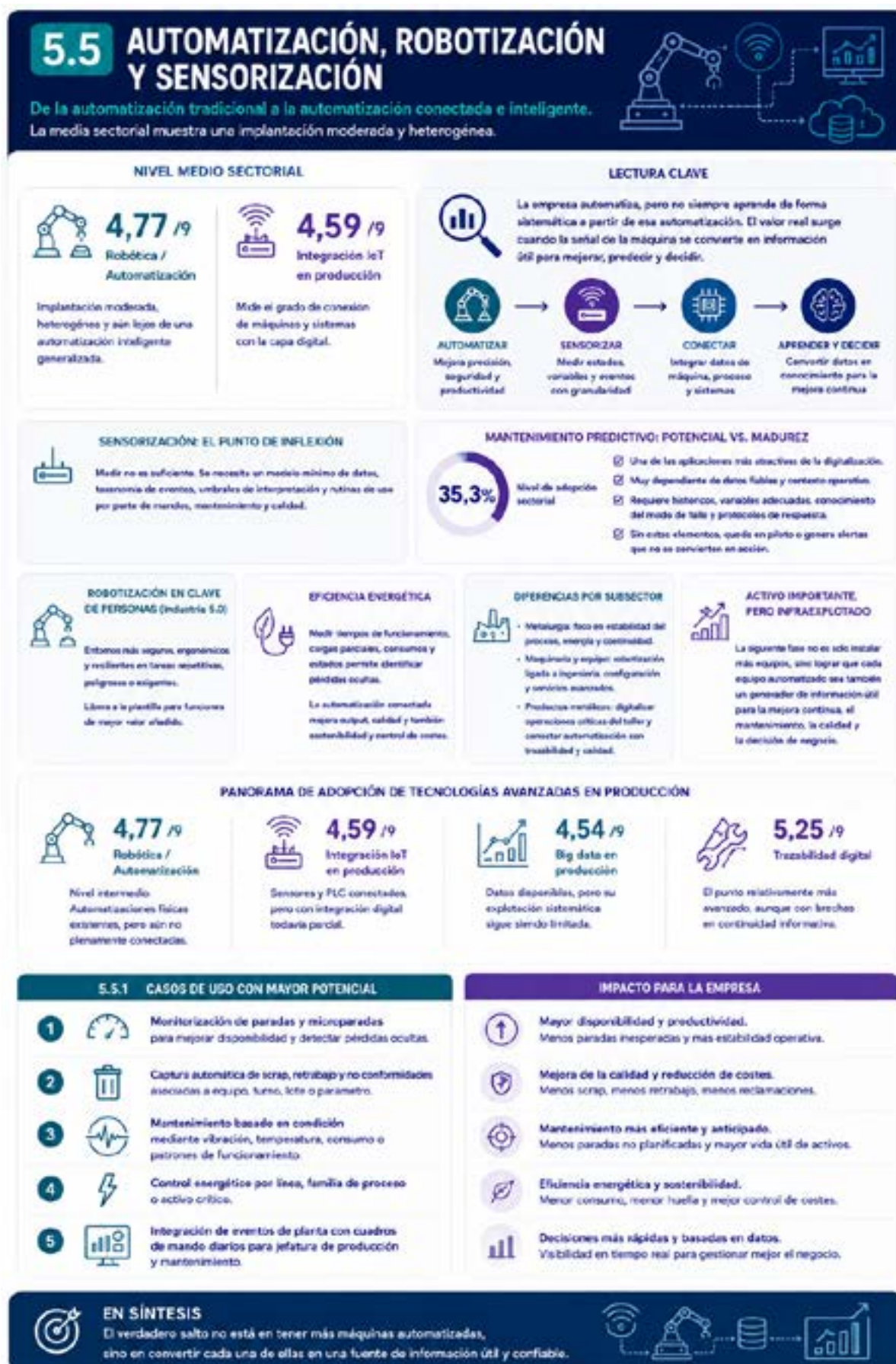
Las diferencias por subsector y tamaño vuelven a ser decisivas.

- En metalurgia, la sensorización se vincula con estabilidad del proceso, energía y continuidad operativa.
- En maquinaria y equipo, la robotización se combina con ingeniería, configuración y servicios avanzados.
- En productos metálicos, donde pesa más la pyme, el salto de valor suele provenir de digitalizar operaciones críticas del taller y conectar automatización disponible con trazabilidad y calidad.
- La estrategia correcta, por tanto, no es uniforme; depende del patrón productivo real de cada empresa.

En conjunto, la automatización sectorial ya constituye un activo importante, pero todavía infra explotado desde el punto de vista informacional.

La siguiente fase no consiste solo en instalar más equipos, sino en lograr que cada equipo automatizado se convierta también en un generador de información útil para la mejora continua, el mantenimiento, la calidad y la decisión de negocio.

Figura 5.7: Automatización, robotización y sensorización



### 5.5.1. Casos de uso con mayor potencial

Monitorización de paradas y microparadas para mejorar disponibilidad y detectar pérdidas ocultas.

- Captura automática de scrap, retrabajo y no conformidades asociadas a equipo, turno, lote o parámetro.
- Mantenimiento basado en condición mediante vibración, temperatura, consumo o patrones de funcionamiento.
- Control energético por línea, familia de proceso o activo crítico.
- Integración de eventos de planta con cuadros de mando diarios para jefatura de producción y mantenimiento.

### 5.6. USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y ANALÍTICA AVANZADA

La inteligencia artificial y la analítica avanzada constituyen la frontera más exigente del proceso de digitalización sectorial.

- La adopción de IA aplicada al negocio se sitúa en 17,4%,
- la de IA generativa en 28,1%
- la de agentes autónomos en 8,0%.

Estas cifras muestran que el sector ya ha incorporado estas tecnologías al debate directivo y a ciertas prácticas de uso, pero todavía se encuentra en una etapa temprana de despliegue estructural.

La diferencia entre IA generativa e IA aplicada al negocio es particularmente reveladora.

- La primera se difunde con rapidez porque ofrece un valor casi inmediato en tareas de redacción, síntesis, soporte documental o asistencia general. Requiere poca integración y puede ser utilizada de forma individual.
- La segunda, en cambio, necesita datos históricos limpios, conectividad entre sistemas, definición de variables objetivo, trazabilidad de procesos y supervisión del modelo. Por eso su penetración es necesariamente menor.

La consecuencia práctica es que muchas empresas pueden experimentar con IA sin haber resuelto todavía su arquitectura de información.

Esto genera una paradoja frecuente:

- Existe entusiasmo por la herramienta, pero baja capacidad para industrializar su uso.
- Cuando la base de datos es débil, el resultado suele ser dispersión de pilotos, expectativas infladas o resultados poco sostenibles.
- La IA se convierte entonces en una promesa tecnológica más que en una capacidad operativa.

La presencia de BI en el 36,2% de la muestra ayuda a contextualizar este escenario.

- La analítica descriptiva y diagnóstica todavía no está madura en buena parte del tejido empresarial, por lo que el salto directo a capacidades predictivas o autónomas resulta prematuro para muchas organizaciones.

- En términos de secuencia de madurez, primero debe consolidarse la visibilidad del negocio, luego la analítica recurrente y solo después la IA con capacidad de generar recomendaciones o acciones más avanzadas.

A pesar de esta inmadurez relativa, el potencial sectorial es muy alto.

La IA puede aportar valor en mantenimiento predictivo, previsión de demanda, secuenciación de producción, control de calidad por visión artificial, clasificación de documentación técnica, búsqueda asistida sobre manuales y soporte a compras o ingeniería.

En estas aplicaciones, el valor no proviene de sustituir criterio humano, sino de acelerar el acceso a información relevante, detectar patrones no evidentes y reducir incertidumbre operativa.

La adopción de visión artificial (18,8%) ofrece una pista complementaria. Aunque todavía minoritaria, su presencia indica que existen casos de uso reales en inspección, medición, seguridad y apoyo a la automatización.

La combinación futura entre visión, analítica avanzada e IA puede ser especialmente transformadora en tareas de control de calidad, clasificación de defectos y asistencia al operario.

Los agentes autónomos merecen una lectura prudente.

- Con una penetración aún muy baja, sus usos más realistas a corto plazo parecen ser aquellos en los que actúan bajo supervisión, con alcance acotado y sobre dominios documentales o procedimentales bien definidos.
- Pretender una autonomía elevada sin un marco robusto de control, trazabilidad y calidad de datos incrementa el riesgo de error y reduce la confianza en la tecnología.

Desde una óptica de madurez, el principal mensaje es que la IA no debe abordarse como atajo, sino como capa superior de una arquitectura bien ordenada.

Las empresas que resuelvan antes sus problemas de datos, integración y reporting serán las que podrán capturar valor real de la IA. Las demás tenderán a quedarse en usos periféricos o poco escalables.

En este sentido, la inteligencia artificial actúa como espejo de la madurez digital global: no sustituye los fundamentos, los pone a prueba.

Figura 5.8: Uso de IA y analítica avanzada



### 5.6.1. Secuencia recomendada de adopción

1. Ordenar y depurar datos maestros, históricos operativos y catálogos básicos.
2. Estabilizar cuadros de mando y reporting recurrente con indicadores consensuados.
3. Seleccionar casos de uso de analítica con impacto claro en negocio o producción.
4. Pilotar IA en ámbitos concretos con supervisión humana y métricas de resultado.
5. Escalar solo aquellas aplicaciones que demuestren fiabilidad, trazabilidad y retorno.

## 5.7. IMPLICACIONES ESTRATÉGICAS DEL DIAGNÓSTICO

- El sector dispone de una base suficiente para acelerar, pero no de una madurez tan elevada como para confiar en una evolución espontánea. La consolidación de la digitalización exigirá priorización, acompañamiento y una mayor profesionalización del gobierno del dato.
- La brecha principal ya no se encuentra solo entre empresas con o sin tecnología, sino entre empresas capaces o no de integrarla y explotarla. La ventaja competitiva tenderá a desplazarse desde la posesión de herramientas hacia la capacidad de orquestarlas.
- La competitividad industrial futura dependerá crecientemente de la conexión entre productividad, ciberseguridad, sostenibilidad y resiliencia. En el sector del metal, estos elementos convergen en la digitalización: medir mejor, decidir antes, mantener con más precisión y responder con más trazabilidad.
- La política de apoyo al sector no debería centrarse exclusivamente en subvencionar hardware o software, sino también en capacidades: formación, acompañamiento a implantación, modelos de gobierno, estándares de datos y cooperación entre empresas, clusters y hubs.
- El avance hacia Industria 5.0 requerirá mantener una mirada equilibrada entre tecnología, personas y sostenibilidad. La transformación digital será más sólida si contribuye a seguridad, ergonomía, eficiencia energética y aprendizaje organizativo, no solo a automatizar tareas.

## 5.8. CONCLUSIONES OPERATIVAS

- El diagnóstico muestra un sector que ya ha superado el umbral de la digitalización básica, pero que todavía no ha generalizado una madurez digital avanzada y homogénea.
- La base existe; el reto es densificarla.
- La gestión empresarial es la capa más consolidada, mientras que la integración de sistemas, el uso del dato, la analítica avanzada y la inteligencia artificial siguen actuando como principales fronteras de desarrollo.
- La digitalización productiva avanza, pero todavía con un fuerte componente de islas tecnológicas. El salto necesario es pasar de automatización instalada a automatización conectada y explotada analíticamente.
- El tamaño empresarial sigue siendo el principal determinante de la brecha, aunque no explica por sí solo las diferencias. La existencia de liderazgo, disciplina de dato y gobernanza operativa también marca distancias claras.

La siguiente etapa del estudio debe convertir este diagnóstico en una agenda de actuación priorizada, con barreras, palancas, recomendaciones por segmento y una cartera de proyectos viables para los próximos veinticuatro meses.

## 6. BRECHAS Y RETOS PARA LA DIGITALIZACIÓN

La transformación digital de la industria española del metal se encuentra en un punto de inflexión crítico. Tras analizar el estado actual de madurez digital del sector, que sitúa su índice sintético medio en un 50,4 sobre 100, se evidencia que la industria ha superado las fases iniciales de informatización básica.

La adopción generalizada de herramientas transaccionales como la facturación electrónica (87,5%) y la penetración significativa de sistemas ERP (62,9%) y soluciones *Cloud* (57,1%) demuestran que el tejido empresarial ha comprendido la necesidad ineludible de digitalizar sus procesos administrativos y de gestión.

Sin embargo, este barniz de modernización administrativa oculta una realidad operativa mucho más compleja y fragmentada. La verdadera promesa de la Industria 4.0 y el paradigma emergente de la Industria 5.0 no residen en la mera sustitución del papel por el formato digital, sino en la interconexión profunda de los activos físicos, la explotación analítica de los datos en tiempo real y la reconfiguración de los modelos de negocio. Es en esta transición desde una “digitalización funcional” hacia una “digitalización integrada y conectada” donde afloran las brechas estructurales y los retos más formidables para el sector.

El presente capítulo disecciona estas fracturas desde una perspectiva de consultoría estratégica y de calidad. El análisis empírico de la muestra nacional de 318 empresas revela que la digitalización en el sector metal-mecánico no avanza de manera uniforme. Por el contrario, se ve condicionada por vectores de asimetría muy pronunciados. La adopción de tecnologías de frontera, como la Inteligencia Artificial aplicada al negocio (17,4%), el Business Intelligence (36,2%) o el mantenimiento predictivo (35,3%), sigue siendo minoritaria y se concentra en nichos muy específicos del ecosistema industrial.

Para comprender la anatomía de este estancamiento relativo en las capas superiores de madurez digital, es imperativo abandonar las lecturas monolíticas. La industria del metal es un mosaico de realidades operativas. Por ello, este capítulo estructura el diagnóstico de las brechas y retos en cuatro dimensiones fundamentales:

1. **La dimensión demográfica (Tamaño empresarial):** Cómo la escala de la organización determina la capacidad de inversión, la absorción tecnológica y la complejidad de la integración.
2. **La dimensión operativa (Subsector industrial):** Cómo la naturaleza del proceso productivo (continuo vs. discreto, bajo pedido vs. serie) dicta prioridades tecnológicas divergentes.
3. **La dimensión infraestructural (Barreras tecnológicas y de inversión):** Los obstáculos inherentes a la convergencia OT/IT, la deuda tecnológica, la ciberseguridad y el retorno de inversión (ROI).
4. **La dimensión humana (Barreras organizativas y culturales):** El déficit de talento híbrido, la resistencia al cambio, el relevo generacional y la ausencia de un liderazgo digital formalizado.

Abordar estos retos exige rigor analítico. No se trata de prescribir la adopción indiscriminada de tecnologías disruptivas, sino de identificar los cuellos de botella exactos que impiden a las empresas del metal consolidar sus cimientos digitales para, posteriormente, escalar hacia la excelencia operativa.

A continuación, se desglosan exhaustivamente cada una de estas brechas.

### 6.1. BRECHA DIGITAL POR TAMAÑO EMPRESARIAL

El tamaño de la organización emerge en este diagnóstico no como una simple variable descriptiva, sino como el principal determinante estructural de la madurez digital en la industria del metal. En un sector donde el 96,9% del tejido está compuesto por Pequeñas y Medianas Empresas (PYMES), la escala define la capacidad de inversión (CAPEX/OPEX), la disponibilidad de talento especializado, la complejidad de los procesos a integrar y, fundamentalmente, el ancho de banda directivo disponible para liderar la transformación.

Los datos revelan una fractura profunda que va más allá de la dicotomía “tener o no tener”; tecnología; se trata de una brecha en la capacidad organizativa para gobernar el dato y extraer valor de él.

A continuación, se analiza la fenomenología de esta brecha estratificada por los cuatro grandes segmentos empresariales.

### 6.1.1. Microempresas (<10 empleados): El reto de la supervivencia y la ciberhigiene

Las microempresas, que representan el 20,1% de la muestra analizada, se encuentran mayoritariamente en lo que el modelo de madurez define como “Rezago estructural” o en las fases más tempranas de la “Transición”. Su realidad operativa está marcada por la inmediatez y la limitación extrema de recursos.

- **Adopción tecnológica crítica:** La penetración de sistemas ERP y Cloud se sitúa en un exiguo 31,1%, mientras que herramientas analíticas como el Business Intelligence (13,3%) o la Inteligencia Artificial (4,4%) son prácticamente inexistentes.
- **El cuello de botella directivo:** En estas organizaciones, la gerencia asume múltiples roles simultáneos (producción, comercial, finanzas). La digitalización se percibe a menudo como una carga administrativa adicional (“alimentar al sistema”) más que como un facilitador. El tiempo es el recurso más escaso, lo que impide la reflexión estratégica necesaria para rediseñar procesos.
- **Vulnerabilidad cibernética:** Con solo un 24,4% de adopción de medidas de ciberseguridad avanzada, las microempresas son el eslabón más débil de la cadena de suministro. A menudo operan con infraestructuras informáticas domésticas, sin políticas de copias de seguridad verificadas (regla 3-2-1) ni autenticación multifactor (MFA). Un ataque de ransomware en este estrato no solo paraliza la producción, sino que amenaza la viabilidad misma del negocio.
- **El reto principal:** El objetivo para este segmento no es la Industria 4.0, sino la consolidación de una base operativa segura. El reto radica en digitalizar el ciclo administrativo básico (pedidos-facturas-albaranes) sin generar fricción, externalizando la complejidad tecnológica mediante soluciones SaaS (Software as a Service) de muy bajo código y alta usabilidad.

### 6.1.2. Pequeñas empresas (10-49 empleados): El síndrome de las “islas de información”

Este segmento constituye el núcleo duro del sector (50,4% de la muestra). Han superado la fase de supervivencia básica y cuentan con una estructura organizativa incipiente, pero se enfrentan a la complejidad de la integración. Es el estrato donde la fricción entre departamentos se hace más evidente.

- **Adopción asimétrica:** Presentan una adopción razonable de ERP (61,9%) y Cloud (58,4%), pero una caída drástica en la explotación de datos (BI al 33,6%). Esto indica que capturan datos transaccionales, pero no los utilizan para la toma de decisiones proactiva.
- **Proliferación de silos:** El reto definitorio de la pequeña empresa del metal es la desconexión. Es habitual encontrar un software de contabilidad, un CRM (48,7%) utilizado solo por ventas, un software CAD/CAM en la oficina técnica y hojas de cálculo (Excel) actuando como el verdadero “sistema de planificación” en el taller. Esta falta de interoperabilidad obliga a la reintroducción manual de datos, multiplicando los errores (por ejemplo, discrepancias entre la lista de materiales de ingeniería y la orden de fabricación real).
- **Infrautilización del software:** Muchas pequeñas empresas han adquirido licencias de ERP potentes, pero solo utilizan los módulos financieros y de compras, dejando inactivos los módulos de planificación de la producción (MRP) o control de calidad debido a la falta de disciplina en el mantenimiento de los datos maestros (rutas, tiempos estándar, escandallos).
- **El reto principal:** El desafío aquí es la integración horizontal. El salto cualitativo no requiere necesariamente comprar más tecnología, sino parametrizar correctamente la existente, unificar nomenclaturas y conectar el flujo comercial con la capacidad productiva real del taller.

## INSIGHT DE CONSULTORÍA: LA TRAMPA DEL EXCEL EN LA PYME INDUSTRIAL

En la pequeña empresa del metal, la hoja de cálculo es simultáneamente la herramienta más útil y el mayor freno para la digitalización. Su flexibilidad permite resolver problemas inmediatos de planificación, pero crea dependencias de “personas clave” (el único empleado que entiende las macros) y destruye la trazabilidad. Erradicar el “Excel en la sombra” y forzar el uso del ERP como única fuente de verdad es el reto cultural más duro en este segmento.

### 6.1.3. Medianas empresas (50-249 empleados): La crisis de gobernanza y la convergencia OT/IT.

Las medianas empresas (26,3% de la muestra) operan con un nivel de complejidad que exige formalización. Han alcanzado un techo de cristal donde la gestión basada en la intuición o en el control visual directo de la planta ya no es sostenible.

- **Madurez transaccional vs. inmadurez analítica:** Con un 86,4% de adopción de ERP, la captura del dato está resuelta. Sin embargo, la adopción de BI (52,5%) y de IA (25,4%) muestra que la transición hacia una empresa *Data-Driven* está a medio camino.
- **El imperativo de la gobernanza del dato:** A esta escala, los errores en los datos maestros tienen un impacto financiero severo. El reto es establecer políticas de gobierno: ¿Quién es el propietario del dato de un nuevo cliente? ¿Quién actualiza los tiempos de ciclo tras una mejora de proceso? La falta de roles formales de gestión de datos genera desconfianza en los informes del sistema.
- **La frontera OT/IT:** Las medianas empresas poseen maquinaria automatizada (CNC, células robotizadas), pero a menudo estas máquinas operan como cajas negras. El gran reto tecnológico es la convergencia entre la Tecnología de Operaciones (OT) y la Tecnología de la Información (IT). Extraer señales de los PLCs de las máquinas para alimentar un sistema MES (Manufacturing Execution System) y calcular el OEE (Overall Equipment Effectiveness) en tiempo real es el principal cuello de botella para este segmento.
- **El reto principal:** Institucionalizar la toma de decisiones basada en datos. Esto implica desplegar arquitecturas de datos robustas, implementar cuadros de mando industriales estandarizados y elevar drásticamente las defensas de ciberseguridad (actualmente al 61%), dado que la interconexión de la planta amplía exponencialmente la superficie de ataque.

### 6.1.4. Grandes empresas (>250 empleados): Gestión de la complejidad y escalado de la innovación

Aunque representan solo el 3,1% de la muestra, las grandes corporaciones actúan como líderes y empresas tractoras de la cadena de valor. Su madurez digital es alta, pero se enfrentan a retos de escala y agilidad.

- **Liderazgo tecnológico:** Superan el 85% en adopción de Cloud, ERP, CRM y BI. Son el único segmento con una penetración mayoritaria de Inteligencia Artificial (57,1%).
- **La carga de la deuda tecnológica (Legacy):** Las grandes empresas industriales suelen tener un historial de adquisiciones y expansiones que resulta en un ecosistema informático fragmentado (múltiples ERPs distintos en diferentes plantas, maquinaria antigua conviviendo con robótica de última generación). El reto es la armonización y la creación de una arquitectura empresarial unificada (Data Lakes, repositorios centrales).
- **Escalabilidad de pilotos (Pilot Purgatory):** Tienen capacidad para financiar pruebas de concepto (PoC) en tecnologías de frontera (Gemelos Digitales, Mantenimiento Predictivo avanzado, Visión Artificial). El reto organizativo es sacar estos proyectos de la fase de laboratorio y escalarlos a nivel corporativo, integrándolos en los procesos estándar de todas las plantas.

- **El reto principal:** Mantener la agilidad frente a la burocracia interna, liderar la creación de espacios de datos sectoriales (Data Spaces) para compartir información de forma segura con su cadena de suministro, y traccionar a sus proveedores (PYMES) exigiéndoles y ayudándoles a elevar sus estándares de trazabilidad y ciberseguridad.

## 6.2. BRECHA DIGITAL POR SUBSECTOR INDUSTRIAL

Tratar a la industria del metal como un ente monolítico es un error estratégico. Las necesidades de digitalización de una fundición que opera 24/7 a altas temperaturas difieren radicalmente de las de un taller de mecanizado de precisión que fabrica series cortas para el sector aeroespacial. El análisis de la muestra revela que la madurez digital y las prioridades de inversión están íntimamente ligadas a la Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE).

La brecha subsectorial no se mide tanto en el volumen de inversión, sino en la *tipología* de la tecnología adoptada. A continuación, se detallan los retos específicos de los tres grandes subsectores que componen el núcleo del estudio.

### 6.2.1. Fabricación de productos metálicos (CNAE 25): El reto de la variabilidad y el control del taller

Este es el subsector más representativo (46,0% de la muestra) y el más atomizado. Incluye actividades como la forja, estampación, tratamiento de superficies, mecanizado, calderería y fabricación de estructuras metálicas. Su índice global de madurez se sitúa en 49,5 sobre 100.

- **Naturaleza del proceso:** Se caracteriza por la fabricación discreta, a menudo bajo pedido (Make-to-Order) o ingeniería bajo pedido (Engineer-to-Order). Las series suelen ser cortas o medianas, con una altísima variabilidad de referencias.
- **El reto de la planificación dinámica:** La variabilidad constante de los pedidos hace que la planificación a capacidad finita sea extremadamente compleja. Los sistemas ERP tradicionales a menudo fracasan aquí porque asumen tiempos de ciclo estáticos. El reto es implementar sistemas de planificación avanzada (APS) que puedan recalcular rutas y cargas de máquina en tiempo real ante urgencias o averías.
- **Digitalización de la captura en planta:** En muchos talleres de mecanizado o calderería, el operario sigue apuntando los tiempos de inicio y fin de una orden de fabricación en un parte de papel. El reto crítico es la digitalización del puesto de trabajo: dotar al operario de terminales (tablets, pantallas táctiles) para imputar tiempos, declarar mermas (scrap) y consultar planos actualizados, eliminando el papel y el desfase temporal de la información.
- **Trazabilidad y Calidad:** Con una puntuación de 5,09/9 en trazabilidad, este subsector enfrenta la presión de clientes exigentes (automoción, aeronáutica) que demandan certificados de materiales y trazabilidad unitaria. El reto es automatizar la vinculación de la colada de la materia prima con el lote de producto terminado mediante tecnologías de marcaje (láser, DPM) y lectura automatizada.

### 6.2.2. Maquinaria y equipo (CNAE 28): El reto de la ingeniería, la servitización y el ciclo de vida

Representando el 27,7% de la muestra, este subsector exhibe el mayor índice de madurez digital (53,64/100). Fabrican bienes de equipo complejos, maquinaria agrícola, industrial y sistemas de elevación.

- **Naturaleza del proceso:** Alto contenido de ingeniería, diseño complejo (CAD/CAM/CAE) y ensamblaje de múltiples componentes (listas de materiales profundas y multinivel).
- **El reto de la continuidad digital (Digital Thread):** El principal obstáculo es la desconexión entre la oficina técnica (ingeniería) y la planta de producción. A menudo, los cambios de diseño (ECO - Engineering Change Orders) no fluyen automáticamente al ERP, provocando que se fabriquen piezas con versiones obsoletas de los planos. El reto es la integración bidireccional entre los sistemas PLM (Product Lifecycle Management) y el ERP/MES.

- **Servitización y modelos de negocio basados en datos:** Los fabricantes de maquinaria ya no venden solo “hierro”; venden disponibilidad y rendimiento (Equipment-as-a-Service). Para ello, necesitan dotar a sus máquinas de conectividad nativa (IoT, puntuación de 5,02/9) para monitorizarlas en las instalaciones del cliente. El reto tecnológico es desarrollar plataformas de computación en la nube seguras para recopilar telemetría global, y el reto organizativo es transformar su fuerza de ventas para comercializar contratos de mantenimiento predictivo basados en algoritmos de IA.
- **Gemelos digitales (Digital Twins):** En la fase de diseño y puesta en marcha, el reto es adoptar la simulación avanzada. El *Virtual Commissioning* permite probar el software de control (PLCs) sobre un modelo 3D de la máquina antes de construirla físicamente, reduciendo drásticamente los tiempos y costes de desarrollo.

### 6.2.3. Metalurgia y primera transformación (CNAE 24): El reto del proceso continuo, la energía y la sostenibilidad

Este subsector (21,0% de la muestra, madurez de 49,44/100) engloba la siderurgia, las fundiciones y la producción de metales básicos. Es la industria pesada por excelencia.

- **Naturaleza del proceso:** Fabricación de proceso continuo o por lotes masivos (batch). Entornos hostiles (altas temperaturas, polvo, vibraciones) que dificultan la sensorización tradicional. Altamente intensivos en consumo de energía (gas, electricidad) y materias primas.
- **El reto de la sensorización robusta y el control de variables críticas:** A diferencia del mecanizado, donde importa contar piezas, en la fundición importa controlar variables termodinámicas y químicas en tiempo real (temperatura de colada, presión, composición de la aleación). El reto es desplegar redes IIoT (Industrial IoT) con sensores capaces de sobrevivir en estos entornos y transmitir datos de alta frecuencia sin latencia (Edge Computing).
- **Eficiencia energética y descarbonización:** Ante la presión de los costes energéticos y normativas como el Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono (CBAM), la digitalización es la única vía para la supervivencia. El reto es implementar Sistemas de Gestión Energética (EMS) basados en Inteligencia Artificial que correlacionen el consumo energético con los parámetros de producción para identificar ineficiencias microscópicas y optimizar los perfiles de calentamiento de los hornos.
- **Analítica avanzada para la reducción de mermas:** En procesos de fundición, un defecto (porosidad, rechupes) a menudo no se detecta hasta las fases finales de mecanizado, habiendo desperdiciado energía y tiempo. El reto es utilizar modelos de *Machine Learning* que analicen el histórico de cientos de variables de proceso para predecir la probabilidad de defecto de una colada antes de que se solidifique, permitiendo ajustes correctivos en tiempo real.

Figura 6.1: Brecha digital por subsector industrial.



### 6.3. BARRERAS TECNOLÓGICAS Y DE INVERSIÓN

La voluntad de digitalizar choca frecuentemente con la dura realidad de la infraestructura existente y las limitaciones financieras. La industria del metal es intensiva en capital (CAPEX); las máquinas herramienta, los hornos y las prensas están diseñados para durar décadas. Esta longevidad de los activos físicos genera un desfase temporal masivo respecto a la velocidad de obsolescencia del software y las tecnologías de la información. Las barreras tecnológicas y de inversión se entrelazan, creando un ecosistema donde el riesgo percibido a menudo paraliza la toma de decisiones.

#### 6.3.1. La deuda tecnológica y el desafío de la interoperabilidad (Legacy Systems)

La barrera tecnológica más habitual en las plantas del metal es la heterogeneidad del parque de maquinaria. En una misma nave pueden convivir un centro de mecanizado de 5 ejes de última generación con conectividad nativa, junto a una prensa excéntrica de hace 30 años controlada por relés o por un PLC obsoleto y cerrado.

- **Falta de estándares de comunicación:** Históricamente, los fabricantes de maquinaria industrial han utilizado protocolos propietarios y cerrados para retener a sus clientes. Extraer datos de estas máquinas requiere costosos proyectos de ingeniería inversa o la instalación de hardware adicional (pasarelas IoT, sensores *bolt-on*). Aunque estándares abiertos como OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) o MTConnect están ganando tracción, su penetración en el parque instalado es aún baja.
- **El coste de la integración:** Conectar una máquina antigua a un sistema MES moderno a menudo cuesta más en horas de integración y consultoría que el propio hardware de sensorización. Esta barrera desincentiva a las PYMES, que ven cómo el presupuesto se consume en “fontanería digital” antes de poder visualizar un solo indicador de rendimiento (OEE).
- **Sistemas IT monolíticos:** La deuda tecnológica no solo afecta a la planta (OT), sino también a las oficinas (IT). Muchas empresas operan con ERPs altamente customizados (*hard-coded*) implantados hace 15 años. Actualizar estos sistemas para conectarlos a la nube o integrarlos con herramientas de BI modernas resulta prohibitivo y arriesgado, generando un efecto de “bloqueo” (*vendor lock-in*).

### 6.3.2. La convergencia OT/IT y la fragmentación de la arquitectura

La Industria 4.0 exige que los datos fluyan sin fricción desde el sensor en la máquina (OT - Operational Technology) hasta el cuadro de mando financiero en la nube (IT - Information Technology). Sin embargo, estos dos mundos han evolucionado históricamente de forma aislada, con filosofías, prioridades y lenguajes distintos.

- **Choque de paradigmas:** Para el mundo IT, la prioridad es la confidencialidad de los datos, el ancho de banda y las actualizaciones rápidas. Para el mundo OT, la prioridad absoluta es la seguridad física (Safety), la disponibilidad continua (24/7) y el determinismo (respuestas en milisegundos). Un reinicio del sistema por una actualización de Windows es inaceptable si detiene un horno de fundición.
- **Ausencia de una arquitectura de referencia:** Las empresas del metal a menudo adquieren tecnología de forma reactiva y fragmentada: un software para mantenimiento (CMMS) por aquí, un sistema de calidad por allá, un SCADA para una línea nueva. El resultado es una arquitectura “espagueti”, donde las integraciones punto a punto son frágiles y difíciles de mantener. El reto es adoptar arquitecturas modernas, como el modelo Hub-and-Spoke o el uso de Brokers de mensajería (MQTT) y plataformas de datos industriales (Data Lakes) que actúen como única fuente de verdad.

### 6.3.3. El déficit de gobernanza y calidad del dato

La adopción de tecnologías avanzadas como la Inteligencia Artificial (17,4%) o el mantenimiento predictivo (35,3%) se ve frenada no por la falta de algoritmos, sino por la pésima calidad de los datos subyacentes. En el argot tecnológico: *Garbage In, Garbage Out* (Basura entra, basura sale).

- **Datos sucios y no estructurados:** Los algoritmos de *Machine Learning* requieren grandes volúmenes de datos históricos limpios, etiquetados y contextualizados. En muchas empresas del metal, los registros de paradas de máquina indican “avería mecánica” sin especificar el componente, o los partes de calidad se rellenan a mano al final del turno, perdiendo la correlación exacta con los parámetros de la máquina en el momento del defecto.
- **Falta de semántica común:** Un mismo concepto (por ejemplo, “tiempo de preparación” o “scrap”) puede medirse de forma distinta por el departamento de producción, el de calidad y el financiero. Sin una ontología de datos unificada, las herramientas de Business Intelligence (36,2%) generan informes contradictorios, minando la confianza de la dirección en la tecnología.

#### INSIGHT DE CONSULTORÍA: LA PARADOJA DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Existe una fascinación directiva por la IA Generativa (28,1% de adopción) debido a su accesibilidad y resultados visuales inmediatos. Sin embargo, el verdadero valor competitivo en el metal reside en la IA Analítica (optimización de procesos, predicción de defectos). El reto es hacer comprender a la dirección que no se puede “comprar IA” e instalarla; la IA es la cúspide de una pirámide que requiere años de inversión previa en sensorización, integración de sistemas y limpieza de datos. Hay que “ordenar para automatizar”.

#### 6.3.4. La Ciberseguridad Industrial como barrera crítica

Con una adopción de medidas de ciberseguridad avanzada de apenas el 44,6%, el sector metal se enfrenta a un riesgo existencial. La digitalización implica abrir las redes de la fábrica (tradicionalmente aisladas o air-gapped) al mundo exterior (cloud, proveedores de mantenimiento remoto).

- **Vulnerabilidad de los sistemas OT:** Los PLCs y sistemas SCADA antiguos no fueron diseñados con la seguridad en mente (carecen de encriptación o autenticación robusta). Si un *malware* penetra desde la red de oficinas (IT) hacia la red de planta (OT), puede alterar recetas de aleación, desactivar alarmas de seguridad o detener líneas de producción enteras.
- **Falta de segmentación:** La barrera tecnológica aquí es la falta de segmentación de redes (arquitectura Purdue). Muchas PYMES operan con redes planas donde una cámara IP comprometida o un USB infectado introducido por un operario puede comprometer el servidor del ERP.
- **El coste de la protección:** Implementar firewalls industriales, sistemas de detección de intrusos (IDS) específicos para protocolos OT y mantener un Centro de Operaciones de Seguridad (SOC) requiere una inversión (OPEX) recurrente que muchas empresas consideran un “gasto a fondo perdido” hasta que sufren un incidente.

#### 6.3.5. Barreras de Inversión: La incertidumbre del ROI y el cambio de modelo financiero

La justificación financiera de los proyectos de digitalización es uno de los mayores frenos, especialmente en un entorno macroeconómico marcado por la inflación de costes energéticos y de materias primas.

- **Dificultad para calcular el ROI:** Mientras que el Retorno de Inversión (ROI) de una nueva máquina de corte por láser es fácil de calcular (piezas por hora), el ROI de un proyecto de gobernanza de datos, de una plataforma de integración IoT o de una mejora en ciberseguridad es difuso, indirecto y a largo plazo. Se basa en “costes evitados” (menos paradas, menos rechazos, menos ciberataques) o en “capacidades habilitadas”, lo cual es difícil de defender ante un comité de dirección tradicional.
- **Transición de CAPEX a OPEX:** El modelo de negocio del software ha cambiado de la compra de licencias perpetuas (CAPEX) a modelos de suscripción en la nube (SaaS - OPEX). Aunque esto reduce la barrera de entrada inicial, muchas PYMES industriales muestran resistencia a asumir costes fijos recurrentes que impactan directamente en su cuenta de resultados mensual, temiendo quedar cautivas del proveedor tecnológico.
- **Acceso a financiación y burocracia:** Aunque existen fondos europeos (PRTR, PERTEs), el estudio señala que la complejidad normativa, la exigencia documental y los plazos de resolución generan una barrera de entrada insalvable para las PYMES, que carecen de recursos administrativos para gestionar estas ayudas. Como resultado, los fondos tienden a concentrarse en las grandes empresas, perpetuando la brecha digital.

### 6.4. BARRERAS ORGANIZATIVAS Y CULTURALES

La falacia más peligrosa en los procesos de transformación digital es asumir que la tecnología, por sí sola, resuelve los problemas operativos. La evidencia empírica en la industria del metal demuestra sistemáticamente que los fracasos en la digitalización rara vez se deben a deficiencias del software o del hardware; casi invariablemente, el origen del fracaso es organizativo, cultural o de liderazgo. La tecnología es únicamente un habilitador; es la organización la que debe mutar para absorberla y generar valor.

El sector metal-mecánico español, caracterizado por su arraigo tradicional, estructuras jerárquicas clásicas y una fuerza laboral envejecida, se enfrenta a barreras humanas que son mucho más difíciles de dismantelar que las barreras tecnológicas. A continuación, se analizan los cuatro pilares de esta resistencia organizativa.

#### 6.4.1. Ausencia de liderazgo digital y visión estratégica

La transformación digital requiere un mandato claro desde la alta dirección. Sin embargo, el diagnóstico revela que, en una gran parte del tejido empresarial (especialmente en PYMES), la digitalización se aborda de forma táctica, reactiva y fragmentada.

- **Digitalización por inercia o subvención:** Muchas iniciativas digitales no nacen de un Plan Director Estratégico, sino del oportunismo (aprovechar una subvención del programa Kit Digital o Activa Industria) o de la presión coercitiva de un cliente tractor (por ejemplo, un fabricante de automoción que exige conexión EDI o trazabilidad en la nube). Esto genera proyectos desconectados de los objetivos reales de negocio de la empresa.
- **Delegación errónea en el departamento de TI:** Un error organizativo clásico es delegar la transformación digital exclusivamente en el responsable de informática (IT). La digitalización industrial es un proyecto de transformación de operaciones y modelo de negocio, no un proyecto de instalación de software. Si la dirección general y los responsables de planta (operaciones) no lideran el proyecto, este carecerá de la autoridad necesaria para cambiar las rutinas de trabajo en el taller.
- **Falta de cultura basada en datos (Data-Driven):** El liderazgo tradicional en el metal se ha basado a menudo en la intuición, la experiencia acumulada y el “ojo clínico” del maestro de taller. Transitar hacia una cultura donde las decisiones se toman basándose en los datos del sistema (inteligencia de negocio (BI), MES) requiere un acto de humildad directiva y un cambio profundo en los mecanismos de evaluación del rendimiento.

#### 6.4.2. El déficit de talento y la escasez de “perfiles híbridos”

El perfil tecnológico medio de la plantilla se sitúa en un modesto 4,75 sobre 9. La industria del metal se enfrenta a una “tormenta perfecta” en el mercado laboral: la escasez crónica de oficios tradicionales (soldadores, torneros, fresadores) se suma a la incapacidad para atraer talento digital nativo (científicos de datos, ingenieros de software, expertos en ciberseguridad), que suele preferir sectores más atractivos o empresas tecnológicas puras.

- **La necesidad del perfil híbrido (El “traductor”):** La barrera más crítica no es la falta de programadores puros, sino la ausencia de perfiles híbridos. La industria necesita profesionales que comprendan la metalurgia (cómo se comporta el acero en un horno, qué es el avance por diente en una fresa) y que, simultáneamente, entiendan de bases de datos, conectividad IoT y analítica. Sin estos “traductores”, los ingenieros de software diseñan soluciones que no se adaptan a la dura realidad de la planta, y los operarios rechazan herramientas que consideran inútiles.
- **Inadecuación de los planes de formación:** La formación continua en las empresas suele centrarse en el uso operativo de una herramienta específica (cómo pulsar los botones del nuevo ERP), pero rara vez aborda la alfabetización digital profunda: por qué es importante la calidad del dato, cómo interpretar un cuadro de mando o cuáles son los vectores de riesgo en ciberseguridad industrial.

#### 6.4.3. Relevo generacional, conocimiento tácito y resistencia al cambio

La pirámide demográfica de la industria del metal está fuertemente envejecida. Una proporción significativa del conocimiento crítico de la empresa reside en la cabeza de operarios y mandos intermedios veteranos que se acercan a la edad de jubilación.

- **El riesgo de la pérdida del conocimiento tácito:** El “saber hacer”; (cómo ajustar una máquina cuando el material viene con variaciones, cómo identificar un defecto por el sonido del corte) rara vez está documentado. La digitalización (mediante sistemas MES, bases de conocimiento, o Realidad Aumentada para asistencia) es la única vía para capturar y estandarizar este conocimiento antes de que desaparezca.

- **La resistencia activa y pasiva:** La introducción de tecnología en la planta a menudo se percibe como una amenaza. Los operarios veteranos pueden ver los sistemas de captura de datos (tablets a pie de máquina) como herramientas de vigilancia y control (“gran hermano”;) o como un cuestionamiento a su profesionalidad, más que como ayudas para facilitar su trabajo. Esta percepción genera resistencia pasiva: introducción de datos erróneos, boicot silencioso a los nuevos procedimientos o la excusa constante de que “el sistema va lento”.
- **El enfoque Humano-Céntrico (Industria 5.0):** Para superar esta barrera, la tecnología debe diseñarse pensando en el usuario final. Si una interfaz de usuario (HMI) requiere que un operario con guantes manchados de taladrina navegue por cinco menús para registrar una parada, el proyecto fracasará. La Industria 5.0 postula que la tecnología debe adaptarse a las capacidades y ergonomía del trabajador, utilizando interfaces intuitivas, comandos de voz o automatización invisible (sensores que registran la parada sin intervención humana).

#### INSIGHT DE CONSULTORÍA: LA GESTIÓN DEL CAMBIO COMO FACTOR CRÍTICO DE ÉXITO

En proyectos de implantación de sistemas MES o ERP en el sector metal, se estima que el 70% del esfuerzo debe dedicarse a la gestión del cambio organizativo y solo el 30% a la configuración técnica. Explicar el “por qué” (el propósito de la digitalización para la supervivencia de la empresa) es mucho más importante que explicar el “cómo” (el manual de uso del software). Involucrar a los operarios clave (Key Users) desde la fase de diseño y selección de la tecnología es la estrategia más efectiva para desactivar la resistencia.

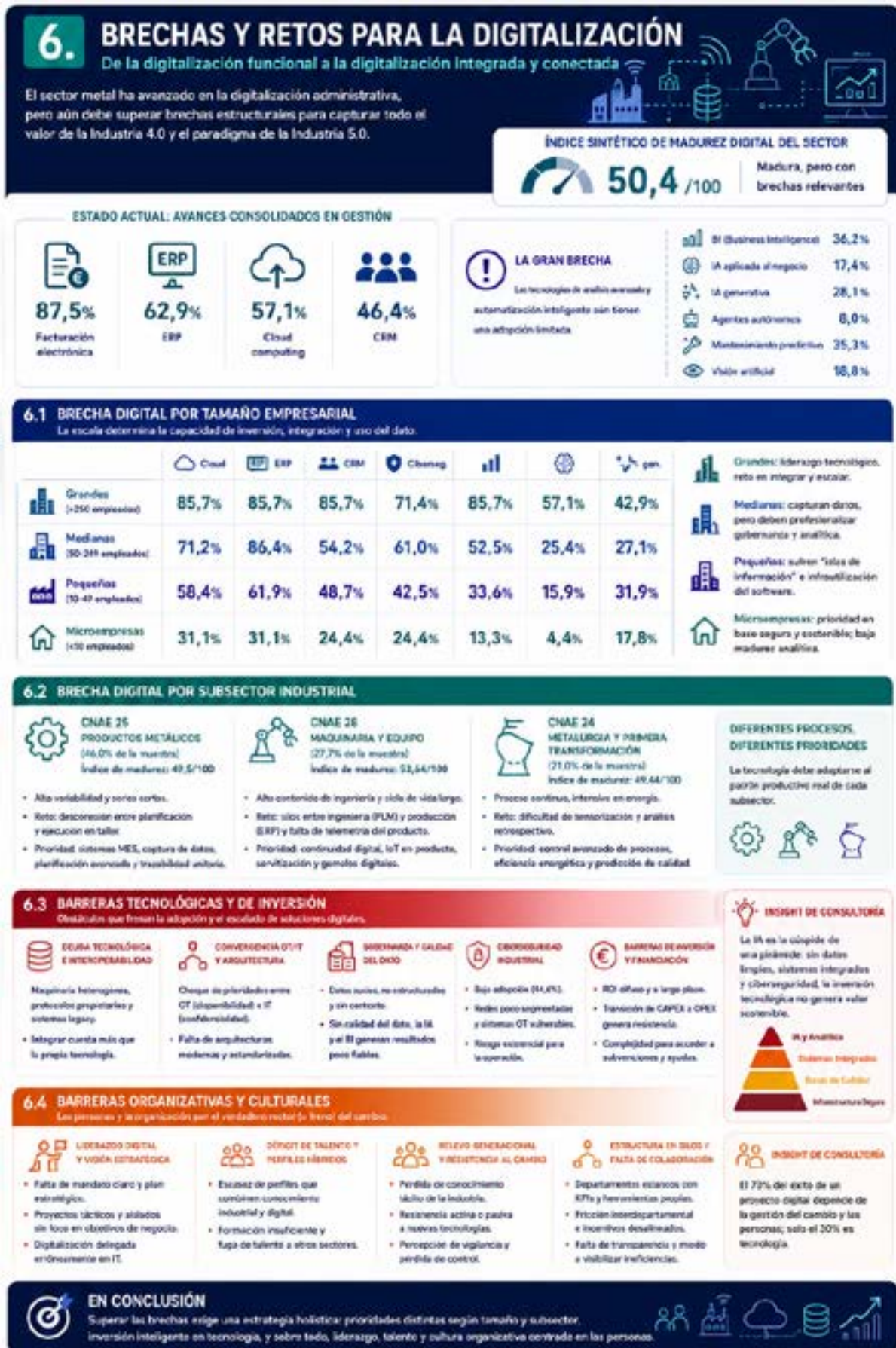
#### 6.4.4. La estructura en “silos” y la falta de colaboración transversal

Las empresas industriales tradicionales están organizadas en departamentos estancos (silos funcionales): Ingeniería/Oficina Técnica, Producción, Calidad, Mantenimiento y Ventas. Cada departamento tiene sus propios objetivos, sus propios indicadores (KPIs) y, a menudo, sus propias herramientas de software.

- **Fricción interdepartamental:** La digitalización exige transversalidad. Un proyecto de mantenimiento predictivo, por ejemplo, requiere que producción ceda tiempo de máquina para instalar sensores, que mantenimiento defina los modos de fallo, que IT garantice la conectividad y que finanzas apruebe el presupuesto. Si la organización opera en silos, el proyecto se paraliza en disputas territoriales y cruce de responsabilidades.
- **Incentivos desalineados:** A menudo, los sistemas de incentivos bloquean la digitalización. Si el jefe de producción es evaluado y bonificado exclusivamente por el volumen de toneladas producidas al mes, se resistirá a cualquier parada técnica necesaria para implementar mejoras digitales o a reducir la velocidad de la línea para realizar pruebas de calidad automatizadas. La transformación digital requiere alinear los KPIs de todos los departamentos hacia objetivos globales de eficiencia, calidad y rentabilidad.
- **El miedo a la transparencia:** La digitalización extrema ilumina las ineficiencias ocultas. Un sistema de captura de datos en tiempo real revelará los tiempos muertos reales, las mermas no declaradas y los cuellos de botella que antes se camuflaban en los informes manuales de fin de mes. Esta nueva transparencia puede generar incomodidad y rechazo en los mandos intermedios, que sienten que pierden el control sobre el relato de lo que ocurre en su área de responsabilidad.

En conclusión, las brechas y retos para la digitalización en la industria española del metal conforman un ecosistema complejo donde la tecnología es solo la punta del iceberg. Superar el índice de madurez actual (50,4) y transitar hacia la excelencia operativa exigirá a las empresas del sector un enfoque holístico. Deberán diseñar hojas de ruta hiper-segmentadas según su tamaño y subsector, acometer inversiones valientes para modernizar su infraestructura y converger los mundos OT e IT, y, por encima de todo, ejercer un liderazgo transformador capaz de alinear la cultura organizativa, capacitar al talento y situar a las personas en el centro del nuevo paradigma digital.

Figura 6.2: Brechas y retos para la digitalización



## 7. TALENTO, CULTURA Y FACTOR HUMANO EN LA TRANSFORMACIÓN DIGITAL

La transformación digital en la industria española del metal, tal y como se ha evidenciado a lo largo de los diagnósticos cuantitativos y cualitativos de este estudio sectorial, no constituye un fenómeno exclusivamente tecnológico. Es, en su esencia más profunda, un proceso de reconfiguración socio-técnica de enorme calado. Si bien los capítulos precedentes han detallado las brechas estructurales, las barreras de integración de sistemas (convergencia OT/IT), los desafíos financieros y el contexto macroeconómico europeo (marcado por el PRTR, el CRMA y el NZIA), el presente capítulo aborda el que es, con toda probabilidad, el cuello de botella más crítico y determinante para el éxito a largo plazo de la industria: **el factor humano**.

La premisa fundamental que articula este análisis exhaustivo es innegociable: la tecnología, por avanzada, disruptiva o costosa que sea, carece de capacidad transformadora intrínseca si no está respaldada por una organización culturalmente preparada y por un talento adecuadamente cualificado para gobernarla.

La adquisición de un sistema ERP, la implementación de robótica colaborativa o el despliegue de algoritmos de Inteligencia Artificial son condiciones necesarias, pero en absoluto suficientes, para alcanzar la madurez digital.

El diagnóstico cuantitativo, basado en la muestra nacional de 318 empresas del sector metal-mecánico, revela una paradoja reveladora. El índice medio de madurez digital del sector se sitúa en **50,4 sobre 100**, ubicando a la inmensa mayoría de las empresas (89,3%) en fases de "Transición" (42,4%) o "Avanzada" (46,9%). Sin embargo, cuando se aísla y analiza específicamente el *perfil tecnológico de la plantilla*, la puntuación media desciende a un modesto **4,75 sobre 9**. Esta disonancia empírica ilustra una realidad ineludible en las plantas de producción españolas: la velocidad de adquisición e implantación de activos digitales (hardware, software, sensórica) está superando con creces la velocidad de adaptación, asimilación y capacitación de las estructuras humanas que deben operarlos y extraer valor de ellos.

En un sector compuesto en un 99,2% por pequeñas y medianas empresas (PYMES) donde la muestra refleja que el 70,5% son micro y pequeñas empresas, la polivalencia es la norma y los recursos dedicados exclusivamente a la gestión del cambio son severamente limitados. Esta asimetría entre la ambición tecnológica y la capacidad humana representa un riesgo estratégico de primer orden. Históricamente, la industria metal-mecánica ha fundamentado su competitividad global en el conocimiento tácito de sus operarios, en la destreza técnica forjada a través de décadas de experiencia en el taller (saber "escuchar" un torno, ajustar una matriz por intuición térmica) y en una cultura de resolución pragmática de problemas físicos.

La irrupción de los paradigmas de la Industria 4.0 y, de forma inminente, de la **Industria 5.0** que sitúa la centralidad del ser humano, la sostenibilidad y la resiliencia en el núcleo absoluto de la estrategia productiva europea exige una evolución radical de este modelo histórico. Ya no es suficiente con saber "hacer metal"; en el horizonte 2030, es un imperativo de supervivencia saber "gestionar el dato que genera el metal".

## INSIGHT ESTRATÉGICO: LA PARADOJA DE LA AUTOMATIZACIÓN

Uno de los errores más frecuentes y costosos en los procesos de digitalización del sector metal es asumir que la implantación técnica garantiza automáticamente el uso efectivo. La evidencia empírica de las auditorías in situ demuestra que la adquisición de un sistema MES (Manufacturing Execution System), un cobot de última generación o una herramienta de Business Intelligence (BI) sin un rediseño profundo de las rutinas de trabajo y sin la capacitación intensiva del personal, conduce invariablemente a la infrutilización del activo. El retorno de la inversión (ROI) digital es directamente proporcional a la madurez cultural de la organización. Automatizar un proceso ineficiente o incomprendido por la plantilla solo sirve para ejecutar la ineficiencia a mayor velocidad y con mayor coste de capital.

Este capítulo se estructura en cuatro grandes bloques analíticos, diseñados para proporcionar una hoja de ruta exhaustiva a las empresas del sector.

- En primer lugar (7.1), se diseccionan las nuevas competencias digitales requeridas, analizando la transición desde habilidades manuales hacia competencias analíticas y la emergencia de perfiles híbridos.
- En segundo lugar (7.2), se aborda la gestión del cambio en entornos industriales, explorando las raíces psicológicas y operativas de la resistencia organizativa.
- En tercer lugar (7.3), se evalúan las necesidades críticas de formación, con énfasis en estrategias de upskilling, reskilling y el papel de la FP Dual.
- Finalmente (7.4), se examina la cultura organizativa y el liderazgo digital, definiendo los atributos innegociables de los equipos directivos capaces de guiar a sus organizaciones hacia la Industria 5.0.

## 7.1. .NUEVAS COMPETENCIAS DIGITALES EN LA INDUSTRIA DEL METAL

La digitalización de los procesos productivos y de gestión está redefiniendo desde sus cimientos el mapa de competencias requerido en la industria del metal. La transición desde la Industria 3.0 (caracterizada por la automatización rígida, los silos departamentales y el control numérico aislado) hacia la Industria 4.0 (basada en sistemas ciberfísicos interconectados, el Internet de las Cosas Industrial y la analítica de datos) implica un desplazamiento del valor aportado por el trabajador. Este valor se traslada progresivamente de la ejecución física directa a la supervisión, el análisis de excepciones, la programación y la toma de decisiones basada en evidencias empíricas (datos). Este cambio de paradigma exige una taxonomía de competencias completamente renovada a todos los niveles de la organización.

### 7.1.1. Evolución del perfil profesional en el sector metal-mecánico

El perfil tradicional del operario del metal se ha basado durante más de un siglo en la destreza manual, la interpretación de planos físicos (2D), el conocimiento empírico del comportamiento termodinámico y mecánico de los materiales (por ejemplo, la reacción del acero ante variaciones térmicas en la fundición, o la compensación del desgaste de herramienta en el mecanizado) y el mantenimiento mecánico preventivo o correctivo. Si bien estas habilidades fundamentales (*core skills*) siguen siendo absolutamente necesarias (el metal sigue rigiéndose por las leyes de la física), ya no son suficientes para operar de manera competitiva en una planta digitalizada.

En el contexto actual, donde los datos del estudio indican que la adopción de sistemas ERP alcanza el 62,9% y la integración de IoT en producción puntúa un 4,59 sobre 9, el operario tradicional se ve forzado a transformarse en un “trabajador aumentado” (**augmented worker**). Este nuevo perfil profesional no solo manipula piezas, sino que interactúa continuamente con interfaces digitales complejas (HMI - Human

Machine Interfaces), introduce datos críticos de trazabilidad en terminales de planta (tablets o pantallas táctiles), interpreta alertas tempranas de sistemas de mantenimiento predictivo (adoptado por el 35,3% de la muestra) y colabora en el mismo espacio físico con robótica avanzada y cobots (con una puntuación de implantación de 4,77/9).

Es vital subrayar que la evolución del perfil profesional en el marco de la Industria 5.0 **no implica la sustitución del trabajador por la máquina**, sino una elevación de su rol hacia funciones de mayor valor añadido cognitivo. Esta evolución es particularmente crítica en subsectores de alto valor añadido como la fabricación de maquinaria y equipo (CNAE 28), donde el índice global de madurez digital es superior a la media (53,64). En este entorno específico, los técnicos de montaje no solo ensamblan componentes mecánicos, sino que deben configurar parámetros de software, realizar puestas en marcha virtuales mediante gemelos digitales (Virtual Commissioning) y gestionar la conectividad remota de los equipos para habilitar modelos de negocio basados en la servitización (Equipment-as-a-Service).

### 7.1.2. Competencias técnicas (Hard Skills) emergentes

El análisis profundo de las necesidades del sector, cruzado con las brechas tecnológicas identificadas en el Capítulo 6, permite identificar un conjunto de competencias técnicas o *hard skills* cuya demanda está experimentando un crecimiento exponencial. Estas competencias varían en profundidad dependiendo del nivel jerárquico (dirección, mandos intermedios, operarios de planta), pero su presencia debe ser transversal a toda la organización para garantizar la interoperabilidad humana:

- **Alfabetización de datos (Data Literacy):** Es la capacidad fundamental para leer, comprender, crear, analizar y comunicar datos como información útil. El diagnóstico revela una brecha alarmante: mientras el 62,9% de las empresas captura datos en un ERP, solo el 36,2% utiliza herramientas de Business Intelligence (BI). Existe un déficit crítico en la capacidad de las plantillas para interpretar cuadros de mando, comprender métricas dinámicas como el OEE (Overall Equipment Effectiveness) en tiempo real, y tomar decisiones operativas basadas en desviaciones estadísticas en lugar de en la intuición o la costumbre. La alfabetización de datos es el prerrequisito ineludible para cualquier iniciativa de Inteligencia Artificial.
- **Ciberhigiene y concienciación en seguridad industrial (OT Security):** Con una adopción de medidas de ciberseguridad avanzada de apenas el 44,6% a nivel global (y un crítico 24,4% en microempresas), el factor humano se erige como el vector de vulnerabilidad más peligroso. La convergencia IT/OT significa que un error humano en la planta puede paralizar la empresa. Los operarios y mandos intermedios deben comprender los riesgos catastróficos asociados a prácticas comunes pero inseguras: la conexión de dispositivos no autorizados (USB) en terminales de control numérico (CNC), la compartición de contraseñas genéricas en sistemas SCADA, y la identificación de intentos de phishing o ingeniería social.
- **Operación y programación de sistemas ciberfísicos:** La capacidad para interactuar fluidamente con robótica colaborativa, reprogramar trayectorias de mecanizado a partir de modelos CAD/CAM/CAE integrados, y ajustar parámetros algorítmicos en sistemas de visión artificial (cuya adopción actual es del 18,8%, pero con alto potencial de crecimiento en control de calidad).
- **Gestión de la trazabilidad digital y el “hilo digital” (Digital Thread):** Competencia para asegurar la continuidad ininterrumpida de la información a lo largo de la cadena de valor. Implica el uso riguroso y disciplinado de sistemas RFID, escáneres de códigos QR/DPM (Direct Part Mark), y la correcta imputación de lotes, consumos energéticos y mermas (scrap) en el sistema MES o ERP. El trabajador debe garantizar que la realidad física del taller coincida exactamente, y en tiempo real, con su representación digital en los sistemas de gestión.

### 7.1.3. Competencias transversales (soft skills) en el entorno digital

Paradójicamente, a medida que la industria del metal se vuelve más intensiva en tecnología, hardware y algoritmos, las habilidades humanas no automatizables (*soft skills*) adquieren una relevancia competitiva sin precedentes. La tecnología industrial moderna es altamente dinámica; los sistemas ERP se actualizan a la nube (SaaS), los algoritmos de Inteligencia Artificial evolucionan con nuevos datos de entrenamiento,

y las interfaces de usuario cambian. Por tanto, la competencia más valiosa a largo plazo no es el dominio estático de un software específico (que quedará obsoleto), sino la **capacidad de adaptación continua y el aprendizaje ágil (learnability)**.

Entre las competencias transversales más demandadas y críticas para el éxito de la digitalización en el sector metal destacan:

- **Resolución de problemas complejos (complex problem solving):** En una fábrica tradicional, una avería solía ser puramente mecánica o eléctrica. En una fábrica conectada (Industria 4.0), una anomalía en la calidad de una pieza mecanizada puede tener su origen en una desviación térmica del horno, en un error de calibración de los servomotores del robot, en un fallo de sincronización del software MES, o en una latencia de la red 5G industrial. Los profesionales deben poseer un pensamiento sistémico capaz de rastrear problemas a través de múltiples capas tecnológicas, físicas y operativas.
- **Pensamiento crítico y escepticismo algorítmico:** Con la incipiente adopción de la Inteligencia Artificial aplicada al negocio (17,4%) y la rápida penetración de la IA generativa (28,1%), los trabajadores no deben ser meros ejecutores de las órdenes dictadas por una pantalla. Deben ser capaces de cuestionar, contextualizar y validar las recomendaciones de los sistemas autónomos. Si un modelo de mantenimiento predictivo sugiere la parada inmediata de una máquina crítica, es el criterio experto del mantenedor humano el que debe contextualizar esa alerta con la realidad del entorno de producción, los plazos de entrega y el comportamiento histórico no documentado del activo.
- **Colaboración interdisciplinar y comunicación transversal:** La digitalización rompe los silos departamentales tradicionales. Un proyecto de sensorización IoT (puntuado en 4,59/9) requiere que el jefe de mantenimiento (conocimiento mecánico profundo), el responsable de producción (necesidades de flujo y OEE) y el departamento de TI (arquitectura de red, bases de datos y ciberseguridad) trabajen juntos. La capacidad de traducir conceptos técnicos entre el mundo físico (OT) y el mundo del software (IT) es una competencia crítica para evitar el fracaso de los proyectos.

#### 7.1.4. La emergencia de los perfiles híbridos y el “propietario del dato”

Uno de los hallazgos cualitativos más significativos del diagnóstico es la escasez crónica de **perfiles híbridos** en el mercado laboral español. Estos son profesionales que combinan un profundo conocimiento del proceso industrial físico (metalurgia, termodinámica, mecanizado CNC, soldadura, calderería) con competencias avanzadas en gestión de datos, integración de sistemas y analítica. La industria del metal no puede depender exclusivamente de ingenieros informáticos o científicos de datos puros provenientes del sector tecnológico, ya que estos perfiles carecen del contexto físico, las restricciones de seguridad y el conocimiento de los materiales necesario para interpretar correctamente las variables de una planta siderúrgica o de estampación.

Surge así la necesidad imperiosa de desarrollar y formar internamente roles como el *ingeniero de manufactura digital*, el *analista de datos de planta* o el *integrador OT/IT*. Estos profesionales actúan como traductores indispensables entre el mundo de la tecnología de operaciones (OT) y la tecnología de la información (IT). Son los únicos capaces de identificar qué variables específicas de un centro de mecanizado de 5 ejes son realmente relevantes para predecir el desgaste de la herramienta, cómo extraer esas señales a través de protocolos industriales (como OPC UA o MTConnect), y cómo estructurarlas en un Data Lake para su posterior análisis mediante algoritmos de Machine Learning.

Asimismo, a nivel organizativo y de gobernanza, se hace absolutamente imprescindible la figura del **propietario del dato (Data Owner)**. Como se señaló en el análisis de las barreras de integración (capítulo 6), la falta de gobernanza es una barrera estructural masiva. El propietario del dato no es un perfil técnico del departamento de Informática, sino un responsable de negocio (por ejemplo, el jefe de calidad, el director de compras o el responsable de ingeniería) que asume la responsabilidad formal sobre la exactitud, actualización, estandarización y ciclo de vida de un conjunto específico de datos maestros (listas de materiales o BOMs, tolerancias, especificaciones de proveedores, rutas de fabricación). Sin esta figura empoderada, la calidad de la información en el ERP se degrada rápidamente, invalidando cualquier esfuerzo posterior en Business Intelligence o Inteligencia Artificial (el principio de *Garbage In, Garbage Out*).

## EL IMPACTO DE LA IA GENERATIVA EN LAS COMPETENCIAS ADMINISTRATIVAS Y DE BACK-OFFICE

El estudio revela un dato sorprendente: la Inteligencia Artificial generativa tiene una adopción del 28,1%, superando significativamente a la IA analítica tradicional aplicada al negocio (17,4%). Esta adopción acelerada se debe a su baja barrera de entrada técnica y está transformando rápidamente las competencias requeridas en el back-office industrial, departamentos comerciales y oficinas técnicas. La habilidad para formular instrucciones precisas y contextualizadas a estos modelos (**Prompt Engineering**) se está convirtiendo en una competencia esencial para acelerar la redacción de manuales técnicos complejos, la traducción de pliegos de licitación internacionales, la síntesis de normativas de calidad (ISO) y la generación de código básico para la automatización de tareas rutinarias (RPA). Sin embargo, esta competencia debe ir indisolublemente unida a una rigurosa capacidad de validación técnica humana (Human-in-the-loop) para evitar “alucinaciones” algorítmicas o errores críticos en la documentación industrial que podrían derivar en fallos de producción o incumplimientos contractuales.

## 7.2. GESTIÓN DEL CAMBIO EN ENTORNOS INDUSTRIALES

La transformación digital es, en su esencia más pura, un ejercicio monumental de gestión del cambio organizacional. La introducción de nuevas tecnologías (desde un simple terminal de fichaje hasta un sistema de planificación avanzada APS) altera las rutinas establecidas durante años, redistribuye el poder y el acceso a la información dentro de la empresa, y modifica las métricas por las cuales se evalúa el desempeño diario de los trabajadores. En la industria del metal, caracterizada históricamente por una fuerte cultura de taller, una alta permanencia en el puesto de trabajo y procesos físicos fuertemente arraigados, la resistencia al cambio no debe interpretarse como una anomalía o un acto de rebeldía, sino como una reacción humana predecible, natural y defensiva que debe ser gestionada con rigor metodológico y empatía.

### 7.2.1. Naturaleza y raíces de la resistencia al cambio en el sector metal

Para gestionar eficazmente la resistencia, es imperativo comprender sus causas subyacentes. En el contexto de las PYMES metal-mecánicas, la resistencia rara vez se manifiesta como un rechazo ideológico abierto a la tecnología. Por el contrario, adopta formas mucho más sutiles y corrosivas para el ROI del proyecto: el mantenimiento de hojas de cálculo (Excel) paralelas al ERP oficial, la introducción tardía, agrupada o inexacta de datos en los terminales MES al final del turno (en lugar de en tiempo real), o la infrautilización sistemática de las funcionalidades avanzadas de la maquinaria conectada.

Las raíces de esta resistencia en el sector se agrupan en cuatro dimensiones principales, fuertemente vinculadas a las barreras organizativas identificadas en el capítulo 6:

1. Miedo a la obsolescencia y pérdida de estatus profesional: Los operarios y mantenedores veteranos, cuyo valor incalculable para la empresa ha residido históricamente en su conocimiento empírico (saber “escuchar” la máquina, ajustar parámetros por pura intuición basada en la experiencia), pueden percibir la sensorización masiva y la analítica de datos como una amenaza directa que devalúa su experiencia vital. Si un algoritmo de Machine Learning puede predecir con un 95% de precisión el fallo inminente de un rodamiento, el mantenedor experto puede sentir que su rol se reduce al de un mero ejecutor de órdenes dictadas por una pantalla, perdiendo su estatus de “salvador” ante las averías.
2. Sobrecarga cognitiva y fatiga tecnológica: La digitalización a menudo se percibe inicialmente por la plantilla de planta como “más trabajo burocrático”. Pedir a un operario de soldadura o mecanizado que, además de ejecutar una pieza perfecta bajo presión de tiempo, deba escanear códigos de barras, registrar tiempos exactos de inicio y fin en una tablet, y documentar incidencias de calidad en un sistema digital, genera una fricción inmensa si la interfaz de usuario (UI) no es ergonómica, si

el sistema es lento, o si el trabajador no percibe absolutamente ningún beneficio directo de esa tarea administrativa adicional en su día a día.

3. Falta de transparencia y el síndrome de la “caja negra”: Cuando se implementan sistemas de planificación avanzada (APS) o algoritmos de Inteligencia Artificial que dictan la secuenciación óptima de las órdenes de fabricación, los jefes de turno y mandos intermedios pueden resistirse activamente a seguirlos si no comprenden la lógica matemática subyacente. La falta de explicabilidad de la tecnología (Explainable AI) genera desconfianza. Si el sistema ordena fabricar el lote B antes que el lote A contraviniendo la lógica tradicional del taller, el mando intermedio tenderá a ignorar el sistema para evitar riesgos.
4. Experiencias previas fallidas (El “tejido cicatricial” organizativo): Muchas empresas del sector metal han intentado implantaciones tecnológicas en el pasado (por ejemplo, versiones antiguas y rígidas de ERPs en los años 2000) que resultaron traumáticas, costosas, prolongadas y altamente disruptivas para la producción. Este historial de fracasos genera un escepticismo preventivo y un cinismo generalizado ante cualquier nueva iniciativa etiquetada por la dirección como “Industria 4.0” o “Transformación Digital”.

### 7.2.2. Modelos metodológicos de gestión del cambio aplicados a la PYME industrial

La superación de estas profundas barreras requiere abandonar la improvisación, el voluntarismo y la imposición jerárquica, adoptando marcos metodológicos estructurados. Si bien existen múltiples modelos teóricos de gestión del cambio (como los 8 pasos de Kotter), el **modelo ADKAR** (Awareness, Desire, Knowledge, Ability, Reinforcement) resulta especialmente pragmático, escalable y adaptable a la realidad de las PYMES del metal, ya que focaliza la atención en la transición psicológica e individual de cada trabajador:

- **Awareness (Conciencia):** El primer paso ineludible es comunicar de forma transparente y honesta el “por qué” del cambio. No basta con que la dirección anuncie que se va a instalar un nuevo sistema MES de 100.000 euros. La gerencia debe explicar el contexto de negocio: que la trazabilidad digital unitaria es una exigencia ineludible impuesta por los clientes del sector automoción (OEMs) o aeronáutico, y que sin ella, la viabilidad futura de la empresa y los puestos de trabajo están en riesgo inminente. La conciencia se construye sobre la lógica implacable del negocio y la supervivencia, no sobre el atractivo estético de la tecnología.
- **Desire (Deseo):** Generar la voluntad genuina de participar en el cambio. Esto es lo más difícil y se logra conectando la digitalización con beneficios tangibles y egoístas para el propio trabajador (el concepto “*What’s in it for me?*”). Ejemplos en el metal: demostrar cómo el nuevo sistema reduce tareas administrativas tediosas (como rellenar partes de papel sucios al final de un turno agotador), cómo la robótica mejora la seguridad laboral evitando lesiones de espalda por manipulación de cargas pesadas, y cómo la formación en nuevas tecnologías mejora drásticamente la empleabilidad del trabajador a largo plazo.
- **Knowledge (Conocimiento):** Proporcionar la formación teórica específica sobre cómo funciona el nuevo sistema o proceso. En el sector metal, esto implica sesiones de formación claras, altamente contextualizadas con piezas y órdenes de fabricación reales de la empresa, y libres de jerga informática innecesaria (IT jargon). Es vital asegurar que el personal comprende la nueva taxonomía de datos, qué significa cada estado de máquina en el sistema y cómo fluye la información hacia otros departamentos.
- **Ability (Habilidad):** Transformar el conocimiento teórico de un aula en capacidad práctica a pie de máquina. Es la fase crítica de acompañamiento. Requiere la figura indispensable de “**superusuarios**” o **embajadores digitales** dentro del propio taller. Estos deben ser compañeros de confianza, operarios respetados por sus pares (no consultores externos de traje y corbata), que asistan en tiempo real durante las primeras y estresantes semanas de implantación, resolviendo dudas, desbloqueando terminales y corrigiendo errores sin ningún tipo de penalización o reprimenda.
- **Reinforcement (Refuerzo):** Consolidar el cambio para evitar la regresión natural a los hábitos analógicos (volver al Excel o al papel). Esto implica auditar rigurosamente la calidad del dato desde

el día uno, celebrar y comunicar los éxitos tempranos (*quick wins*), retirar físicamente los soportes antiguos (eliminar literalmente los partes de papel y desinstalar el software viejo una vez que el sistema digital es estable) y vincular el uso correcto de las nuevas herramientas a las evaluaciones de desempeño y sistemas de incentivos.

### 7.2.3. Comunicación, transparencia y el rediseño de procesos (BPR)

Un pilar fundamental de la gestión del cambio es la comunicación bidireccional y temprana. La digitalización no debe ser jamás un proceso diseñado en aislamiento en un despacho por el departamento de TI o la gerencia, para luego ser impuesto unilateralmente a la planta. La participación temprana de los operarios de línea, jefes de turno, responsables de calidad y técnicos de mantenimiento en la fase de diseño, toma de requisitos y selección de la tecnología es crítica para el éxito.

Ellos son los verdaderos expertos en el dominio (Domain Experts). Son quienes conocen las fricciones reales, las excepciones no documentadas del proceso productivo y pueden identificar rápidamente si una interfaz de usuario (UI) en una tablet será viable en un entorno ruidoso, con operarios usando guantes de protección gruesos, expuestos a polvo metálico, proyecciones de soldadura o mala iluminación. Ignorar su input en la fase de diseño garantiza el rechazo en la fase de despliegue.

Además, la gestión del cambio está intrínsecamente ligada al **rediseño de procesos (Business Process Reengineering - BPR)**. Como dicta el axioma tecnológico: *“digitalizar un proceso ineficiente solo sirve para ejecutar la ineficiencia a mayor velocidad y con mayor coste”*. Antes de parametrizar una sola línea de código en un software, la organización debe cuestionar y auditar sus rutinas históricas: ¿Por qué se requieren tres firmas físicas para aprobar una orden de compra de material fungible? ¿Es realmente necesario imprimir el plano en A3 si puede visualizarse con control de versiones en un monitor industrial a pie de máquina? La simplificación, estandarización y limpieza del proceso físico (Lean Manufacturing) es el prerrequisito ineludible para una digitalización exitosa, rentable y aceptada por el equipo.

### 7.2.4. Captura y transferencia del conocimiento tácito: El reto del relevo generacional

La industria española del metal se enfrenta a un desafío demográfico severo que amenaza su viabilidad a medio plazo: el envejecimiento progresivo de sus plantillas y la inminente jubilación de una generación entera de profesionales altamente cualificados (torneros, fresadores, soldadores homologados, ajustadores). Este fenómeno representa una amenaza de pérdida masiva de **conocimiento tácito** (el *know-how* crítico que reside en la mente del trabajador y no está documentado en ningún manual).

La gestión del cambio digital debe abordar este reto de frente, convirtiendo la tecnología en un vehículo estratégico para la retención, estructuración y transferencia de este conocimiento. Las herramientas de la Industria 4.0 ofrecen soluciones concretas y de alto impacto. Por ejemplo, el uso de plataformas de **realidad asistida o realidad mixta** (gafas inteligentes o tablets industriales) permite grabar en primera persona a un operario experto mientras realiza una compleja operación de ajuste de troqueles en una prensa de estampación o el mantenimiento de un husillo. Este registro audiovisual, enriquecido posteriormente con anotaciones digitales, esquemas 3D y alertas de seguridad, se convierte en un procedimiento operativo estándar (SOP) interactivo y visual.

Un operario junior o un aprendiz de FP Dual puede consultar este SOP inmersivo en tiempo real mientras ejecuta la tarea por primera vez. De este modo, la digitalización no devalúa al trabajador veterano, sino que lo eleva a la categoría de **mentor digital**, reconociendo su valía, facilitando una transición generacional fluida y protegiendo el capital intelectual más valioso de la empresa.

## ESTRATEGIA DE IMPLANTACIÓN: LA TÁCTICA DE LOS “QUICK WINS”

Para vencer el escepticismo organizativo crónico y la fatiga del cambio, los proyectos de digitalización en el sector metal no deben plantearse jamás como transformaciones monolíticas, teóricas y a tres años vista (el enfoque “Big Bang”). La estrategia de gestión del cambio más efectiva es la ejecución ágil de proyectos piloto acotados que generen retornos rápidos, indiscutibles y altamente visibles (**Quick Wins**). Por ejemplo: la automatización de la captura de datos de consumo energético en un horno de fundición específico, mostrando en apenas cuatro semanas cómo la información en tiempo real permite ajustar los picos de demanda y reducir la factura eléctrica en un 10%. Estos éxitos tempranos y tangibles generan credibilidad inmediata en la dirección, reducen la ansiedad tecnológica en la planta, demuestran el valor del dato y construyen el capital político interno necesario para abordar fases de integración mucho más complejas, como el despliegue de un sistema MES completo o un proyecto de IA.

## 7.3. NECESIDADES DE FORMACIÓN Y CUALIFICACIÓN

La brecha entre las competencias disponibles actualmente en el mercado laboral y las requeridas por una industria metal-mecánica digitalizada constituye uno de los frenos estructurales más significativos para la competitividad del sector a nivel europeo. El diagnóstico revela que, si bien existe una base sólida de conocimiento operativo y metalúrgico, la capacidad para explotar datos (evidenciada por el bajo 36,2% en BI), mantener soluciones digitales complejas, garantizar la ciberseguridad y operar en entornos ciberfísicos es severamente deficitaria. Abordar esta brecha exige un replanteamiento profundo, urgente y financiado de las estrategias de formación, tanto a nivel interno en las empresas como a nivel macro en el sistema educativo y de formación profesional.

### 7.3.1. Diagnóstico de la brecha de habilidades (Skills Gap) por tamaño empresarial

El análisis de la muestra de 318 empresas sitúa el perfil tecnológico medio de la plantilla en un modesto 4,75 sobre 9. Sin embargo, esta puntuación media oculta disparidades críticas y una profunda fractura vinculada al tamaño de la organización, tal y como se detalla en el capítulo 6:

- **Microempresas (<10 empleados, 20,1% de la muestra):** Sufren una carencia crónica y casi absoluta de perfiles digitales dedicados. La responsabilidad de la “digitalización” recae a menudo en el gerente o en un administrativo que carece de formación tecnológica formal. La brecha aquí es de supervivencia: necesitan alfabetización digital básica, comprensión de la ciberhigiene (solo un 24,4% tiene ciberseguridad avanzada) y capacidad para operar software SaaS estándar sin requerir personalización compleja.
- **Pequeñas empresas (10-49 empleados, 50,4% de la muestra):** Representando a la mitad del sector, estas empresas tienen personal técnico, pero carecen de roles de integración. La brecha se manifiesta en la incapacidad para conectar sistemas (el ERP con el CAD/CAM, por ejemplo) y en la falta de disciplina para mantener la calidad de los datos maestros. Necesitan formación en gestión de procesos y parametrización de software.
- **Medianas empresas (50-249 empleados, 26,3% de la muestra):** Disponen de departamentos de TI, pero a menudo enfocados en el soporte técnico tradicional (helpdesk, servidores) y no en la innovación industrial. La brecha crítica aquí es la falta de perfiles híbridos OT/IT, analistas de datos industriales y expertos en ciberseguridad de planta. Necesitan formación avanzada en arquitecturas de datos, integración de IoT y Business Intelligence.
- **Grandes empresas (>250 empleados, 3,1% de la muestra):** Disponen de recursos financieros para atraer talento especializado, pero se enfrentan a la feroz competencia de sectores más “atractivos” (tecnológicas puras, banca, consultoría). Su brecha interna se centra en la capacitación de sus ingenieros en tecnologías de frontera: Inteligencia Artificial aplicada, gemelos digitales, ciencia de materiales computacional y arquitecturas cloud complejas.

A nivel operativo, la brecha de habilidades se manifiesta en tres estratos jerárquicos que requieren planes de formación diferenciados:

1. **Nivel directivo y gerencial:** Carencia de visión estratégica sobre arquitecturas de datos, desconocimiento de los riesgos reales y catastróficos de la ciberseguridad industrial (NIS2), y dificultad metodológica para calcular el ROI de inversiones en tecnologías intangibles (software, analítica, formación) frente a las inversiones tradicionales y tangibles (comprar una nueva plegadora).
2. **Nivel de ingeniería y mandos intermedios:** Necesidad urgente de actualizar conocimientos hacia la integración de sistemas (convergencia IT/OT), programación ágil de robótica colaborativa, diseño orientado a la manufactura aditiva (impresión 3D metálica, DfAM), gestión de proyectos ágiles (Agile/Scrum en entornos industriales) y analítica de datos para la mejora continua.
3. **Nivel de planta y operarios:** Urgencia de alfabetización digital básica, manejo fluido de interfaces hombre-máquina (HMI), comprensión profunda de la importancia de la calidad del dato en la imputación de tiempos y mermas (el impacto de un mal registro en el coste final), y adaptación a nuevos protocolos de seguridad en entornos altamente automatizados.

### 7.3.2. Estrategias de upskilling y reskilling

Ante la escasez crónica de talento digital en el mercado laboral abierto y la dificultad de las PYMES del metal para competir en salarios con las grandes consultoras tecnológicas, la industria debe apostar decididamente, y con el apoyo de fondos como el PRTR, por el desarrollo intensivo de su talento interno. Esto se articula a través de dos estrategias complementarias y vitales:

- **Upskilling (Perfeccionamiento profesional):** Consiste en dotar a los trabajadores actuales de nuevas competencias tecnológicas que mejoren, amplíen y modernicen su desempeño en su puesto actual, adaptándolo a la realidad digital. Un ejemplo clásico y de alto impacto en el sector metal es la formación intensiva de un operario de máquina herramienta convencional (torno manual) para que sea capaz de operar, programar y optimizar un centro de mecanizado CNC de 5 ejes conectado a un sistema DNC, interpretando además las alertas de mantenimiento predictivo que emite la propia máquina a través de su panel IoT. El upskilling protege la empleabilidad a largo plazo del trabajador, aumenta su motivación y maximiza el rendimiento (OEE) de la inversión de capital (CAPEX) en nueva maquinaria.
- **Reskilling (Reciclaje profesional profundo):** Implica la capacitación intensiva de un trabajador para que asuma un rol completamente nuevo dentro de la organización, a menudo porque su puesto anterior ha sido automatizado, externalizado o ha quedado obsoleto por la tecnología. Por ejemplo, un perfil administrativo dedicado durante años a la introducción manual de albaranes de papel y facturas en el ERP (una tarea altamente susceptible de ser automatizada casi al 100% mediante tecnologías OCR e IA Generativa) puede ser reentrenado mediante un programa estructurado para asumir el nuevo rol de “auditor de calidad de datos maestros” o “gestor de trazabilidad documental”. Estas son funciones críticas para el gobierno del dato que requieren un profundo conocimiento previo del negocio y de los proveedores de la empresa, pero que se ejecutan utilizando nuevas herramientas tecnológicas y analíticas.

### 7.3.3. Modelos de aprendizaje continuo (lifelong learning) y microlearning

El modelo tradicional de formación industrial, basado en cursos presenciales esporádicos, teóricos, de larga duración y desconectados de la rutina diaria del taller, resulta ineficaz y obsoleto para la adopción tecnológica rápida. La velocidad de actualización del software en la nube (SaaS), la evolución constante de las interfaces y la introducción continua de nuevas funcionalidades exigen un enfoque de **aprendizaje continuo (Lifelong Learning)** que esté profundamente integrado en el flujo de trabajo diario (*learning in the flow of work*).

Para las PYMES del metal, donde ausentar a un trabajador clave de la línea de producción durante varios días para asistir a un curso supone un coste de oportunidad inasumible que paraliza las entregas, el

**microlearning (microaprendizaje)** emerge como la metodología formativa más viable, rentable y efectiva. Consiste en la entrega de contenidos formativos hiper-específicos en píldoras muy breves (videos de 3 a 5 minutos, infografías interactivas, checklists digitales paso a paso) accesibles bajo demanda desde dispositivos móviles, tablets o terminales a pie de máquina, justo en el momento exacto en que el trabajador necesita aplicar ese conocimiento para resolver un problema (*Just-in-Time learning*).

Por ejemplo, si un operario debe realizar un cambio de formato complejo (setup/SMED) en una plegadora automatizada que no ha operado en los últimos seis meses, en lugar de recurrir a un manual de papel obsoleto, manchado y guardado en una oficina, puede acceder a un video tutorial interactivo escaneando un código QR adherido a la propia máquina. Este enfoque reduce drásticamente la curva de aprendizaje, minimiza los errores operativos costosos, estandariza las mejores prácticas y fomenta la autonomía y confianza del trabajador.

### 7.3.4. El papel de la Formación Profesional (FP) Dual y la colaboración público-privada

La resolución de la brecha de talento a medio y largo plazo no puede recaer exclusivamente en los presupuestos de formación de las empresas. Requiere una alineación estratégica, profunda y estructural entre el sistema educativo nacional y las necesidades tecnológicas reales y futuras de la industria. La Formación Profesional (FP), y muy especialmente el modelo de **FP Dual** (que combina el aprendizaje en el centro educativo con el trabajo efectivo y remunerado en la empresa), constituye el ecosistema natural y más potente para nutrir de talento técnico joven al sector metal-mecánico.

Sin embargo, los currículos formativos oficiales a menudo presentan un desfase temporal preocupante respecto a la tecnología de vanguardia utilizada en las empresas líderes del sector. Es un imperativo estratégico que los centros de FP integren de manera transversal y obligatoria competencias en ciberseguridad industrial (OT), analítica de datos básica, programación de robótica colaborativa, manufactura aditiva (impresión 3D) y operación de sistemas MES en los grados tradicionales de mecanizado, soldadura, mecatrónica, diseño en fabricación mecánica y mantenimiento industrial.

La **colaboración público-privada** es el único mecanismo viable para cerrar este desfase tecnológico. Las empresas del metal, articuladas a través de asociaciones sectoriales fuertes como CONFEMETAL, deben participar activamente en la definición y actualización de los perfiles profesionales, ceder equipamiento tecnológico moderno (o licencias de software industrial) a los centros educativos, y acoger a estudiantes en prácticas bajo modelos de tutorización rigurosos y comprometidos. Asimismo, los fondos europeos del Plan de recuperación, transformación y resiliencia (PRTR), específicamente a través del Componente 20 (Plan estratégico de impulso de la formación profesional), ofrecen una ventana de oportunidad histórica y dotación financiera para la actualización tecnológica masiva de los centros de FP y, lo que es igualmente crítico, para la formación avanzada en Industria 4.0 de los propios docentes del sistema público.

### 7.3.5. Herramientas digitales inmersivas para la formación industrial

La propia tecnología digital ofrece soluciones innovadoras para acelerar, abaratar y mejorar radicalmente los procesos de formación técnica en el sector metal. Las tecnologías inmersivas, como la realidad virtual (VR) y la realidad aumentada (AR) cuya adopción global en visión/AR se sitúa en un incipiente 18,8%, están demostrando un impacto transformador y un ROI muy claro en la capacitación técnica de operarios:

- **Simuladores de realidad virtual (VR):** Permiten entrenar a los operarios noveles en tareas complejas, peligrosas o extremadamente costosas en un entorno 100% seguro, controlado y repetible. Por ejemplo, los simuladores de soldadura en VR permiten a los aprendices practicar la inclinación exacta, la velocidad de avance y la distancia del electrodo sin consumir costoso material base, gas protector ni energía eléctrica, y eliminando por completo el riesgo de accidentes, quemaduras o inhalación de humos. El sistema informático proporciona un feedback analítico inmediato y objetivo sobre la calidad del cordón virtual, acelerando drásticamente la adquisición de memoria muscular y técnica antes de que el alumno pase a la cabina de soldadura real.
- **Realidad aumentada (AR) para asistencia y mantenimiento:** Mediante el uso de gafas inteligentes (*smart glasses*) o tablets industriales, un técnico de mantenimiento junior puede visualizar hologramas 3D superpuestos sobre una máquina real averiada que le indican, paso a paso, la secuencia exacta

de desmontaje de un componente complejo, los pares de apriete requeridos y las advertencias de seguridad. Además, esta tecnología habilita la asistencia remota (*Remote Expert*), donde un ingeniero senior o el servicio técnico del fabricante de la máquina, ubicado a miles de kilómetros en otra instalación, puede ver exactamente lo mismo que el técnico en planta a través de la cámara de las gafas, y guiarle mediante indicaciones visuales (dibujando sobre su campo de visión) y de voz en tiempo real. Esto reduce drásticamente los tiempos medios de reparación (MTTR), los costes de desplazamiento y las paradas de línea prolongadas.

### LA FORMACIÓN COMO ESTRATEGIA DE RETENCIÓN DE TALENTO (EMPLOYER BRANDING)

En un mercado laboral altamente tensionado, donde la industria del metal compite por perfiles STEM (ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas) con sectores percibidos como más “modernos” o atractivos, la inversión visible en formación y desarrollo profesional continuo no es solo una necesidad operativa para manejar las máquinas. Es, de hecho, la herramienta más potente de **Employer Branding (marca empleadora)** y retención de talento. Los profesionales técnicos, y muy especialmente las nuevas generaciones (Millennials y Gen Z), valoran la empleabilidad a largo plazo, el plan de carrera y el acceso a tecnologías de vanguardia (robótica, IA, impresión 3D) tanto o más que la retribución salarial estricta. Una PYME del metal que ofrece planes de carrera claros, formación certificada en Industria 4.0 y un entorno de trabajo tecnológicamente estimulante reduce significativamente sus tasas de rotación no deseada, protegiendo su inversión en capital humano.

## 7.4. CULTURA ORGANIZATIVA Y LIDERAZGO DIGITAL

La tecnología es el motor potente de la transformación, pero la cultura organizativa es el volante que dirige su rumbo y la carretera sobre la que avanza. Una cultura corporativa rígida, excesivamente jerárquica, castigadora del error y adversa al riesgo actuará invariablemente como un freno insalvable para cualquier iniciativa de digitalización, independientemente de los millones de euros invertidos en licencias de software o maquinaria. Por el contrario, una cultura ágil, colaborativa, transparente y orientada al aprendizaje continuo multiplicará exponencialmente el retorno de cada euro invertido en tecnología. El desarrollo, fomento y protección de esta cultura es una responsabilidad indelegable y primordial del liderazgo de la empresa.

### 7.4.1. De la cultura analógica a la cultura del dato (Data-Driven culture)

El cambio cultural más profundo, difícil y necesario que debe experimentar la industria del metal es la transición desde una gestión basada en la intuición, la experiencia histórica no documentada y la jerarquía (el peligroso síndrome del “siempre se ha hecho así” o la dependencia absoluta del criterio del operario más veterano) hacia una cultura basada en la evidencia empírica y el análisis riguroso de datos (**Data-Driven Culture**).

Como señala de forma contundente el diagnóstico cuantitativo, solo el 36,2% de las empresas utiliza herramientas de Business Intelligence (BI). Esto implica que en casi dos tercios de las organizaciones del sector, las decisiones operativas diarias y las decisiones estratégicas de inversión se toman con información parcial, retrospectiva (mirando por el espejo retrovisor a final de mes) o sesgada por percepciones subjetivas. Instaurar una verdadera cultura del dato significa que la información objetiva se convierte en el único árbitro válido para la toma de decisiones y la resolución de conflictos.

Esta cultura implica democratizar el acceso a la información. Significa permitir que un jefe de turno de mecanizado pueda visualizar en tiempo real el OEE de sus líneas en un dashboard interactivo a pie de fábrica y tomar medidas correctivas inmediatas ante una desviación de rendimiento, sin tener que esperar al informe de producción en papel del día siguiente elaborado por administración. Para que esta cultura arraigue profundamente, la dirección debe predicar con el ejemplo de forma implacable: exigir datos duros para respaldar cualquier propuesta de inversión o cambio de proceso, basar las reuniones

de seguimiento de producción en métricas extraídas directamente y en vivo de los sistemas (ERP/MES) en lugar de en presentaciones estáticas de PowerPoint, y, fundamentalmente, garantizar que los datos sean transparentes, fiables, limpios y accesibles para quienes los necesitan para ejecutar su trabajo con excelencia.

#### 7.4.2. El rol indelegable de la alta dirección y los mandos intermedios

La transformación digital no puede ser delegada bajo ninguna circunstancia en el departamento de Informática (TI), en el responsable de mantenimiento o en un proveedor tecnológico externo. Es un proyecto integral de transformación del modelo de negocio que requiere el patrocinio activo, visible, entusiasta y sostenido en el tiempo de la **Alta Dirección (CEO, gerencia, consejo de administración)**. El líder digital de una empresa del metal no necesita ser un experto programador en Python o un arquitecto de redes 5G, pero sí debe comprender profundamente cómo la tecnología altera las dinámicas de su modelo de negocio, cómo afecta a la propuesta de valor para sus clientes (por ejemplo, ofreciendo trazabilidad total o servitización) y cómo impacta directamente en la cuenta de resultados (reducción de costes operativos, mejora de márgenes).

El rol indelegable de la alta dirección consiste en definir la visión estratégica clara (el “hacia dónde vamos y por qué”), asegurar la provisión adecuada de recursos (presupuesto financiero, pero sobre todo, tiempo de dedicación del personal clave) y alinear los sistemas de incentivos organizativos con los objetivos de digitalización. Si la dirección exige en sus discursos la implantación de un sistema de calidad digital riguroso, pero a final de mes sigue premiando y bonificando exclusivamente el volumen bruto de producción a corto plazo, ignorando o castigando el tiempo necesario que invierten los operarios para el registro correcto de datos en el sistema, la plantilla, actuando de forma racional, priorizará la producción rápida y el sistema digital fracasará por falta de datos fiables.

Sin embargo, el verdadero campo de batalla de la transformación cultural, donde los proyectos triunfan o mueren, se encuentra en los **mandos intermedios** (jefes de planta, responsables de mantenimiento, encargados de turno, directores de calidad). Ellos son la correa de transmisión vital entre la estrategia directiva abstracta y la ejecución física en el taller. Si el mando intermedio no cree genuinamente en el proyecto, si percibe la tecnología como una amenaza a su autoridad histórica, o si no recibe la formación y el tiempo adecuado para liderar a su equipo en el nuevo entorno, actuará como un bloqueador (*gatekeeper*) letal. El liderazgo digital implica empoderar a estos mandos, dotándoles de herramientas analíticas (tablets, dashboards) que refuercen su capacidad de gestión real y convirtiéndolos en los principales agentes y evangelistas del cambio ante los operarios.

#### 7.4.3. Fomento de la innovación, agilidad y tolerancia al error (bimodalidad)

La industria del metal, por la naturaleza física, pesada, costosa y a menudo peligrosa de sus procesos (fundición a 1.500 grados, prensas de 1.000 toneladas, mecanizado de precisión micrométrica), es intrínsecamente conservadora y altamente adversa al riesgo. Un error en la parametrización de un horno de tratamiento térmico o en el diseño estructural de una viga metálica puede tener consecuencias catastróficas, tanto económicas como para la seguridad humana. Esta cultura de “cero defectos” y “seguridad ante todo”, absolutamente necesaria y loable en la ejecución productiva diaria, puede ser contraproducente y paralizante cuando se aplica rígidamente a la innovación digital.

La digitalización requiere experimentación iterativa. La implantación de algoritmos de Inteligencia Artificial para optimizar rutas, el desarrollo de modelos matemáticos de mantenimiento predictivo o la integración de nuevos sensores IoT en maquinaria antigua son procesos de descubrimiento que rara vez funcionan perfectamente en el primer intento. La cultura organizativa debe desarrollar una “**bimodalidad**” inteligente: mantener el rigor absoluto, la estandarización y la seguridad en la producción física (Modo 1), mientras se crea un espacio seguro, ágil y con presupuesto acotado (*sandbox*) para la experimentación tecnológica y el desarrollo de software (Modo 2).

El liderazgo digital fomenta la agilidad mediante la ejecución de pruebas de concepto (PoC) y proyectos piloto rápidos, baratos y acotados en alcance. Si un piloto de visión artificial para control de calidad de soldaduras falla en su primera iteración porque los reflejos del metal confunden al algoritmo, la cultura organizativa no debe buscar culpables para castigarlos ni cancelar el proyecto, sino extraer el aprendizaje

de forma sistemática (¿Faltaban datos de entrenamiento? ¿La iluminación de la nave era inadecuada? ¿La cámara no tenía la resolución correcta?) y pivotar rápidamente la solución. La tolerancia al “error inteligente” y el aprendizaje rápido (*fail fast, learn faster, scale soon*) son atributos innegociables de una cultura verdaderamente innovadora.

#### 7.4.4. Estructuras organizativas transversales: Rompiendo los silos

Las estructuras organizativas tradicionales en la industria manufacturera suelen ser profundamente verticales, jerárquicas y departamentalizadas (los temidos “silos”). producción, mantenimiento, calidad, compras, oficina técnica y TI operan a menudo como reinos independientes, con objetivos propios, presupuestos separados y sistemas de información desconectados (el ERP para finanzas, el Excel para producción, el papel para calidad). La digitalización, por definición, es un fenómeno transversal que atraviesa toda la cadena de valor.

El valor real de la Industria 4.0 reside en la interconexión fluida de la información: un dato anómalo capturado por un sensor de vibración de mantenimiento en un motor crítico debe cruzar instantáneamente a producción (para reprogramar la carga de trabajo de esa máquina antes de que falle), a calidad (para revisar las piezas producidas durante la vibración anómala) y a compras (para lanzar automáticamente el pedido del rodamiento de repuesto al proveedor). Si la organización mantiene sus silos, este flujo es imposible.

El liderazgo digital debe dismantelar activamente estos silos, promoviendo estructuras organizativas más planas, ágiles y equipos de trabajo multidisciplinares orientados a proyectos o flujos de valor (Value Streams). La creación de “**comités de digitalización**” transversales, donde representantes operativos de planta, finanzas, recursos humanos y tecnología evalúan conjuntamente el impacto, la viabilidad y el ROI de las iniciativas digitales, es una práctica altamente recomendable. La convergencia tecnológica entre IT (sistemas corporativos) y OT (sistemas de planta) es una quimera inalcanzable si no va precedida y acompañada de una convergencia organizativa y cultural entre los departamentos que los gestionan.

#### 7.4.5. Hacia la Industria 5.0: Sostenibilidad, resiliencia y centralidad humana

Finalmente, la cultura organizativa del sector metal debe evolucionar con urgencia para alinearse con los principios rectores de la **Industria 5.0**, promovidos estratégicamente por la Comisión Europea. Este nuevo paradigma no anula la Industria 4.0, sino que la trasciende. Supera la mera búsqueda obsesiva de la eficiencia, la reducción de costes y la productividad automatizada para integrar tres dimensiones fundamentales y éticas en el ADN corporativo de las empresas industriales:

- **Centralidad del ser humano (Human-centric):** La premisa cambia: la tecnología debe adaptarse a las necesidades, capacidades, ergonomía y bienestar del trabajador, y no a la inversa. La cultura corporativa debe priorizar inversiones tecnológicas que mejoren la seguridad física, reduzcan la fatiga y protejan el bienestar cognitivo de la plantilla. Ejemplos prácticos incluyen el uso de exoesqueletos biónicos para la manipulación de cargas pesadas en fundición, la implementación de cobots para tareas repetitivas que causan lesiones, y el diseño de interfaces de software (HMI) intuitivas que no generen estrés. La empresa 5.0 reconoce que, en un entorno de escasez demográfica, el talento humano es el activo más valioso, frágil y escaso.
- **Sostenibilidad y respeto a los límites planetarios:** La digitalización deja de ser un fin en sí misma para convertirse en el habilitador tecnológico indispensable de la transición ecológica y la descarbonización. La cultura organizativa debe integrar la eficiencia energética extrema, la economía circular (reutilización de chatarra, minimización de mermas) y la medición precisa de la huella de carbono del producto. En el sector metal, intensivo en energía, esto es crítico ante normativas punitivas como el CBAM (mecanismo de ajuste en frontera por carbono). La sostenibilidad ya no es una obligación de cumplimiento normativo o un ejercicio de relaciones públicas (*greenwashing*), sino un vector central de competitividad, acceso a financiación (taxonomía verde) y diferenciación en el mercado B2B.
- **Resiliencia sistémica:** La capacidad organizativa y tecnológica de anticipar, reaccionar, absorber y adaptarse rápidamente a disrupciones masivas (roturas abruptas en la cadena de suministro

global, crisis geopolíticas, pandemias, picos de precios energéticos o ciberataques devastadores). Una cultura resiliente valora la flexibilidad operativa por encima de la rigidez extrema, promueve la diversificación de proveedores apoyada en plataformas digitales de visibilidad (Supply Chain Control Towers), y asegura la robustez y redundancia de sus sistemas de información y ciberseguridad.

## 7.5. ANÁLISIS DIFERENCIAL DEL FACTOR HUMANO POR SUBSECTORES (CNAE)

Para que las estrategias de talento y cultura sean verdaderamente efectivas, no pueden aplicarse como una receta genérica (“café para todos”). El diagnóstico revela que las necesidades humanas y organizativas varían profundamente según la realidad física y de mercado de cada subsector del metal. A continuación, se detalla cómo el factor humano interactúa con la tecnología en los tres principales subsectores analizados:

### 7.5.1. Fabricación de productos metálicos (CNAE 25): El operario conectado en entornos de alta variabilidad

Este subsector, que representa el 46,0% de la muestra y concentra el mayor volumen de PYMES, se caracteriza por la fabricación discreta, a menudo bajo pedido, con series cortas y altísima variabilidad de referencias (estructuras, calderería, mecanizado). Su índice de madurez es de 49,50.

**El reto humano:** La variabilidad constante exige una flexibilidad extrema por parte del operario. El principal desafío cultural es la **digitalización del puesto de trabajo en el taller**. Acostumbrados a trabajar con órdenes de fabricación en papel que permiten cierta “flexibilidad informal”; en la imputación de tiempos, la transición a terminales MES táctiles genera fricción. El operario debe convertirse en un gestor de datos en tiempo real, registrando inicios, pausas, mermas y controles de calidad al instante. La formación debe centrarse en demostrar cómo esta captura de datos elimina el trabajo administrativo a posteriori y evita errores de facturación. El liderazgo debe enfocarse en la estandarización de procesos (Lean) antes de digitalizarlos, asegurando que los datos maestros (rutas, tiempos estándar) sean precisos para no frustrar al trabajador con planificaciones irreales.

### 7.5.2. Maquinaria y equipo (CNAE 28): Ingeniería, servitización y perfiles STEM

Con un 27,7% de la muestra y el mayor índice de madurez (53,64), este subsector tiene un alto contenido de ingeniería y diseño complejo. Lideran en adopción de IoT (5,02) y robótica (5,31).

**El reto humano:** La brecha aquí no está tanto en el taller, sino en la **oficina técnica y en la convergencia con producción y posventa**. El reto cultural es romper el muro entre los ingenieros de diseño (que operan en entornos CAD/PLM) y los responsables de producción (ERP/MES). Se requieren perfiles altamente cualificados (STEM) capaces de gestionar el “Hilo Digital” completo. Además, la transición hacia modelos de servitización (vender el rendimiento de la máquina, no solo el hierro) exige un cambio cultural masivo en la fuerza de ventas y en el servicio de asistencia técnica (SAT). Los técnicos de mantenimiento de campo deben formarse en el uso de plataformas IoT en la nube, analítica de datos y herramientas de realidad aumentada para diagnosticar averías en remoto antes de desplazarse a las instalaciones del cliente.

### 7.5.3. Metalurgia y primera transformación (CNAE 24): Relevo generacional en procesos continuos

Representando el 21,0% de la muestra (madurez 49,44), este subsector (siderurgia, fundición) opera con procesos continuos, intensivos en energía y en entornos físicos hostiles (calor, polvo, ruido).

**El reto humano:** El desafío primordial es el **relevo generacional y la captura del conocimiento tácito**. El control de un horno de fundición o un tren de laminación depende en gran medida de la experiencia sensorial de operarios veteranos. La digitalización busca sensorizar estos procesos (IoT 4,98) para aplicar modelos predictivos. El reto cultural es convencer al operario experto de que colabore con los científicos de datos para “entrenar” a los algoritmos, asegurándole que la IA no le reemplazará, sino que le proporcionará herramientas para optimizar el consumo energético y predecir defectos de calidad (porosidades) antes de que ocurran. La formación debe centrarse en la interpretación de variables termodinámicas a través de interfaces digitales (SCADA/BI) y en la concienciación extrema sobre la eficiencia energética como factor de supervivencia empresarial.

## 7.6. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

El éxito o el fracaso de la transformación digital en la industria española del metal no se medirá, en última instancia, por la cantidad de terabytes de datos almacenados en servidores cloud, por el número de brazos robóticos instalados en las líneas de ensamblaje, ni por la sofisticación matemática de los algoritmos de Inteligencia Artificial adquiridos. Se medirá, de forma inexorable, por la capacidad del sector para evolucionar su cultura organizativa, rediseñar sus procesos y capacitar a sus profesionales para operar en un entorno ciberfísico.

El diagnóstico es claro: la industria posee una base tecnológica transaccional razonable, pero se enfrenta a un cuello de botella crítico en la integración, la explotación analítica y la gobernanza de la información. Superar este estancamiento requiere reconocer que la brecha digital es, fundamentalmente, una brecha de talento y de gestión del cambio.

El talento híbrido, la gestión proactiva y empática de la resistencia al cambio, el compromiso inquebrantable con el aprendizaje continuo (upskilling/reskilling) y un liderazgo visionario, transversal y orientado al dato son los verdaderos cimientos sobre los que se construye la competitividad industrial del siglo XXI. Las empresas del metal que entiendan profundamente que la digitalización es, ante todo y sobre todo, un **proyecto humano**, serán las únicas capaces de transitar con éxito hacia la Industria 5.0 y liderar el mercado global en la próxima década.

Figura 7: Talento, cultura y factor humano



## 8. SOSTENIBILIDAD INDUSTRIAL Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

La convergencia entre la transformación digital y la transición ecológica (comúnmente denominada “transición gemela” o *twin transition*) constituye el eje vertebrador de la política industrial europea contemporánea y el principal vector de competitividad para la industria española del metal en el horizonte 2030.

Tras haber analizado en los capítulos precedentes el estado de madurez digital del sector (situado en un índice medio de 50,4 sobre 100), las brechas tecnológicas por tamaño y subsector, y el papel crítico del factor humano y la cultura organizativa, este octavo capítulo aborda la dimensión de la sostenibilidad industrial y la eficiencia energética como corolario ineludible de la digitalización.

El sector del metal, que aporta el 6,2% del PIB español y emplea a más de un millón de trabajadores, se caracteriza por una alta intensidad en el consumo de energía y materias primas, especialmente en subsectores como la metalurgia y la primera transformación (CNAE 24).

Históricamente, la sostenibilidad en entornos industriales pesados se ha percibido como un centro de coste o una mera obligación de cumplimiento normativo. Sin embargo, la irrupción del paradigma de la Industria 5.0 ha redefinido esta percepción, situando la sostenibilidad, junto con la resiliencia y la centralidad del ser humano, en el núcleo mismo de la estrategia de creación de valor.

La digitalización no es un fin en sí mismo, sino el habilitador tecnológico indispensable para alcanzar los objetivos de descarbonización, economía circular y eficiencia operativa exigidos por marcos regulatorios cada vez más estrictos, como el mecanismo de ajuste en frontera por carbono (CBAM), la Ley de industria de cero emisiones netas (NZIA) y la Ley de materias primas críticas (CRMA). Sin una infraestructura de datos robusta, la medición precisa de la huella de carbono, la optimización del consumo energético en tiempo real y la trazabilidad del ciclo de vida del producto resultan operativamente inalcanzables.

Este capítulo se estructura en cuatro grandes bloques analíticos.

- En la sección 8.1, se explora la relación simbiótica entre la **digitalización y la sostenibilidad productiva**, analizando cómo las tecnologías de la información (IT) y las tecnologías de la operación (OT) convergen para crear ecosistemas de fabricación sostenibles.
- La sección 8.2 profundiza en la **eficiencia energética y la optimización de recursos**, detallando el impacto de la sensorización (IoT), la analítica de datos (Big Data) y la Inteligencia Artificial en la reducción de consumos.
- La sección 8.3 aborda el impacto ambiental y la **transición hacia una economía circular**, con especial énfasis en el reciclaje de metales y la servitización.

El análisis que se presenta a continuación se fundamenta en la evidencia empírica extraída de la muestra nacional de 318 empresas del sector metal-mecánico. Los datos revelan una realidad dual: si bien existe una concienciación creciente sobre la importancia de la sostenibilidad, la capacidad técnica para medirla y gestionarla de forma automatizada sigue siendo limitada. Con una adopción de herramientas de *Business Intelligence* (BI) de apenas el 36,2% y una integración de IoT en producción puntuada en 4,59 sobre 9, la industria española del metal se enfrenta al reto monumental de “ordenar sus datos” para poder, posteriormente, “optimizar su impacto ambiental”.

La tesis central de este capítulo es que la sostenibilidad industrial ya no puede gestionarse mediante estimaciones retrospectivas o cálculos manuales en hojas de cálculo. Requiere una arquitectura de datos en tiempo real, interoperabilidad entre sistemas y una gobernanza de la información que permita a las empresas del metal demostrar su desempeño ambiental ante clientes, reguladores e inversores con el mismo rigor con el que demuestran su solvencia financiera.

## 8.1. DIGITALIZACIÓN Y SOSTENIBILIDAD PRODUCTIVA

La intersección entre la digitalización y la sostenibilidad productiva representa el núcleo operativo de la Industria 5.0. Mientras que la Industria 4.0 se centró primordialmente en la interconexión de sistemas ciberfísicos para maximizar la eficiencia, la productividad y la flexibilidad, la Industria 5.0 introduce una restricción fundamental: la producción debe operar dentro de los límites planetarios. Esta evolución paradigmática exige que las herramientas digitales se reorienten hacia la minimización del impacto ambiental, la reducción del desperdicio y la prolongación del ciclo de vida de los materiales.

### 8.1.1. Industria 5.0 y sostenibilidad basada en datos

La Industria 5.0 sitúa la sostenibilidad y la eficiencia de recursos como ejes centrales de la competitividad industrial.

En el sector metal, la digitalización permite controlar consumos, emisiones y procesos en tiempo real, integrando ERP, MES e IoT para disponer de una visión completa de la operación.

El estudio refleja una orientación creciente hacia estos principios (5,05/9), aunque todavía existe una brecha importante entre la estrategia y la implantación práctica debido a la falta de integración entre sistemas IT y OT.

### 8.1.2. Trazabilidad digital como motor de sostenibilidad

La trazabilidad digital de la cadena de suministro es el área de gestión de datos con mayor desarrollo relativo en el sector, alcanzando una puntuación de 5,25 sobre 9. Históricamente, la trazabilidad en el metal ha estado impulsada por exigencias de calidad y seguridad, especialmente en subsectores críticos como la automoción, la aeronáutica y la fabricación de estructuras metálicas. Sin embargo, en el contexto de la sostenibilidad productiva, la trazabilidad adquiere una nueva dimensión: se convierte en el mecanismo fundamental para auditar el impacto ambiental.

La trazabilidad digital avanzada implica el uso de tecnologías como RFID (identificación por radiofrecuencia), códigos QR, marcaje láser directo (DPM) y, en fases más maduras, arquitecturas de registro distribuido (Blockchain) para crear un historial inmutable de cada componente metálico. Este "hilo digital" (Digital Thread) permite rastrear una pieza desde la colada original en la siderurgia, pasando por los procesos de estampación, mecanizado y tratamiento superficial, hasta su ensamblaje final y eventual reciclaje al final de su vida útil.

Esto facilita:

- acreditar contenido reciclado,
- calcular la huella ambiental real,
- optimizar el reciclaje y la logística inversa,
- responder a auditorías ambientales y regulatorias.

La principal limitación sigue siendo la falta de continuidad de datos entre compras, producción y expedición.

A pesar de su importancia, el estudio revela que la trazabilidad sigue siendo incompleta en muchas PYMES del sector. La falta de continuidad informativa entre la recepción de materiales, la producción en curso (WIP) y la expedición limita la capacidad de respuesta ante auditorías ambientales y reduce la fiabilidad de los reportes de sostenibilidad. La consolidación de la trazabilidad digital es, por tanto, un paso previo e ineludible para la implementación de normativas europeas inminentes.

### 8.1.3. Pasaporte digital de producto (DPP)

El pasaporte digital de producto será una exigencia clave en la industria europea. Cada producto deberá incorporar información verificable sobre:

- composición,
- huella de carbono,
- origen de materiales,
- contenido reciclado,
- reciclabilidad y cumplimiento normativo.

Su implantación exigirá:

- sistemas ERP integrados,
- plataformas cloud,
- trazabilidad avanzada,
- intercambio seguro de información entre empresas.

Las compañías con baja madurez digital afrontan un riesgo elevado de exclusión competitiva.

#### 8.1.4 Gemelos digitales para la optimización sostenible

El gemelo digital (Digital Twin) representa la cúspide de la convergencia entre digitalización y sostenibilidad productiva. Definido como una réplica virtual y dinámica de un activo físico, proceso o sistema, sincronizada en tiempo real mediante datos de sensores IoT, el gemelo digital permite simular, predecir y optimizar el comportamiento de la planta industrial sin interrumpir la producción real.

En el contexto de la sostenibilidad, los gemelos digitales ofrecen capacidades transformadoras para la industria del metal:

- **Puesta en marcha virtual (Virtual Commissioning):** Especialmente relevante en el subsector de fabricación de maquinaria y equipo (CNAE 28), permite probar y depurar el software de control (PLCs) y la cinemática de una máquina en un entorno virtual antes de su construcción física. Esto reduce drásticamente el consumo de materiales en prototipos fallidos, minimiza los desplazamientos de técnicos para la puesta en marcha y optimiza el diseño para la eficiencia energética desde la fase de ingeniería.
- **Optimización termodinámica en metalurgia:** En procesos intensivos como la siderurgia o la fundición (CNAE 24), los gemelos digitales alimentados por algoritmos de Inteligencia Artificial (cuya adopción global es del 17,4%) pueden simular el comportamiento del metal fundido, optimizando las recetas de aleación y los perfiles de enfriamiento para minimizar el consumo de gas natural o electricidad, reduciendo simultáneamente la tasa de defectos (scrap).
- **Análisis de escenarios “What-If”:** Permite a los directores de planta simular el impacto ambiental y económico de diferentes estrategias de producción. Por ejemplo, evaluar si es más sostenible energéticamente mantener un horno en modo de espera (standby) durante un fin de semana o apagarlo y asumir el pico de consumo necesario para el recalentamiento el lunes por la mañana.

A pesar de su enorme potencial, la adopción de gemelos digitales en la industria española del metal es aún incipiente y se concentra en las grandes corporaciones. La barrera principal no es la disponibilidad del software de simulación, sino la falta de datos históricos limpios, la baja penetración de la sensorización avanzada y la escasez de perfiles híbridos capaces de modelar matemáticamente los procesos físicos. Para democratizar el acceso a esta tecnología, es fundamental avanzar previamente en la consolidación de la base digital (ERP, MES, IoT básico) y en la gobernanza del dato.

*“La digitalización productiva contemporánea exige un salto adicional: convertir las capacidades físicas en nodos informacionales conectados con planificación, calidad, mantenimiento, energía y dirección. Esta capa es la que habilita la gestión avanzada del rendimiento y la sostenibilidad medible.”*

- Informe Ampliado sobre Digitalización.

La transición hacia una sostenibilidad productiva basada en datos requiere un cambio cultural profundo. La sostenibilidad debe dejar de ser un apéndice en la memoria anual de responsabilidad social

corporativa para integrarse en los cuadros de mando operativos diarios (dashboards) de los jefes de planta y directores de producción. Cuando el consumo de kWh por tonelada producida o la huella de carbono por lote se monitorizan con la misma rigurosidad y frecuencia que el OEE (Overall Equipment Effectiveness) o la tasa de rechazos, la digitalización despliega todo su potencial como motor de la transición ecológica.

## 8.2. EFICIENCIA ENERGÉTICA Y OPTIMIZACIÓN DE RECURSOS

La eficiencia energética constituye el pilar más pragmático, inmediato y económicamente cuantificable de la sostenibilidad industrial. En un contexto macroeconómico caracterizado por la volatilidad de los precios de la energía y la presión regulatoria para la descarbonización, la optimización del consumo energético ha dejado de ser una mera iniciativa de ahorro de costes para convertirse en un imperativo de supervivencia competitiva para la industria española del metal.

La digitalización proporciona las herramientas analíticas y de control necesarias para hacer visible lo invisible: identificar consumos anómalos, detectar ineficiencias microscópicas en tiempo real y correlacionar el gasto energético con las variables de producción. Sin embargo, el diagnóstico sectorial revela que la explotación sistemática de los datos para la eficiencia energética es aún una asignatura pendiente en gran parte del tejido empresarial.

### 8.2.1. Intensidad energética en los subsectores del metal

El impacto de los costes energéticos y, por ende, la urgencia de la eficiencia energética, varía drásticamente según la naturaleza del proceso productivo. El análisis de la muestra de 318 empresas permite segmentar estas necesidades por subsector (CNAE):

- **Metalurgia y primera transformación (CNAE 24):** Este subsector, que representa el 21,0% de la muestra, engloba la siderurgia, las fundiciones y la producción de metales básicos. Es la industria pesada por excelencia, caracterizada por procesos continuos o por lotes masivos (batch) extremadamente intensivos en consumo de gas natural y electricidad (hornos de arco eléctrico, hornos de inducción, trenes de laminación). Aquí, una mejora del 1% en la eficiencia energética se traduce en ahorros financieros masivos y reducciones significativas de emisiones de CO<sub>2</sub>. La prioridad digital es el control avanzado de procesos (APC) y la sensorización robusta en entornos hostiles (altas temperaturas, polvo).
- **Fabricación de productos metálicos (CNAE 25):** Representando el 46,0% de la muestra, este subsector incluye actividades como la forja, estampación, mecanizado, calderería y tratamiento de superficies. Aunque menos intensivo que la metalurgia básica, el consumo energético de los centros de mecanizado CNC, las prensas, los compresores de aire comprimido y los baños galvanicos es sustancial. El reto aquí es la variabilidad: al fabricar series cortas o bajo pedido, el consumo energético por pieza fluctúa enormemente. La digitalización debe enfocarse en correlacionar el consumo con órdenes de fabricación específicas para calcular el coste energético real por producto.
- **Maquinaria y equipo (CNAE 28):** Con un 27,7% de la muestra, este subsector se centra en el ensamblaje y la ingeniería. Su consumo energético directo en planta es comparativamente menor. Sin embargo, su responsabilidad en la eficiencia energética es indirecta pero masiva: diseñan y fabrican los bienes de equipo que consumirán energía en las instalaciones de sus clientes durante décadas. La prioridad digital es el ecodiseño (utilizando software CAD/CAE avanzado) y la integración de IoT en el producto final para monitorizar y optimizar el consumo energético de la máquina durante su fase de uso (servitización).

### 8.2.2. Sistemas de gestión energética (EMS) basados en IA y analítica de datos

El enfoque tradicional hacia la eficiencia energética en la industria se ha basado en auditorías periódicas, la sustitución de equipos obsoletos por motores de alta eficiencia (IE3/IE4) o la instalación de iluminación LED. Si bien estas medidas pasivas son necesarias, su potencial de mejora tiene un límite físico. El siguiente salto cualitativo proviene de la gestión activa y dinámica de la energía mediante sistemas de gestión energética (EMS - Energy Management Systems) integrados con la producción.

Un EMS moderno no se limita a registrar el consumo total de la fábrica en la acometida principal. Utiliza una red de submedidores (analizadores de redes) conectados vía IoT para monitorizar el consumo eléctrico, de gas, agua y aire comprimido a nivel de línea, máquina o incluso componente individual en tiempo real. Sin embargo, el estudio revela que la adopción de herramientas de Business Intelligence (BI) para explotar estos datos se sitúa en un bajo 36,2%, y la Inteligencia Artificial en un 17,4%. Esto indica que, aunque algunas empresas miden, muy pocas analizan y optimizan de forma automatizada.

La integración de la Inteligencia Artificial en los EMS abre posibilidades disruptivas para la optimización de recursos:

- **Predicción de la demanda energética:** Los algoritmos de Machine Learning pueden analizar el plan de producción del ERP, las previsiones meteorológicas (que afectan a la climatización y al rendimiento de ciertos procesos) y los patrones históricos para predecir con alta precisión la curva de demanda energética de la planta para los próximos días.
- **Optimización de la factura eléctrica (Peak Shaving):** En un mercado eléctrico con alta volatilidad horaria, la IA puede sugerir o ejecutar automáticamente el desplazamiento de procesos intensivos en energía (pero no críticos en tiempo, como el funcionamiento de molinos trituradores o ciertos tratamientos térmicos) hacia las franjas horarias con tarifas más económicas, evitando penalizaciones por excesos de potencia contratada.
- **Detección de anomalías y fugas:** La analítica avanzada puede establecer una línea base (baseline) del consumo energético normal de una máquina en un estado operativo específico. Si el consumo real se desvía de este modelo predictivo (por ejemplo, un compresor que consume más energía de la esperada para mantener la presión), el sistema genera una alerta temprana. Esto permite detectar fugas de aire comprimido (una de las mayores fuentes de ineficiencia en el metal) o fricciones mecánicas antes de que se conviertan en averías graves.

Para que estos sistemas EMS avanzados sean efectivos, es imperativa la convergencia OT/IT. Los datos de consumo energético (OT) deben cruzarse con los datos de producción (IT/MES) para calcular el indicador clave de rendimiento (KPI) definitivo de la sostenibilidad industrial: la **intensidad energética específica** (por ejemplo, kWh consumidos por tonelada de acero fundido, o kWh por pieza mecanizada conforme). Sin esta contextualización, un aumento en el consumo eléctrico podría interpretarse erróneamente como una ineficiencia, cuando en realidad podría deberse a un aumento legítimo en el volumen de producción.

### 8.2.3. Monitorización IoT y reducción de consumos ocultos

La integración de Internet de las Cosas (IoT) en producción, que presenta una puntuación media de 4,59 sobre 9 en el sector, es el habilitador físico de la eficiencia energética. La sensorización permite arrojar luz sobre los “consumos ocultos” o “pérdidas invisibles” que erosionan la rentabilidad y la sostenibilidad de las plantas metalúrgicas.

Uno de los mayores sumideros de energía en la industria manufacturera discreta (CNAE 25) es el consumo en vacío (idle time) o durante las microparasadas. Las máquinas herramienta CNC, las prensas y los sistemas de extracción de humos a menudo permanecen encendidos y consumiendo energía significativa durante los cambios de turno, las pausas para el bocadillo, los tiempos de preparación (setup/SMED) o mientras el operario busca herramientas o materiales debido a una mala logística interna.

La digitalización aborda este problema mediante:

- **Monitorización de estados de máquina:** Conectando el PLC de la máquina al sistema MES, es posible registrar automáticamente el estado real del equipo (produciendo, en preparación, en avería, en espera). Al cruzar este estado con el consumo eléctrico, se cuantifica el coste exacto de la energía desperdiciada durante los tiempos no productivos.
- **Automatización del apagado/encendido (Standby management):** En plantas más avanzadas, el sistema de control puede poner automáticamente las máquinas en modos de bajo consumo

(apagando bombas hidráulicas, extractores o pantallas) si detecta que no hay órdenes de fabricación programadas para los próximos minutos, y reactivarlas justo a tiempo para el siguiente lote.

- **Optimización del OEE (Overall Equipment Effectiveness):** Existe una correlación directa entre la productividad y la eficiencia energética. Mejorar el OEE reduciendo las paradas no planificadas y los tiempos de ciclo no solo aumenta la capacidad de la fábrica, sino que diluye el consumo energético base (iluminación, climatización, sistemas auxiliares) entre un mayor número de piezas producidas, mejorando la intensidad energética global.

El estudio subraya que la oportunidad inmediata para el sector no está siempre en incorporar equipamiento más sofisticado, sino en hacer visible y comparable la operación existente. Disponer de un registro estructurado de paradas, consumos y estados de máquina puede transformar la forma de gestionar la planta, representando para muchas PYMES el retorno más rápido de la digitalización productiva.

#### 8.2.4. Transición hacia vectores energéticos limpios: El rol del hidrógeno verde

Más allá de la optimización del consumo, la descarbonización profunda de la industria del metal, especialmente la siderurgia, requiere un cambio estructural en los vectores energéticos utilizados. La sustitución de los combustibles fósiles (carbón, coque, gas natural) por electricidad de origen renovable y, fundamentalmente, por hidrógeno verde, es el gran reto tecnológico de la década.

España ocupa una posición geoestratégica privilegiada para liderar esta transición, concentrando el 20% de los proyectos de producción de hidrógeno verde de la UE gracias a su extraordinario potencial de energía solar y eólica. Proyectos pioneros como la planta de reducción directa de hierro (DRI-H<sub>2</sub>) de ArcelorMittal en Gijón o el proyecto Hydnum Steel en Puertollano son ejemplos de esta apuesta por el “acero verde”.

Sin embargo, la adopción del hidrógeno verde a escala industrial plantea desafíos operativos formidables que solo pueden resolverse mediante una digitalización extrema:

- **Gestión de la volatilidad:** A diferencia del gas natural, cuyo suministro es estable, la producción de hidrógeno verde (mediante electrólisis) está sujeta a la intermitencia de las fuentes renovables (sol y viento). Las plantas siderúrgicas del futuro deberán operar de forma mucho más flexible, adaptando su ritmo de producción a la disponibilidad y el precio del hidrógeno en tiempo real. Esto requiere sistemas de planificación avanzada (APS) y algoritmos de IA capaces de orquestar la producción, el almacenamiento de hidrógeno y el consumo de la red eléctrica de forma dinámica.
- **Control de procesos críticos:** La termodinámica de la reducción directa con hidrógeno difiere de la de los altos hornos tradicionales. Requiere sistemas de control distribuido (DCS) de nueva generación, equipados con sensorica avanzada y gemelos digitales, para gestionar las exigencias de seguridad, temperatura y presión del hidrógeno a escala industrial, garantizando la calidad metalúrgica del producto final.

Como advierte el informe de contexto, la transición hacia el acero verde requiere un acompañamiento de política pública intenso, dado que la competitividad del hidrógeno verde en el corto plazo aún presenta tensiones frente a las alternativas fósiles. La digitalización actúa aquí como un mitigador de riesgos, maximizando la eficiencia del proceso para compensar el mayor coste inicial del vector energético limpio.

### 8.3. IMPACTO AMBIENTAL Y ECONOMÍA CIRCULAR

La mitigación del impacto ambiental de la industria del metal trasciende la mera eficiencia energética en la fase de fabricación. Abarca todo el ciclo de vida de los materiales, desde la extracción de los minerales hasta la gestión de los residuos y el reciclaje al final de la vida útil del producto. En este contexto, la transición desde un modelo económico lineal (“extraer, fabricar, usar y desechar”) hacia un modelo de economía circular se erige como el paradigma dominante para garantizar la sostenibilidad a largo plazo y la seguridad de suministro del sector.

La digitalización proporciona la infraestructura de información necesaria para cerrar el círculo de los materiales. Sin datos precisos sobre la composición, ubicación, estado y propiedad de los activos metálicos, la economía circular es logísticamente inmanejable a escala industrial. El análisis de la muestra de empresas españolas revela que, si bien existen prácticas circulares arraigadas (como el reciclaje de chatarra), la integración de tecnologías digitales para optimizar y certificar estos flujos circulares se encuentra en una fase incipiente.

### 8.3.1. Descarbonización y el mecanismo de ajuste en frontera por carbono (CBAM)

La descarbonización de los procesos productivos es el vector más urgente del impacto ambiental, impulsado por la emergencia climática y la arquitectura regulatoria del Pacto Verde Europeo. Para la industria del metal, el hito regulatorio más disruptivo es la implantación progresiva del Mecanismo de ajuste en frontera por carbono (CBAM, por sus siglas en inglés) a partir de 2026.

El CBAM tiene como objetivo igualar el precio del carbono entre los productos nacionales de la UE y las importaciones, evitando la “fuga de carbono” (la deslocalización de la producción hacia países con normativas climáticas más laxas). Afecta directamente a las importaciones de acero, hierro y aluminio, entre otros bienes intensivos en emisiones. Si bien el CBAM busca proteger la competitividad de la industria europea frente a la competencia desleal (especialmente la sobrecapacidad asiática), también introduce una complejidad administrativa y de gestión de datos sin precedentes para las empresas españolas del metal que importan materias primas o semielaborados.

La respuesta a este desafío es fundamentalmente digital:

- **Contabilidad del carbono (Carbon Accounting):** Las empresas deben ser capaces de calcular con precisión las emisiones directas (Alcance 1) e indirectas (Alcances 2 y 3) asociadas a sus productos. Esto requiere integrar los datos de consumo energético (IoT/EMS), las facturas de proveedores (ERP) y los factores de emisión estandarizados en plataformas de software especializadas en contabilidad de carbono.
- **Trazabilidad de la cadena de suministro:** Para cumplir con el CBAM, los importadores deberán declarar las emisiones implícitas en los bienes importados. Esto exige una trazabilidad digital profunda (puntuada actualmente en 5,25/9 en el sector) que se extienda más allá de las fronteras de la empresa (Tier 1, Tier 2, etc.), requiriendo la colaboración digital con proveedores internacionales mediante portales B2B o redes Blockchain.
- **Auditoría y verificación:** Los datos de emisiones deberán ser verificados por terceros independientes. La digitalización de los registros, asegurando la inmutabilidad y la procedencia del dato, reduce drásticamente los costes y tiempos de auditoría, convirtiendo el cumplimiento normativo en un proceso automatizado en lugar de un esfuerzo manual titánico.

### 8.3.2. Reciclaje de metales y la Ley de materias primas críticas (CRMA)

El metal es, por su propia naturaleza química, un material permanentemente reciclable sin pérdida de propiedades mecánicas. España es un referente europeo en este ámbito: en 2024, recicló 9,4 millones de toneladas de acero, y prácticamente el 80% de su producción siderúrgica provino de chatarra reciclada en hornos de arco eléctrico (EAF). Esta alta tasa de circularidad posiciona a la industria española ventajosamente en términos de huella de carbono frente a las rutas siderúrgicas integrales basadas en mineral de hierro y altos hornos.

Sin embargo, el paradigma de la economía circular se enfrenta a nuevos retos impulsados por la transición energética y digital. La fabricación de vehículos eléctricos, aerogeneradores, paneles solares y equipos electrónicos demanda cantidades masivas de metales base (cobre, aluminio) y, críticamente, de metales menores y tierras raras (litio, cobalto, níquel, neodimio). La dependencia de la UE respecto a terceros países (principalmente China) para el suministro de estos materiales constituye una vulnerabilidad estratégica inaceptable.

En respuesta, la UE ha promulgado el Reglamento de materias primas críticas (CRMA), que establece objetivos vinculantes para 2030: el 10% de la extracción, el 40% del procesamiento y el 25% del reciclaje de estas materias primas deben realizarse dentro de territorio comunitario. Para el sector metal español, esto abre oportunidades estratégicas (como el proyecto CirCular de Atlantic Copper en Huelva para la recuperación de metales no féreos de residuos electrónicos), pero exige una sofisticación digital en la gestión de la chatarra:

- **Clasificación inteligente de chatarra:** La calidad del acero o aluminio reciclado depende críticamente de la pureza de la chatarra de entrada. La presencia de elementos residuales (tramp elements) como el cobre en la chatarra de acero degrada las propiedades del producto final. La aplicación de tecnologías de visión artificial (adopción actual del 18,8%) combinadas con espectroscopía y Machine Learning permite clasificar automáticamente los flujos de chatarra en los parques de chatarra a alta velocidad, separando aleaciones incompatibles y maximizando el valor del material recuperado.
- **Mercados digitales de materiales secundarios:** La creación de plataformas B2B basadas en la nube (cloud computing, 57,1% de adopción) facilita el intercambio transparente de subproductos y recortes industriales entre empresas. Lo que es un residuo (scrap) para un taller de estampación puede ser la materia prima perfecta para una fundición local, reduciendo los costes logísticos y la huella de carbono del transporte.

### 8.3.3. Servitización (Equipment-as-a-Service) como modelo circular

En el subsector de fabricación de maquinaria y bienes de equipo (CNAE 28), que ostenta el mayor índice de madurez digital del estudio (53,64/100), la economía circular se materializa a través de la transformación del modelo de negocio: la servitización. En lugar de vender la propiedad física de una máquina (un torno, un compresor, un sistema de elevación), el fabricante vende el servicio, el rendimiento o el tiempo de uso que esa máquina proporciona (Equipment-as-a-Service o Pay-per-Use).

Este modelo alinea intrínsecamente los incentivos económicos con la sostenibilidad ambiental:

- **Diseño para la durabilidad y reparabilidad:** Dado que el fabricante retiene la propiedad del activo y asume los costes de mantenimiento, tiene un incentivo financiero directo para diseñar máquinas más robustas, modulares y fáciles de reparar, combatiendo la obsolescencia programada.
- **Mantenimiento predictivo y extensión de vida útil:** Utilizando la conectividad IoT (puntuada en 5,02/9 en este subsector) y algoritmos de Inteligencia Artificial, el fabricante monitoriza el estado de salud de la máquina en las instalaciones del cliente. El mantenimiento predictivo (adoptado por el 35,3% a nivel global) permite sustituir componentes justo antes de que fallen, evitando averías catastróficas que destruirían la máquina y maximizando la vida útil del activo físico.
- **Remanufactura (Refurbishment):** Al final del contrato de servicio, el fabricante recupera la máquina, la desmonta, actualiza los componentes desgastados o el software, y la reintroduce en el mercado para un segundo o tercer ciclo de vida, reduciendo drásticamente la necesidad de extraer nuevas materias primas y la energía asociada a la fabricación desde cero.

La servitización es inviable sin una arquitectura digital madura. Requiere conectividad 5G/IoT robusta, plataformas cloud para la ingesta masiva de telemetría, analítica de datos para la facturación dinámica basada en el uso, y sistemas CRM (51,6% de adopción en CNAE 28) avanzados para gestionar la relación continua con el cliente.

### 8.3.4. Gestión de mermas, reprocesos y optimización de la huella material

A nivel de planta (Shop Floor), el impacto ambiental más directo y evitable es la generación de mermas (scrap) y la necesidad de reprocesar piezas defectuosas. Cada pieza metálica rechazada en el control de calidad final representa un desperdicio acumulado de materia prima, energía de fundición, tiempo de mecanizado, fluidos de corte y horas de trabajo humano.

La digitalización de los procesos productivos ataca este problema desde la raíz, pasando de un enfoque reactivo (detectar el defecto al final) a un enfoque preventivo y predictivo (evitar que el defecto se produzca):

- **Control de calidad en proceso (In-process Quality Control):** La integración de sistemas de Visión Artificial (18,8% de adopción) y sensores de precisión en las propias líneas de mecanizado o soldadura permite inspeccionar el 100% de las piezas en tiempo real. Si se detecta una desviación de las tolerancias, la máquina se detiene automáticamente o ajusta sus parámetros, evitando la producción de un lote entero de piezas defectuosas.
- **Analítica de causas raíz (Root Cause Analysis):** Cuando se produce un defecto, la falta de integración de datos dificulta identificar el origen. Al conectar los datos de calidad con los parámetros de la máquina (velocidad del husillo, vibración, temperatura del refrigerante) almacenados en un Data Lake, las herramientas de Business Intelligence (36,2%) y Machine Learning pueden identificar correlaciones ocultas. Por ejemplo, descubrir que una porosidad específica en una pieza de fundición solo ocurre cuando la humedad ambiental supera cierto umbral y la temperatura de colada cae por debajo de un límite preciso.
- **Manufactura Aditiva (Impresión 3D metálica):** Aunque su adopción masiva aún es lejana, la impresión 3D representa el paradigma de la eficiencia material. A diferencia del mecanizado tradicional (sustractivo), donde hasta el 80% de un bloque de metal puede convertirse en viruta para obtener la pieza final (buy-to-fly ratio), la manufactura aditiva deposita material solo donde es estrictamente necesario. Esto permite crear geometrías topológicamente optimizadas, más ligeras (reduciendo el consumo de combustible en sectores como el aeroespacial o la automoción) y con un desperdicio de material cercano a cero.

La reducción sistemática del scrap y los reprocesos mediante la digitalización tiene un doble dividendo: mejora directamente el margen operativo de la empresa (reducción de costes) y disminuye drásticamente su huella ambiental (menor consumo de recursos por unidad de producto vendible). Es el ejemplo más claro de cómo la eficiencia operativa y la sostenibilidad convergen en la cuenta de resultados.

#### 8.4. HOJA DE RUTA ESTRATÉGICA PARA LA PYME DEL METAL

La integración de la sostenibilidad mediante la digitalización no debe abordarse como un proyecto monolítico y abrumador, sino a través de una hoja de ruta pragmática, secuencial y adaptada al nivel de madurez de cada empresa, alineada con las cuatro oleadas propuestas en el estudio sectorial:

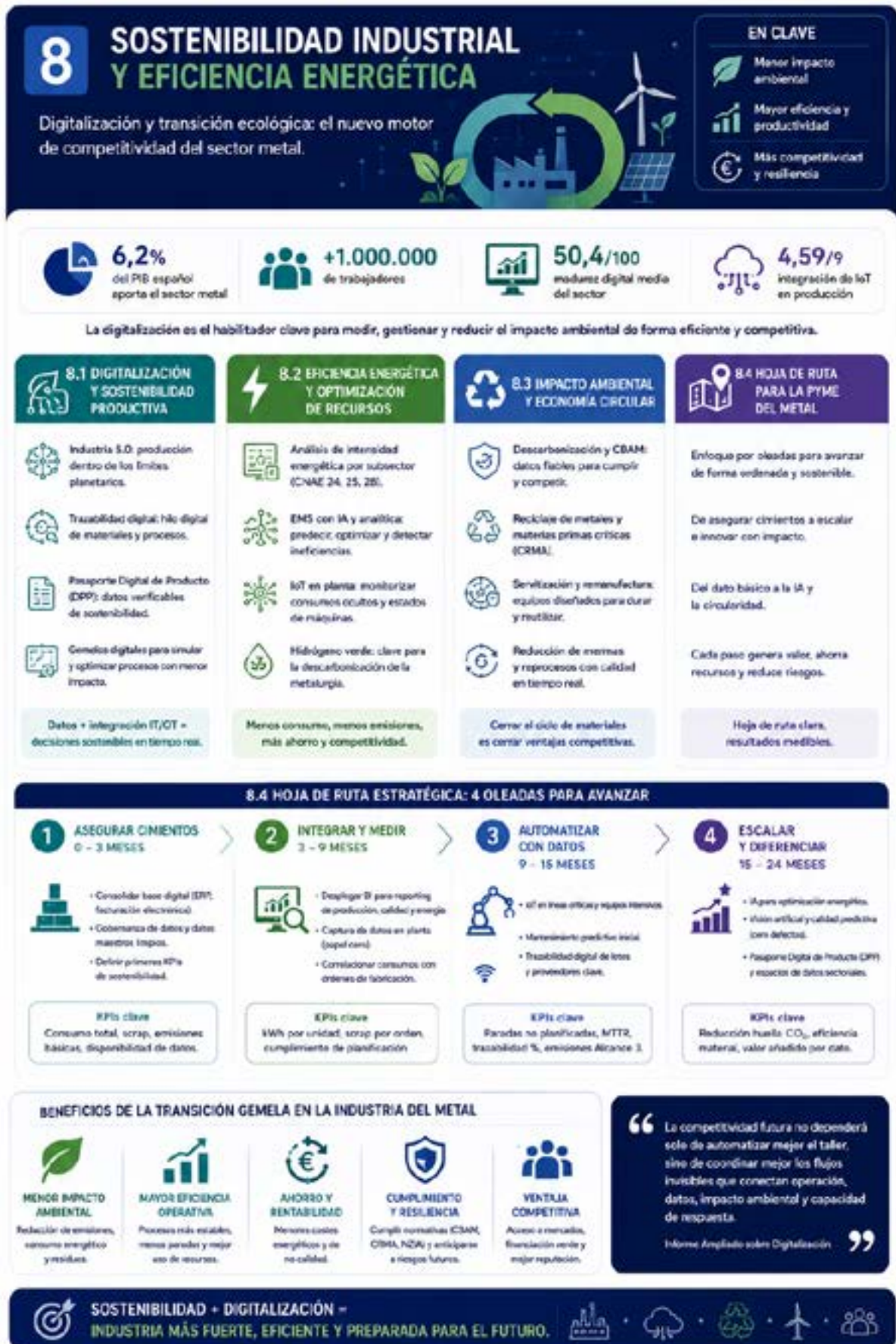
1. **Oleada 1: Asegurar Cimientos (0-3 meses).** El primer paso hacia la sostenibilidad es el orden. Las empresas en “Rezago estructural” o “Transición” deben consolidar su base digital (ERP, facturación electrónica) y establecer una gobernanza de datos básica. Sin datos maestros limpios (artículos, rutas, listas de materiales), es imposible calcular consumos o huellas ambientales. Se deben definir los primeros KPIs de sostenibilidad (ej. consumo eléctrico total mensual, toneladas de scrap) y asegurar su medición fiable.
2. **Oleada 2: Integrar y Medir (3-9 meses).** Despliegue de una primera capa de Business Intelligence (BI) para automatizar el reporting de producción, calidad y consumos. Normalizar la captura de datos en planta (eliminando el papel) para correlacionar el gasto energético y material con las órdenes de fabricación específicas. Es la fase de “hacer visible lo invisible”.
3. **Oleada 3: Automatizar con Datos (9-15 meses).** Ejecución de pilotos tecnológicos con retorno claro. Sensorización IoT de las líneas o máquinas más intensivas en energía (hornos, grandes prensas) para monitorizar el consumo en tiempo real. Implementación de mantenimiento predictivo básico para evitar averías catastróficas y extender la vida útil de los activos. Digitalización de la trazabilidad de lotes críticos para preparar la respuesta a exigencias de clientes (alcance 3 de emisiones).

4. **Oleada 4: Escalar y Diferenciar (15-24 meses).** Para las empresas “Avanzadas” y “Líderes”, es el momento de desplegar Inteligencia Artificial para la optimización energética dinámica, implementar sistemas de visión artificial para el control de calidad preventivo (cero defectos), y prepararse tecnológicamente para la emisión de Pasaportes Digitales de Producto (DPP). Exploración de modelos de servitización y participación en espacios de datos sectoriales para la economía circular.

*“La competitividad futura no dependerá solo de automatizar mejor el taller, sino también de coordinar mejor los flujos invisibles que conectan pedidos, documentación, trazabilidad, relación con cliente, impacto ambiental y capacidad de respuesta interna.”*

- Informe Ampliado sobre Digitalización.

Figura 8: Sostenibilidad industrial y eficiencia energética



## 9. BUENAS PRÁCTICAS DETECTADAS EN EMPRESAS DEL METAL.

En este apartado se desarrollan de manera breve quince buenas prácticas aplicables a empresas españolas del metal, organizadas por áreas funcionales. Son prácticas identificadas en empresas visitadas parte de las 318 que conforman el sustrato de este documento.

La redacción parte de una premisa central: la digitalización industrial no consiste únicamente en incorporar herramientas, sino en integrarlas en procesos, personas, datos y decisiones. En el sector metal, donde conviven microempresas, pequeñas y medianas empresas, compañías tractoras, entornos de fabricación discreta, procesos intensivos, subcontratación especializada y cadenas de valor exigentes, las buenas prácticas deben ser realistas y graduables. Se han excluido los nombres de las empresas por el compromiso profesional de privacidad con el que siempre trabajamos con las mismas.

Cada buena práctica se presenta con enfoque de consultoría: propósito, aplicación práctica, pautas de implantación, indicadores recomendados, errores a evitar y resultado esperado. Se ha evitado introducir datos cuantitativos ajenos a las fuentes de trabajo facilitadas; cuando se emplean referencias sectoriales, se mantienen alineadas con el diagnóstico y el focus group proporcionados.

### Nota metodológica.

- Las buenas prácticas no se plantean como recetas uniformes para todas las empresas.
- Deben ajustarse al tamaño, subsector, madurez digital, capacidad interna, presión de clientes, criticidad de procesos y recursos disponibles.
- En especial, las microempresas requieren acompañamiento más básico y pragmático;
- las pequeñas empresas necesitan consolidar integración y disciplina de uso;
- y las medianas y grandes empresas deben abordar arquitectura, gobierno del dato, escalado y especialización.

## 9.1. MATRIZ RESUMEN DE BUENAS PRÁCTICAS DETECTADAS

Figura 9: Ejemplos de buenas prácticas para empresas del sector metal

 <b>MATRIZ RESUMEN DE BUENAS PRÁCTICAS</b> Guía rápida para impulsar la transformación digital y generar valor sostenible en la industria del metal.			
N.º	ÁREA FUNCIONAL	BUENA PRÁCTICA	INDICADOR GUÍA
1	 DIRECCIÓN GENERAL	Definir una hoja de ruta digital vinculada al negocio.	 % de proyectos digitales con responsable, presupuesto e indicador.
2	 PRODUCCIÓN	Digitalizar una línea crítica antes de extender la transformación.	 OEE, paradas, rechazo y cumplimiento de planificación.
3	 MANTENIMIENTO	Evolucionar hacia mantenimiento basado en condición.	 MTBF, MTTR y paradas no planificadas.
4	 CALIDAD	Conectar controles de calidad con proceso y trazabilidad.	 Coste de no calidad, ppm y cierre de acciones correctivas.
5	 OFICINA TÉCNICA E INGENIERÍA	Gestionar versiones, planos y datos técnicos de forma controlada.	 Incidencias por versión o documentación incorrecta.
6	 COMPRAS Y PROVEEDORES	Digitalizar la cadena de suministro con criterios de riesgo.	 OTD proveedor, incidencias y homologación.
7	 ALMACÉN Y LOGÍSTICA INTERNA	Implantar trazabilidad de materiales y movimientos.	 Exactitud de inventario y errores de expedición.
8	 COMERCIAL Y CLIENTES	Profesionalizar el CRM Industrial.	 Conversión de ofertas y margen por cliente.
9	 ADMINISTRACIÓN Y FINANZAS	Consolidar la digitalización administrativa como control de gestión.	 Margen por orden y provisión de tesorería.
10	 SISTEMAS DE INFORMACIÓN	Reducir aplicaciones aisladas y ordenar arquitectura tecnológica.	 Procesos con captura manual y sistemas sin responsable.
11	 DATOS Y BI	Convertir datos operativos en cuadros de mando útiles.	 Tiempo de preparación de informes y uso de KPIs.
12	 CIBERSEGURIDAD	Implantar una ciberhigiene industrial mínima y verificable.	 Copias verificadas, MFA y tiempo de recuperación.
13	 PERSONAS Y TALENTO	Desarrollar perfiles híbridos técnico-digitales.	 Usuarios activos y autonomía interna.
14	 ENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD	Medir consumos y vincularlos al proceso productivo.	 Consumo por unidad producida y ahorro implantado.
15	 INNOVACIÓN Y COLABORACIÓN	Compartir aprendizajes, pilotos y soluciones replicables.	 Pilotos completados y soluciones escaladas.

**EN SÍNTESIS**  
 La combinación de estrategia, tecnología, datos, personas y sostenibilidad genera empresas más eficientes, resilientes y competitivas.

 + 
  + 
  + 
  = 
 

VALOR SOSTENIBLE Y COMPETITIVO

## 1. Dirección general: definir una hoja de ruta digital vinculada al negocio

**Área funcional:** Dirección general y gobierno corporativo

### Propósito y sentido de la práctica

La primera buena práctica consiste en disponer de una hoja de ruta digital formal, aprobada por la dirección y conectada con objetivos de negocio. En una empresa del metal, la digitalización no debe abordarse como una sucesión de compras tecnológicas, sino como una cartera ordenada de actuaciones orientadas a mejorar productividad, calidad, costes, servicio, seguridad, trazabilidad y resiliencia. La dirección debe evitar que las iniciativas nazcan únicamente por presión de clientes, disponibilidad de subvenciones o urgencias puntuales. La transformación digital requiere intencionalidad, secuencia y disciplina de seguimiento.

### Aplicación práctica en una empresa del metal

La hoja de ruta debe partir de un diagnóstico honesto de procesos y capacidades. Conviene identificar qué sistemas existen, qué procesos están soportados por datos, dónde se producen recapturas manuales, qué áreas dependen de hojas de cálculo críticas y qué información llega tarde a la toma de decisiones. A partir de ahí se priorizan proyectos en oleadas: cimientos digitales, integración de sistemas, digitalización productiva, gobierno del dato, analítica, automatización conectada y, solo cuando exista base suficiente, tecnologías avanzadas como IA, visión artificial, gemelo digital o agentes automatizados.

### Pautas de implantación

La práctica debe traducirse en un documento operativo de dirección. No hace falta un plan excesivamente extenso; sí es imprescindible que sea concreto. Debe incluir objetivos, responsables, presupuesto, calendario, indicadores, dependencias, riesgos y criterios para decidir qué se hace primero. En microempresas y pequeñas empresas puede adoptar la forma de una agenda de mejora digital a doce meses. En medianas y grandes compañías debe funcionar como un programa transversal con comité de seguimiento y participación de producción, mantenimiento, calidad, finanzas, sistemas y dirección comercial.

### Errores habituales a evitar

El error más común es confundir transformación digital con adquisición de software. También es frecuente implantar herramientas sin revisar procesos, lanzar pilotos que nadie gobierna, seleccionar soluciones por moda o replicar modelos de empresas mayores sin adaptación al tamaño real. Otro riesgo es delegar la transformación exclusivamente en el proveedor tecnológico. El proveedor puede aportar conocimiento técnico, pero la empresa debe conservar el criterio de negocio, la propiedad de los datos y la responsabilidad sobre el cambio organizativo.

### Indicadores recomendados

Los indicadores mínimos son: porcentaje de proyectos digitales con responsable asignado, avance trimestral de la hoja de ruta, inversión ejecutada frente a planificada, número de procesos críticos digitalizados, reducción de tareas manuales, cumplimiento de hitos y grado de uso real de las soluciones implantadas. También conviene medir resultados de negocio: reducción de incidencias, mejora de plazos, disminución de reprocesos, ahorro energético, reducción de costes administrativos o mejora en la fiabilidad de la información.

### Resultado esperado

El resultado esperado es pasar de una digitalización reactiva a una transformación gobernada. La empresa gana capacidad para priorizar, evita inversiones dispersas, alinea tecnología con negocio y crea una base para incorporar capacidades más avanzadas sin improvisación. En términos de madurez, esta práctica es habilitadora: no digitaliza por sí sola un proceso, pero condiciona la calidad de todas las decisiones posteriores.

## 2. Producción: digitalizar una línea crítica antes de extender la transformación a toda la planta

**Área funcional:** Producción, operaciones y taller

### **Propósito y sentido de la práctica**

En producción, la buena práctica consiste en comenzar por una línea, célula, familia de producto o proceso crítico, en lugar de intentar digitalizar toda la planta simultáneamente. El sector metal suele disponer de maquinaria con distintos niveles de automatización: CNC, plegadoras, prensas, líneas de corte, soldadura, mecanizado, tratamientos, hornos, células robotizadas o equipos auxiliares. Sin embargo, la existencia de maquinaria avanzada no garantiza una planta digital si los datos no se capturan, no se contextualizan y no alimentan decisiones operativas.

### **Aplicación práctica en una empresa del metal**

La selección del proceso piloto debe basarse en impacto y viabilidad. Es recomendable elegir una operación con volumen suficiente, incidencias recurrentes, peso en plazo de entrega o influencia clara sobre calidad y coste. El objetivo inicial no debe ser sofisticado: basta con capturar de forma fiable tiempos de ciclo, paradas, microparadas, causas de incidencia, rechazo, retrabajo, orden de fabricación, operario, turno, máquina y lote. La clave es convertir la actividad física del taller en una huella digital comprensible.

### **Pautas de implantación**

El piloto debe arrancar con un mapa del flujo productivo y de los datos que ya existen. Hay que diferenciar entre datos capturados automáticamente, datos introducidos por operarios y datos no disponibles. A continuación se define un panel operativo sencillo para mandos de producción: cumplimiento del plan, disponibilidad, rendimiento, calidad, incidencias y prioridades. La captura debe ser lo menos intrusiva posible; si exige demasiada carga administrativa al taller, la adopción caerá rápidamente. La disciplina diaria de revisión es tan importante como la tecnología.

### **Errores habituales a evitar**

Debe evitarse instalar sensores o sistemas MES sin una pregunta de negocio clara. También es problemático medir demasiadas variables desde el inicio o imponer registros que el personal de planta perciba como control punitivo. La comunicación es esencial: la digitalización de producción debe presentarse como una herramienta para eliminar pérdidas, reducir urgencias y mejorar la estabilidad del trabajo, no como un mecanismo de vigilancia. Otro error es no implicar a mantenimiento y calidad, cuando muchos datos productivos solo adquieren sentido si se cruzan con averías y defectos.

### **Indicadores recomendados**

Los indicadores principales son OEE, disponibilidad, rendimiento, calidad, tiempo real frente a estándar, cumplimiento de planificación, paradas por causa, rechazo interno, retrabajo, incidencias por orden, cambios de formato, tiempo de espera entre operaciones y desviación de entrega. En empresas con baja madurez puede bastar con cuatro indicadores iniciales: producción prevista frente a real, paradas, rechazo y entregas comprometidas.

### **Resultado esperado**

El resultado esperado es pasar de una digitalización reactiva a una transformación gobernada. La empresa gana capacidad para priorizar, evita inversiones dispersas, alinea tecnología con negocio y crea una base para incorporar capacidades más avanzadas sin improvisación. En términos de madurez, esta práctica es habilitadora: no digitaliza por sí sola un proceso, pero condiciona la calidad de todas las decisiones posteriores.

### 3. Mantenimiento: evolucionar desde el correctivo hacia el mantenimiento predictivo

**Área funcional:** Mantenimiento industrial y gestión de activos

#### **Propósito y sentido de la práctica**

En mantenimiento, la buena práctica consiste en avanzar de un modelo dominado por la corrección de averías hacia un enfoque basado en criticidad, datos e intervención planificada. En la industria del metal, los activos productivos suelen ser intensivos y variados: centros de mecanizado, líneas automatizadas, compresores, hornos, puentes grúa, cabinas, robots, equipos de corte, prensas, hidráulica, neumática y sistemas auxiliares. La parada de un activo crítico no solo genera coste de reparación; puede bloquear entregas, provocar incumplimientos, tensionar compras y deteriorar la calidad.

#### **Aplicación práctica en una empresa del metal**

El primer paso no es necesariamente implantar algoritmos predictivos. La buena práctica empieza por inventariar activos, clasificarlos por criticidad, ordenar históricos de averías, registrar causas, tiempos de parada, repuestos, intervenciones y coste asociado. A partir de esa base se puede evolucionar hacia mantenimiento preventivo optimizado y posteriormente hacia mantenimiento basado en condición, monitorizando variables como vibración, temperatura, consumo, presión, ciclos, alarmas o estados de máquina.

#### **Pautas de implantación**

La implantación debe comenzar con una matriz de criticidad. No todos los equipos merecen el mismo nivel de sensorización ni el mismo esfuerzo analítico. Los activos críticos deben tener ficha completa, plan de mantenimiento, repuestos críticos, procedimiento de intervención y registro de fallos normalizado. Después se seleccionan variables de condición que realmente anticipen modos de fallo. La participación de operarios y mandos de producción es clave, porque muchas señales tempranas (ruido, vibración, desviación de calidad, calentamiento o comportamiento irregular...) se detectan antes en planta que en un informe.

#### **Errores habituales a evitar**

Un error habitual es llamar predictivo a cualquier aviso preventivo o a cualquier cuadro de alarmas. El mantenimiento predictivo exige datos históricos, conocimiento del modo de fallo, umbrales, respuesta operativa y validación. También debe evitarse sensorizar activos sin capacidad de interpretación o sin presupuesto para actuar. Una alerta que nadie atiende solo añade ruido. Otro riesgo es mantener los datos de mantenimiento separados del ERP, producción y calidad, impidiendo relacionar averías con pérdidas, retrasos o defectos.

#### **Indicadores recomendados**

Los indicadores más relevantes son MTBF, MTTR, disponibilidad, paradas no planificadas, porcentaje de mantenimiento planificado, cumplimiento del plan preventivo, coste de mantenimiento por activo, repetición de averías, criticidad de repuestos, tiempo de espera de repuesto y horas de parada atribuibles a mantenimiento. En fases iniciales basta con medir de forma consistente averías, duración, causa y producción afectada.

#### **Resultado esperado**

La práctica permite reducir la improvisación, mejorar disponibilidad, disminuir urgencias y aumentar la vida útil de los activos. Además, crea una base imprescindible para proyectos de IoT industrial y analítica avanzada. La empresa deja de tratar el mantenimiento como coste inevitable y empieza a gestionarlo como una palanca de continuidad operativa, productividad y seguridad.

#### 4. Calidad: conectar controles de calidad con datos de proceso y trazabilidad

**Área funcional:** Calidad, no conformidades y mejora continua

##### **Propósito y sentido de la práctica**

En calidad, la buena práctica consiste en conectar controles, no conformidades, parámetros de proceso, lotes, órdenes y documentación técnica. La calidad en el metal no puede depender únicamente de inspección final, registros en papel o conocimiento informal. Las exigencias de clientes, certificaciones, trazabilidad y cumplimiento documental obligan a disponer de una relación clara entre lo fabricado, cómo se fabricó, con qué material, en qué máquina, bajo qué versión técnica y con qué resultado de inspección.

##### **Aplicación práctica en una empresa del metal**

La práctica se materializa creando un circuito digital de calidad vinculado a la orden de fabricación. Cada control debe asociarse a pieza, plano, versión, lote, operación, equipo, turno y responsable. Las no conformidades deben clasificarse con una taxonomía sencilla y estable: dimensional, material, soldadura, tratamiento, montaje, documentación, embalaje, proveedor, manipulación u otras categorías propias del proceso. Este registro estructurado permite analizar patrones y no limitarse a resolver incidencias una a una.

##### **Pautas de implantación**

La implantación puede comenzar con una familia de producto o cliente exigente. Deben definirse puntos de control, criterios de aceptación, frecuencia de inspección, evidencias requeridas y flujo de aprobación. Es recomendable conectar calidad con producción, mantenimiento y oficina técnica. Si un defecto se repite, debe poder analizarse si está asociado a una operación, máquina, lote de material, proveedor, cambio de versión o parámetro de proceso. La documentación de acciones correctivas debe ser trazable, con responsable, plazo, verificación de eficacia y cierre formal.

##### **Errores habituales a evitar**

Debe evitarse que el sistema de calidad se convierta en un archivo pasivo orientado solo a auditorías. La calidad digital debe ayudar a decidir, no únicamente a almacenar certificados. Otro error es registrar no conformidades con descripciones abiertas imposibles de analizar posteriormente. También es frecuente separar calidad de producción, generando una cultura de inspección posterior en lugar de prevención. La buena práctica exige convertir la información de calidad en aprendizaje operativo.

##### **Indicadores recomendados**

Los indicadores clave son coste de no calidad, rechazo interno, rechazo externo, ppm, retrabajo, reclamaciones de cliente, incidencias por proveedor, reincidencia de defecto, tiempo de cierre de acciones correctivas, eficacia de acciones, controles realizados frente a planificados y trazabilidad completa por lote u orden. En empresas con visión artificial o inspección automatizada, conviene medir también falsos positivos, falsos negativos y estabilidad del criterio de detección.

##### **Resultado esperado**

El resultado es una calidad preventiva y conectada. La empresa reduce reprocesos, mejora respuesta ante reclamaciones, fortalece auditorías y genera evidencias técnicas robustas. Además, queda preparada para incorporar herramientas avanzadas (visión artificial, analítica de defectos o IA aplicada a calidad...) desde una base de datos fiable y no desde registros fragmentados.

## 5. Oficina técnica e ingeniería: gestionar versiones, planos y datos técnicos de forma controlada

**Área funcional:** Oficina técnica, ingeniería e industrialización

### Propósito y sentido de la práctica

En oficina técnica, una buena práctica crítica es establecer una gestión controlada de planos, versiones, listas de materiales, rutas de fabricación, especificaciones, programas de máquina y documentación técnica. En empresas del metal, muchas incidencias de compras, producción y calidad nacen de información técnica desactualizada, duplicada o distribuida en carpetas personales. Cuando no existe una versión única de la verdad, la empresa puede fabricar con planos obsoletos, comprar materiales incorrectos, presupuestar con datos no vigentes o generar retrabajos evitables.

### Aplicación práctica en una empresa del metal

La práctica implica definir un repositorio técnico gobernado, con codificación, estados documentales, flujos de aprobación y trazabilidad de cambios. Debe quedar claro qué documento está en borrador, aprobado, sustituido u obsoleto. Las listas de materiales deben relacionarse con referencias, operaciones, consumos y proveedores; las rutas deben conectar ingeniería con planificación y producción; y los programas CNC o CAM deben estar controlados para evitar usos indebidos o versiones antiguas en taller.

### Pautas de implantación

El punto de partida puede ser una limpieza de documentación técnica. Se identifican planos duplicados, referencias sin versión, carpetas no controladas, listas incompletas y documentos usados en taller sin correspondencia con ERP. Después se establece una regla común de codificación y gestión del cambio: quién solicita, quién revisa, quién aprueba, cómo se comunica y desde cuándo aplica. En empresas con diseño propio o fabricación a medida, conviene crear un vínculo formal entre oferta, ingeniería, compras, producción y calidad para evitar pérdidas de información al pasar de fase comercial a fase productiva.

### Errores habituales a evitar

El error principal es tratar la documentación técnica como un archivo y no como un dato operativo. También debe evitarse que el taller conserve copias impresas sin control o que los cambios se comuniquen solo por correo informal. Otro riesgo es implantar un sistema documental sofisticado sin revisar previamente la disciplina de codificación y responsabilidades. Si los datos de partida son inconsistentes, la herramienta solo digitalizará el desorden existente.

### Indicadores recomendados

Los indicadores recomendados son incidencias por documentación incorrecta, retrabajos por versión obsoleta, referencias con lista de materiales aprobada, cambios de ingeniería gestionados formalmente, tiempo de liberación de planos, errores de compra por especificación técnica, número de documentos sin responsable, desviaciones entre ruta planificada y ruta real y cumplimiento del flujo de aprobación.

### Resultado esperado

El resultado es una mayor seguridad técnica y menor fricción entre áreas. Producción trabaja con información vigente, compras adquiere materiales correctos, calidad inspecciona con criterios coherentes y dirección dispone de mayor control sobre cambios. Esta práctica es además la base para avanzar hacia simulación, gemelos digitales, configuración avanzada de producto o integración más estrecha entre CAD/CAM, ERP y sistemas de planta.

## 6. Compras y proveedores: digitalizar la cadena de suministro con criterios de trazabilidad y riesgo

**Área funcional:** Compras, aprovisionamiento y relación con proveedores

### Propósito y sentido de la práctica

En compras, la buena práctica consiste en convertir la relación con proveedores en un proceso medible, trazable y conectado con producción, calidad y finanzas. En el sector metal, el suministro de materias primas, componentes, consumibles, tratamientos, subcontrataciones y servicios técnicos influye directamente en plazo, coste, calidad y capacidad de respuesta. Una función de compras basada en correos dispersos, llamadas, hojas de cálculo y conocimiento personal dificulta anticipar riesgos y genera dependencia de personas concretas.

### Aplicación práctica en una empresa del metal

La práctica requiere consolidar datos de proveedores, familias de compra, homologaciones, condiciones, plazos, incidencias, certificaciones, pedidos abiertos y evaluación de desempeño. Compras debe poder saber qué proveedores son críticos, qué materiales tienen riesgo de suministro, qué pedidos condicionan la producción, qué precios han variado y qué incidencias se repiten. Esta información debe conectarse con planificación, almacén, calidad y administración para evitar que cada área mantenga su propia versión de la realidad.

### Pautas de implantación

La implantación puede comenzar con una clasificación de proveedores por criticidad: estratégicos, recurrentes, alternativos, homologados, pendientes de evaluación y de riesgo. A continuación se definen datos mínimos por proveedor: contacto, familia, condiciones, certificaciones, plazo estándar, histórico de entregas, incidencias y dependencia. La digitalización debe incorporar el ciclo completo: solicitud de compra, pedido, confirmación, recepción, control documental, incidencia, factura y evaluación. En subcontrataciones industriales conviene reforzar la trazabilidad de planos, versiones y criterios de aceptación.

### Errores habituales a evitar

Un error frecuente es medir solo precio y no coste total. Un proveedor barato puede generar retrasos, rechazos, urgencias, transporte adicional o reprocesos. También debe evitarse mantener homologaciones puramente formales sin evaluación real. Otro riesgo es no compartir con compras la planificación de producción con antelación suficiente, obligando a compras a trabajar en modo emergencia. La digitalización de compras requiere previsión y conexión con demanda, no solo un registro electrónico de pedidos.

### Indicadores recomendados

Los indicadores recomendados son cumplimiento de plazo de proveedor, incidencias por proveedor, coste de no calidad de suministro, desviación de precio, pedidos urgentes, dependencia de proveedor único, porcentaje de proveedores homologados, tiempo de ciclo de compra, reclamaciones abiertas, certificaciones vencidas y entregas completas frente a parciales. En materiales críticos conviene medir cobertura de stock y lead time real frente a lead time estándar.

### Resultado esperado

El resultado es una cadena de suministro más fiable y gobernada. La empresa reduce urgencias, mejora capacidad de planificación, fortalece trazabilidad documental y puede negociar con evidencia. Además, compras deja de actuar como función administrativa y pasa a ser una palanca de competitividad, resiliencia y control del riesgo operativo.

## 7. Almacén y logística interna: implantar trazabilidad de materiales y movimientos

**Área funcional:** Almacén, logística interna y expedición

### Propósito y sentido de la práctica

En almacén y logística interna, la buena práctica consiste en digitalizar los movimientos de materiales desde la recepción hasta la expedición. En muchas empresas del metal, las diferencias entre stock físico y stock registrado provocan compras urgentes, paradas de producción, búsquedas manuales, exceso de inventario, errores de expedición y pérdida de trazabilidad. La logística interna no debe verse como una función auxiliar, sino como el sistema circulatorio que permite que producción, compras, calidad y cliente funcionen con estabilidad.

### Aplicación práctica en una empresa del metal

La práctica se basa en codificar materiales, ubicaciones, lotes, unidades de manipulación y estados. Cada entrada debe quedar vinculada a pedido, proveedor, certificado, lote y ubicación. Cada consumo debe asociarse a orden de fabricación o centro de coste. Cada movimiento interno debe tener origen, destino, cantidad, responsable y momento. En expedición, el sistema debe relacionar pedido de cliente, documentación, embalaje, transporte, lote y certificado cuando sea aplicable.

### Pautas de implantación

El primer paso es ordenar físicamente el almacén. No hay digitalización eficaz sin ubicaciones claras, reglas de identificación y materiales separados por estado: pendiente de inspección, liberado, bloqueado, reservado, en proceso o listo para expedición. Después se incorporan etiquetas, lectores, terminales o registros en ERP según capacidad de la empresa. En PYMES, una implantación sencilla pero disciplinada puede aportar más valor que una solución compleja sin hábito de uso. La clave es que el movimiento se registre cuando ocurre, no días después.

### Errores habituales a evitar

Debe evitarse digitalizar un almacén desordenado sin rediseñar ubicaciones y flujos. También es un error permitir consumos no registrados, retiradas informales o ajustes de inventario sin causa. Otra práctica problemática es considerar el inventario como responsabilidad exclusiva de almacén, cuando producción, compras y calidad influyen directamente en su fiabilidad. La trazabilidad se rompe si cualquiera de las áreas introduce excepciones sin registro.

### Indicadores recomendados

Los indicadores clave son exactitud de inventario, diferencias en recuentos, roturas de stock, materiales sin ubicación, tiempo de preparación de pedidos, errores de expedición, antigüedad de stock, movimientos no registrados, número de ajustes manuales, lotes bloqueados y cumplimiento de entregas. Para empresas con materiales certificados, debe medirse también trazabilidad documental completa entre certificado, lote, orden y entrega.

### Resultado esperado

El resultado es una logística interna más fiable, menos dependiente de personas concretas y más capaz de soportar crecimiento. La empresa reduce pérdidas de tiempo, mejora planificación, evita urgencias y responde mejor ante auditorías o reclamaciones. Además, una trazabilidad robusta de materiales es condición previa para proyectos avanzados de calidad, sostenibilidad, economía circular y reporting de producto.

## 8. Comercial y relación con clientes: profesionalizar el CRM industrial

**Área funcional:** Comercial, ofertas, atención al cliente y posventa

### Propósito y sentido de la práctica

En el área comercial, la buena práctica consiste en utilizar el CRM como sistema de gestión relacional B2B, no como agenda ampliada. En empresas del metal, la venta suele ser técnica, recurrente, condicionada por planos, especificaciones, plazos, capacidades productivas, calidad y confianza. La relación con el cliente no se agota en la oferta: continúa con aclaraciones técnicas, seguimiento de pedidos, incidencias, modificaciones, entregas, reclamaciones y oportunidades futuras.

### Aplicación práctica en una empresa del metal

El CRM debe recoger clientes, contactos, sectores, oportunidades, ofertas, motivos de pérdida, histórico de comunicaciones, previsiones, incidencias y valor potencial. Su utilidad aumenta cuando se conecta con ERP, producción, calidad y finanzas. El equipo comercial necesita saber si el cliente tiene pedidos retrasados, incidencias abiertas, márgenes bajos, reclamaciones recurrentes o potencial de crecimiento. A su vez, producción y planificación necesitan anticipar cargas futuras derivadas de oportunidades probables.

### Pautas de implantación

La implantación debe empezar por definir el proceso comercial real: entrada de consulta, análisis técnico, elaboración de oferta, revisión de costes, envío, seguimiento, negociación, adjudicación, lanzamiento a producción y posventa. Cada fase debe tener información mínima obligatoria y responsable. Conviene evitar campos excesivos que desincentiven el uso. En empresas con venta técnica, resulta crítico conectar oferta con requisitos técnicos, versiones de plano y capacidad productiva. El CRM debe ayudar a priorizar y aprender, no solo registrar actividad.

### Errores habituales a evitar

El error más común es implantar CRM sin disciplina comercial ni integración con operaciones. Si el comercial introduce datos pero no recibe información útil de producción, el sistema se percibe como carga administrativa. También debe evitarse medir únicamente número de visitas u ofertas, sin analizar margen, conversión, causa de pérdida o rentabilidad real. Otro riesgo es mantener conocimiento comercial en personas concretas, de modo que la empresa pierda memoria ante rotación o ausencia.

### Indicadores recomendados

Los indicadores recomendados son tasa de conversión de ofertas, plazo medio de respuesta, margen esperado y real por cliente, motivos de pérdida, oportunidades por etapa, previsión ponderada, pedidos recurrentes, reclamaciones por cliente, incidencias abiertas, cumplimiento de entrega y rentabilidad comercial por segmento. En empresas de fabricación bajo pedido, conviene medir también desviación entre coste presupuestado y coste real.

### Resultado esperado

El resultado es una relación con clientes más profesional, trazable y rentable. La empresa gana continuidad comercial, reduce dependencia individual, mejora la calidad de las ofertas y anticipa mejor la demanda. Además, el CRM bien usado conecta mercado y planta, permitiendo que la estrategia comercial se apoye en datos y no solo en intuición o urgencia.

## 9. Administración y finanzas: consolidar la digitalización administrativa como base de control

**Área funcional:** Administración, finanzas y control de gestión

### Propósito y sentido de la práctica

La digitalización administrativa suele ser una de las áreas más avanzadas en la empresa del metal, pero la buena práctica consiste en ir más allá de facturar, contabilizar o archivar en digital. El objetivo es convertir la información administrativa en control de gestión: rentabilidad por orden, proyecto, cliente o familia; previsión de tesorería; desviaciones de coste; plazos de cobro y pago; y relación entre actividad productiva y resultados económicos.

### Aplicación práctica en una empresa del metal

En empresas con fabricación bajo pedido, series cortas o proyectos, la rentabilidad no puede analizarse solo a cierre contable. Debe vincularse a materiales, horas, subcontrataciones, mermas, rechazos, transporte, urgencias y coste financiero. La administración debe conectarse con compras, almacén, producción y comercial. Una factura no es un hecho aislado: proviene de una oferta, una orden, un albarán, una entrega y unas condiciones comerciales. Si estas piezas no están integradas, la dirección recibe información tardía o incompleta.

### Pautas de implantación

La implantación recomendable comienza revisando el circuito pedido-albarán-factura-cobro y el circuito compra-recepción-factura-pago. Deben eliminarse recapturas manuales, conciliaciones innecesarias y hojas paralelas que sustituyen al ERP. A continuación se incorporan criterios de control: centros de coste, familias, proyectos, órdenes, clientes y proveedores. En empresas más maduras, el control de gestión debe apoyarse en cuadros de mando financieros y operativos que se actualicen con frecuencia suficiente para intervenir a tiempo.

### Errores habituales a evitar

Un error habitual es considerar que la facturación electrónica equivale a madurez administrativa. También debe evitarse medir solo ventas y no márgenes. Una empresa puede crecer en facturación y deteriorar rentabilidad si no controla costes reales, urgencias, no calidad o desviaciones de fabricación. Otro riesgo es que finanzas reciba la información tarde, cuando ya no es posible corregir precios, plazos o consumos.

### Indicadores recomendados

Los indicadores clave son margen por orden o proyecto, desviación entre coste previsto y real, plazo medio de cobro, tesorería prevista, facturas pendientes, pedidos facturables no facturados, antigüedad de deuda, rentabilidad por cliente, coste de no calidad incorporado a gestión, compras urgentes, desviación de stock y coste financiero de retrasos. En PYMES, un cuadro simple de margen, cobro y tesorería puede tener un impacto inmediato.

### Resultado esperado

El resultado es una empresa con mayor control económico y capacidad de anticipación. Administración deja de ser un área transaccional y se convierte en fuente de información para la dirección. La digitalización administrativa, bien integrada, permite tomar decisiones más rigurosas sobre precios, clientes, inversiones, financiación, compras y prioridades productivas.

## 10. Sistemas de información: reducir aplicaciones aisladas y ordenar la arquitectura tecnológica

**Área funcional:** Sistemas de información, IT y arquitectura funcional

### Propósito y sentido de la práctica

En sistemas de información, la buena práctica consiste en inventariar, ordenar y gobernar el ecosistema tecnológico. Muchas empresas del metal han incorporado herramientas de forma acumulativa: ERP, software contable, CAD/CAM, programas de máquina, hojas de cálculo, carpetas compartidas, plataformas cloud, aplicaciones de calidad, soluciones de proveedores y herramientas colaborativas. El problema no es solo cuántas aplicaciones existen, sino si funcionan como un sistema coherente o como islas desconectadas.

### Aplicación práctica en una empresa del metal

La práctica implica construir un mapa de aplicaciones y flujos de datos. Debe conocerse qué sistema soporta cada proceso, qué datos genera, qué personas lo mantienen, qué integraciones existen, qué información se exporta manualmente y qué hojas de cálculo son críticas. Este mapa permite detectar duplicidades, riesgos, dependencias personales y puntos donde la empresa recaptura información que ya existía en otro sistema. También ayuda a decidir qué soluciones deben mantenerse, integrarse, sustituirse o retirarse.

### Pautas de implantación

El proceso puede abordarse en tres fases. Primero, inventario: aplicaciones, responsables, usuarios, datos, coste y criticidad. Segundo, diagnóstico: solapamientos, integraciones manuales, sistemas sin soporte, versiones antiguas, riesgos de seguridad y procesos sin dueño. Tercero, arquitectura objetivo: qué sistemas serán maestros para clientes, artículos, proveedores, órdenes, planos, inventario, incidencias y documentación. En PYMES no se requiere una arquitectura compleja; sí se requiere claridad sobre dónde vive cada dato y quién lo gobierna.

### Errores habituales a evitar

Debe evitarse comprar nuevas aplicaciones para resolver problemas que son de proceso o de dato. También es peligroso mantener sistemas heredados sin soporte o depender de una persona que conoce una hoja crítica no documentada. Otro error es permitir que cada área seleccione herramientas sin coordinación, creando más fragmentación. La tecnología debe facilitar el flujo del dato, no multiplicar versiones inconciliables.

### Indicadores recomendados

Los indicadores recomendados son número de aplicaciones críticas inventariadas, procesos con recaptura manual, hojas de cálculo críticas, integraciones manuales, sistemas sin responsable, incidencias por intercambio de información, duplicidades de dato, usuarios con permisos no revisados, coste de licencias infrutilizadas y tiempo dedicado a preparar información para reportes. También conviene medir la reducción progresiva de silos.

### Resultado esperado

El resultado es una arquitectura tecnológica más comprensible, segura y escalable. La empresa gana control, reduce errores, mejora integración y prepara el terreno para BI, automatización, trazabilidad y analítica avanzada. Esta práctica evita que la digitalización futura se apoye sobre una base frágil y dispersa.

## 11. Datos y BI: convertir datos operativos en cuadros de mando útiles

**Área funcional:** Gobierno del dato, analítica y business intelligence

### Propósito y sentido de la práctica

En datos y BI, la buena práctica consiste en convertir la información operativa ya existente en cuadros de mando útiles para decidir. En el sector metal, muchas empresas capturan datos en ERP, máquinas, hojas de cálculo, albaranes, controles de calidad, mantenimiento y administración, pero no siempre los transforman en inteligencia accionable. El valor no está en acumular datos, sino en disponer de pocos indicadores fiables, actualizados y vinculados a decisiones reales.

### Aplicación práctica en una empresa del metal

La práctica debe comenzar por identificar preguntas directivas y operativas: qué pedidos están en riesgo, dónde se pierde capacidad, qué clientes son rentables, qué defectos se repiten, qué máquinas acumulan paradas, qué proveedores generan incidencias, qué inventario no rota y qué consumos energéticos se desvían. A partir de esas preguntas se seleccionan indicadores y fuentes. No conviene empezar por herramientas sofisticadas, sino por un modelo de datos claro, definiciones comunes y responsables.

### Pautas de implantación

La implantación se desarrolla mejor en capas. La primera capa puede ser un cuadro de mando de dirección con ventas, margen, entregas, calidad, tesorería y producción. La segunda, cuadros operativos por área. La tercera, analítica más avanzada para tendencias, predicción o alertas. Antes de desplegar BI, se deben acordar definiciones: qué es entrega a tiempo, cómo se calcula rechazo, qué coste incluye una orden, qué estado tiene un pedido y quién es propietario de cada dato. La frecuencia de actualización debe ajustarse a la necesidad: diaria para planta, semanal para seguimiento operativo y mensual para dirección estratégica.

### Errores habituales a evitar

Debe evitarse crear paneles visualmente atractivos pero poco usados. Un dashboard no es buena práctica si nadie lo consulta para decidir. También es un error incluir demasiados KPIs, utilizar datos no validados o mantener indicadores con fórmulas distintas entre departamentos. La BI fracasa cuando se convierte en una capa estética sobre datos poco fiables. La calidad del dato y la disciplina de revisión son más importantes que el número de gráficos.

### Indicadores recomendados

Los indicadores de la propia práctica son tiempo de preparación de informes, número de reportes manuales eliminados, frecuencia de actualización, usuarios activos, KPIs con propietario asignado, incidencias de calidad de dato, decisiones tomadas a partir de cuadros de mando y reducción de discrepancias entre áreas. Los KPIs de negocio dependerán de cada empresa: servicio, margen, rechazo, OEE, cobros, stock, compras, energía o mantenimiento.

### Resultado esperado

El resultado es una gestión más basada en evidencia y menos dependiente de intuición, memoria o reconstrucción manual de datos. La empresa gana rapidez, coherencia y capacidad de anticipación. Además, un sistema de BI bien gobernado es el puente natural hacia analítica avanzada, IA aplicada y automatización de decisiones en contextos donde realmente tenga sentido.

## 12. Ciberseguridad: implantar una ciberhigiene industrial mínima y verificable

**Área funcional:** Ciberseguridad, continuidad y protección de activos

### Propósito y sentido de la práctica

En ciberseguridad, la buena práctica consiste en implantar una base mínima, verificable y proporcional al riesgo industrial. La empresa del metal depende cada vez más de sistemas digitales para producir, facturar, diseñar, comprar, comunicarse con clientes, gestionar documentación técnica y operar maquinaria conectada. Un incidente de ciberseguridad puede traducirse en parada de producción, pérdida de planos, bloqueo de facturación, interrupción de entregas o exposición de información sensible.

### Aplicación práctica en una empresa del metal

La ciberhigiene industrial debe incluir inventario de activos, control de accesos, copias de seguridad, autenticación multifactor en sistemas críticos, actualización de equipos, protección de correo, segmentación básica de red, revisión de permisos, formación frente a phishing y plan de respuesta ante incidentes. En entornos con maquinaria conectada, debe prestarse atención a la relación entre IT y OT: redes de oficina, equipos de planta, accesos remotos de proveedores, PLC, servidores locales y estaciones de programación.

### Pautas de implantación

La implantación debe empezar por lo esencial. Primero, identificar activos críticos: ERP, servidor de archivos, copias, correo, equipos de ingeniería, documentación técnica, máquinas conectadas y credenciales de administración. Segundo, definir copias de seguridad con prueba de restauración. Tercero, revisar usuarios y permisos. Cuarto, activar MFA donde sea posible. Quinto, documentar qué hacer ante un incidente: a quién llamar, qué desconectar, cómo recuperar, cómo comunicar y cómo priorizar sistemas. La seguridad debe ser una rutina, no una actuación puntual.

### Errores habituales a evitar

El error más grave es creer que la empresa no es objetivo por ser pequeña o por no manejar datos financieros de gran volumen. En la práctica, muchas empresas industriales son vulnerables por continuidad operativa: si se detienen, el impacto es inmediato. También debe evitarse contratar herramientas sin revisar hábitos básicos o mantener accesos remotos de proveedores sin control. Otra mala práctica es disponer de copias que nunca se han restaurado; una copia no verificada es solo una expectativa.

### Indicadores recomendados

Los indicadores recomendados son porcentaje de usuarios con MFA, copias verificadas, tiempo estimado de recuperación, activos inventariados, permisos revisados, equipos sin actualizar, incidentes registrados, simulacros realizados, accesos remotos documentados y formación completada. También conviene medir sistemas críticos con plan de continuidad y dependencias de proveedores externos.

### Resultado esperado

El resultado es una empresa más resistente ante fallos, ataques o errores humanos. La ciberseguridad deja de ser un tema técnico aislado y se incorpora a la continuidad de negocio. Esta práctica es especialmente importante porque la digitalización, la integración de sistemas y la conexión de planta aumentan la superficie de riesgo si no se acompañan de controles adecuados.

### 13. Personas y talento: desarrollar perfiles híbridos técnico-digitales

**Área funcional:** Personas, formación y cambio organizativo

#### **Propósito y sentido de la práctica**

En personas y talento, la buena práctica consiste en desarrollar perfiles híbridos que combinen conocimiento industrial y competencias digitales. La transformación del metal no puede depender únicamente de especialistas externos ni de departamentos IT aislados. Quien conoce el proceso productivo, la calidad, la máquina, el mantenimiento, la logística o la relación con el cliente debe adquirir herramientas para interpretar datos, usar sistemas, detectar oportunidades y participar en mejoras digitales.

#### **Aplicación práctica en una empresa del metal**

La práctica se concreta en itinerarios formativos por perfil. La dirección necesita criterio para priorizar inversiones y entender indicadores. Los mandos de producción deben interpretar cuadros de mando, registrar incidencias y gestionar desviaciones. Los operarios necesitan formación práctica en captura de datos, terminales, trazabilidad y seguridad digital básica. Mantenimiento requiere competencias en sensores, alarmas, históricos y diagnóstico. Calidad necesita análisis de causas y explotación de datos. Administración y comercial deben trabajar con ERP, CRM y reporting sin duplicidades.

#### **Pautas de implantación**

La formación debe vincularse a proyectos reales. Un curso genérico de transformación digital tiene menor impacto que una formación aplicada a reducir paradas, mejorar inventario, digitalizar no conformidades o implantar un cuadro de mando. Conviene designar referentes internos por área, no necesariamente expertos tecnológicos, sino personas con credibilidad operativa y capacidad de aprendizaje. La empresa debe reservar tiempo para aprender; si la formación se añade sobre una agenda saturada, el cambio no se consolida.

#### **Errores habituales a evitar**

Debe evitarse plantear la digitalización como asunto exclusivo de jóvenes, de informáticos o de proveedores. También es un error imponer herramientas sin explicar su utilidad y sin adaptar el lenguaje al entorno de taller. La resistencia cultural suele aumentar cuando la tecnología se percibe como amenaza, burocracia o control. Otro riesgo es formar solo a una persona clave, generando dependencia interna. La competencia digital debe distribuirse de forma suficiente para que la organización sostenga el cambio.

#### **Indicadores recomendados**

Los indicadores recomendados son horas de formación por perfil, usuarios activos en sistemas, errores de registro, uso de cuadros de mando, participación en proyectos de mejora, incidencias resueltas internamente, reducción de dependencia de proveedores, número de referentes digitales y cumplimiento de rutinas de revisión. También puede medirse percepción de utilidad, porque la adopción real depende de que las personas vean valor en la herramienta.

#### **Resultado esperado**

El resultado es una organización más autónoma, capaz de ejecutar proyectos y mantener mejoras. La empresa desarrolla lenguaje común entre planta, oficina y dirección. Esta práctica responde a una de las barreras más relevantes del sector: la falta de talento híbrido y de capacidad interna de ejecución. Sin personas preparadas, la tecnología se infrutiliza; con personas implicadas, incluso soluciones sencillas pueden generar mejoras sostenibles.

## 14. Energía y sostenibilidad: medir consumos y vincularlos al proceso productivo

**Área funcional:** Energía, sostenibilidad y eficiencia operativa

### Propósito y sentido de la práctica

En energía y sostenibilidad, la buena práctica consiste en medir consumos y relacionarlos con procesos, productos, turnos, máquinas y estados operativos. En muchas empresas del metal, la energía se analiza como factura global, no como variable de proceso. Sin embargo, hornos, compresores, cabinas, líneas de tratamiento, corte, soldadura, ventilación, climatización industrial y maquinaria pesada pueden generar desviaciones relevantes que solo se detectan con medición adecuada.

### Aplicación práctica en una empresa del metal

La práctica comienza identificando centros de consumo significativos y procesos energointensivos. Después se establecen mediciones por línea, máquina, zona o familia de proceso, según viabilidad. El objetivo es conocer consumo por unidad producida, consumo en vacío, picos de demanda, arranques, cargas parciales y comportamientos anómalos. Esta información debe conectarse con producción, mantenimiento y planificación, porque el consumo no depende solo de tecnología, sino de cómo se opera.

### Pautas de implantación

La implantación puede hacerse de forma gradual. Primero se revisan contratos, potencias, curvas de consumo y facturación. Segundo se instalan o aprovechan medidores en puntos críticos. Tercero se definen indicadores simples: kWh por unidad, coste energético por orden, consumo fuera de horario, consumo por turno y desviaciones frente a referencia. Cuarto se vinculan acciones: apagar equipos en vacío, optimizar arranques, reparar fugas, ajustar consignas, planificar cargas o sustituir equipos ineficientes cuando el retorno lo justifique.

### Errores habituales a evitar

Debe evitarse tratar la sostenibilidad como informe separado de la operación. La eficiencia energética debe integrarse en producción y mantenimiento. Otro error es recopilar datos de consumo sin capacidad para actuar sobre ellos. Medir sin rutina de revisión no cambia comportamientos. También debe evitarse atribuir todo ahorro a inversión tecnológica; muchas mejoras proceden de disciplina operativa, mantenimiento, programación de producción y eliminación de consumos invisibles.

### Indicadores recomendados

Los indicadores recomendados son consumo por unidad producida, coste energético por orden, consumo en vacío, picos de demanda, factor de carga, desviaciones por línea, consumo fuera de horario, ahorro implantado, retorno de medidas, emisiones asociadas y número de acciones de eficiencia cerradas. En empresas con trazabilidad avanzada, puede incorporarse la huella energética por familia de producto o lote.

### Resultado esperado

El resultado es una gestión energética más vinculada al negocio. La empresa reduce costes, mejora competitividad, refuerza sostenibilidad y genera datos útiles para clientes, normativa y economía circular. Además, la digitalización energética suele ofrecer retornos comprensibles y medibles, lo que la convierte en una puerta de entrada eficaz para empresas que necesitan ver resultados antes de abordar transformaciones más complejas.

## 15. Innovación y colaboración sectorial: compartir aprendizajes, pilotos y soluciones replicables

**Área funcional:** Innovación, ecosistema sectorial y proyectos colaborativos

### Propósito y sentido de la práctica

La última buena práctica consiste en participar de forma activa en ecosistemas de innovación y colaboración sectorial: asociaciones empresariales, clústeres, centros tecnológicos, programas de acompañamiento, proyectos demostrativos, grupos de trabajo y pilotos compartidos. La empresa del metal, especialmente la pyme, no siempre dispone de tiempo, talento o recursos para explorar sola todas las oportunidades tecnológicas. La colaboración reduce incertidumbre, permite aprender de casos reales y facilita soluciones adaptadas al contexto industrial.

### Aplicación práctica en una empresa del metal

La práctica no exige revelar información sensible ni comprometer ventajas competitivas. Puede consistir en asistir a demostradores, participar en diagnósticos, compartir problemas comunes de forma anonimizada, colaborar en pilotos de trazabilidad, energía, calidad, mantenimiento o integración, y aprovechar conocimiento de entidades intermedias. Las empresas tractoras pueden desempeñar un papel relevante ayudando a proveedores a elevar su madurez digital, especialmente cuando la trazabilidad, la calidad documental o la sostenibilidad afectan a toda la cadena de valor.

### Pautas de implantación

La empresa debe definir qué espera de la colaboración: conocer tecnologías, seleccionar proveedores, validar casos de uso, formar personal, acceder a financiación, compartir costes o escalar soluciones. Conviene elegir proyectos con retorno claro y alcance acotado. Un buen piloto colaborativo debe tener problema definido, datos disponibles, responsables, calendario, criterios de éxito y plan de continuidad. También debe documentar aprendizajes, tanto positivos como negativos, para evitar repetir errores.

### Errores habituales a evitar

Debe evitarse participar en proyectos por visibilidad institucional sin conexión con prioridades internas. También es un error asistir a demostraciones tecnológicas sin traducir lo aprendido a decisiones concretas. Otro riesgo es esperar que la colaboración sustituya la responsabilidad interna: el ecosistema ayuda, pero la empresa debe asignar personas, tiempo y seguimiento. La innovación no debe entenderse como escaparate, sino como mecanismo de aprendizaje aplicado.

### Indicadores recomendados

Los indicadores recomendados son número de pilotos completados, soluciones replicadas, aprendizajes documentados, personas formadas, acuerdos con centros tecnológicos, proyectos con empresas tractoras, mejoras implantadas tras demostradores, financiación conseguida con ejecución real y grado de escalado. También conviene medir cuántas iniciativas colaborativas se traducen en cambios operativos, no solo en informes o jornadas.

### Resultado esperado

El resultado es una empresa más conectada, menos aislada y con mayor capacidad para seleccionar tecnologías útiles. A nivel sectorial, la colaboración permite acelerar buenas prácticas, reducir brechas entre tamaños de empresa y evitar que la digitalización dependa solo de líderes avanzados. Esta práctica es especialmente valiosa en un sector heterogéneo, donde las necesidades varían por subsector, tamaño, cadena de valor y nivel de madurez.

## 9.2. CIERRE: LECTURA INTEGRADA DE LAS BUENAS PRÁCTICAS

Las quince buenas prácticas no deben interpretarse como actuaciones aisladas.

Su valor aumenta cuando **se conectan entre sí**.

La hoja de ruta de dirección prioriza; producción genera datos; mantenimiento asegura disponibilidad; calidad convierte incidencias en aprendizaje; ingeniería controla la base técnica; compras y almacén garantizan flujo y trazabilidad; comercial conecta mercado con capacidad real; administración traduce la actividad en control económico; sistemas ordena la arquitectura; BI convierte datos en decisión; ciberseguridad protege la continuidad; personas sostienen el cambio; energía aporta eficiencia y sostenibilidad; e innovación sectorial acelera el aprendizaje.

El patrón común es la transición desde herramientas aisladas hacia procesos integrados. En el metal español, la competitividad digital no depende de incorporar tecnología por acumulación, sino de utilizarla para reducir pérdidas, estabilizar procesos, mejorar decisiones, elevar trazabilidad y reforzar la capacidad de adaptación.

Por ello, la recomendación operativa es **priorizar pocas prácticas de alto impacto**, ejecutarlas con rigor y ampliar progresivamente su alcance.

- Para una microempresa, el avance puede comenzar por ciberhigiene, control básico, ERP bien utilizado, trazabilidad sencilla y acompañamiento externo.
- Para una pequeña empresa, el salto suele estar en integrar comercial, compras, almacén y producción, reduciendo hojas paralelas.
- Para una mediana empresa, la prioridad se desplaza hacia arquitectura, BI, gobierno del dato, mantenimiento basado en condición y digitalización de planta.
- Para grandes empresas y tractoras, el reto es escalar, integrar OT/IT, desarrollar ecosistemas de proveedores y actuar.

## 10. TENDENCIAS FUTURAS: HACIA LA INDUSTRIA 5.0

El presente capítulo, redactado en el contexto estratégico de junio de 2026, tiene como propósito fundamental trazar la trayectoria evolutiva de la industria española del metal desde su actual estado de madurez digital hacia los paradigmas emergentes que definirán la competitividad global en la próxima década.

Como se ha evidenciado en los capítulos precedentes del *estudio sobre el estado de digitalización en la industria española del metal*, el sector se encuentra en una fase de transición crítica. Con un índice sintético de madurez digital situado en 50,4 sobre 100, la industria ha consolidado sus cimientos transaccionales y administrativos, pero se enfrenta ahora al desafío monumental de escalar las tecnologías de frontera y, lo que es más importante, de reorientar su propósito estratégico.

La transformación digital ya no puede concebirse exclusivamente como un vector de optimización de costes o de incremento de la eficiencia productiva (el dogma central de la Industria 4.0). Las perturbaciones sistémicas de los últimos años desde la volatilidad de las cadenas de suministro globales hasta la urgencia climática y la escasez crónica de talento técnico han demostrado que la eficiencia sin resiliencia es frágil, y que la automatización sin centralidad humana es insostenible. Es en esta encrucijada histórica donde emerge con fuerza el paradigma de la **Industria 5.0**.

A lo largo de las siguientes secciones, se desarrollará un análisis de las macro tendencias que están reconfigurando el ecosistema industrial. Se abordará la visión conceptual y filosófica de la Industria 5.0 (10.1), el impacto transformador y disruptivo de las distintas vertientes de la Inteligencia Artificial (10.2), la necesaria evolución hacia nuevas arquitecturas digitales interoperables y distribuidas (10.3), la convergencia ineludible entre la digitalización, la sostenibilidad medioambiental y la resiliencia operativa (10.4), y, finalmente, se explorarán las tecnologías emergentes a medio plazo que prometen alterar las leyes fundamentales de la ciencia de materiales y la computación (10.5).

Este análisis no se limita a un ejercicio de prospectiva tecnológica abstracta; por el contrario, está profundamente anclado en la realidad empírica del sector metal-mecánico español, un tejido compuesto en un 99,2% por pequeñas y medianas empresas (PYMES) que requieren hojas de ruta pragmáticas, escalables y económicamente viables para navegar la complejidad del futuro inminente.

### 10.1. LA VISIÓN DE LA INDUSTRIA 5.0

La conceptualización de la Industria 5.0 no representa una ruptura abrupta con las tecnologías habilitadoras de la cuarta revolución industrial, sino más bien una evolución filosófica, ética y estratégica de su propósito. Formalizada por la Comisión Europea en su documento fundacional de 2021 (*“Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry”*) y plenamente integrada en las políticas industriales de 2026, la Industria 5.0 reconoce que el enfoque exclusivo en la digitalización para la maximización del beneficio y la eficiencia productiva es insuficiente para abordar los retos contemporáneos de la sociedad y la economía.

Mientras que la Industria 4.0 se centró en la interconectividad, los sistemas ciberfísicos, el Internet de las Cosas (IoT) y la creación de la “fábrica inteligente” (Smart Factory) con el objetivo de minimizar la intervención humana y maximizar el rendimiento de los activos (OEE), la Industria 5.0 reintroduce al ser humano en el centro de la ecuación productiva, exige que la manufactura opere dentro de los límites planetarios y demanda sistemas capaces de soportar disrupciones masivas.

#### 10.1.1. El pilar humano-céntrico (Human-Centricity)

En el sector del metal, la dimensión humano-céntrica adquiere una relevancia de primer orden debido a la naturaleza física, a menudo peligrosa y ergonómicamente exigente de sus procesos (fundición, soldadura,

mecanizado pesado, calderería). La visión de la Industria 5.0 postula que la tecnología debe servir al trabajador, adaptándose a sus capacidades y necesidades, en lugar de obligar al trabajador a adaptarse a los ritmos y rigideces de la máquina.

Esta visión se materializa en el concepto del “trabajador aumentado” (**Augmented Worker**). Frente al temor histórico de que la automatización y la robótica provocarían un desempleo tecnológico masivo, la Industria 5.0 promueve la colaboración simbiótica entre humanos y máquinas. En las plantas metalúrgicas más avanzadas de 2026, observamos la proliferación de la *cobótica* (robots colaborativos). A diferencia de los robots industriales tradicionales, confinados en jaulas de seguridad, los cobots comparten el espacio de trabajo con el operario, asumiendo las tareas repetitivas, de manipulación de cargas pesadas o de precisión micrométrica, mientras que el humano aporta la flexibilidad cognitiva, la resolución de problemas complejos y el control de calidad crítico.

Asimismo, la centralidad humana aborda el desafío demográfico del sector: el envejecimiento de la plantilla y la pérdida de conocimiento tácito. Tecnologías como la Realidad Aumentada (AR) y la Realidad Mixta (MR) se están desplegando no como herramientas de control, sino como plataformas de asistencia cognitiva. Un operario novel puede ensamblar un componente complejo de maquinaria (CNAE 28) guiado por instrucciones holográficas superpuestas en su campo de visión, reduciendo la carga mental, el estrés y la curva de aprendizaje. La tecnología se convierte así en un exoesqueleto cognitivo y físico que prolonga la vida laboral activa y mejora el bienestar en el entorno industrial.

#### ANÁLISIS DE PROFUNDIDAD: LA ERGONOMÍA COGNITIVA EN LA INDUSTRIA DEL METAL

La ergonomía tradicional se ha centrado en la biomecánica (posturas, levantamiento de pesos). La Industria 5.0 introduce el concepto de *ergonomía cognitiva*. En un entorno donde el 62,9% de las empresas del metal ya cuenta con un ERP y la sensorización IoT avanza, el operario se enfrenta a un tsunami de datos, alertas y pantallas. La sobrecarga de información puede llevar a la “fatiga de alarmas” y a errores críticos. La visión 5.0 exige el diseño de Interfaces Hombre-Máquina (HMI) adaptativas, impulsadas por IA, que filtren el ruido y presenten al trabajador únicamente la información contextualizada y procesable que necesita en ese milisegundo exacto, respetando sus límites de procesamiento cognitivo.

#### 10.1.2. El pilar de la sostenibilidad (Sustainability)

La segunda dimensión fundamental de la Industria 5.0 es la sostenibilidad absoluta. La industria manufacturera, y muy especialmente la metalurgia y primera transformación (CNAE 24), es altamente intensiva en consumo de energía y materias primas, siendo responsable de una fracción significativa de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI).

La visión 5.0 establece que la producción debe ser circular por diseño y operar estrictamente dentro de los límites planetarios. Esto trasciende el mero cumplimiento normativo o las estrategias de *greenwashing*; se trata de una reingeniería profunda de los modelos de negocio. En 2026, impulsados por el mecanismo de ajuste en frontera por carbono (CBAM) y el Net Zero Industry Act (NZIA) de la Unión Europea, la digitalización se ha convertido en el habilitador indispensable de la descarbonización.

La convergencia entre lo digital y lo verde (la *Twin Transition*) se manifiesta en la optimización algorítmica de los hornos de arco eléctrico, la minimización del *scrap* (mermas) mediante control de calidad predictivo, y la trazabilidad total del ciclo de vida de los metales para maximizar su reciclabilidad. La Industria 5.0 visualiza un ecosistema donde el “acero verde” (producido con hidrógeno renovable) y el aluminio de bajas emisiones no son nichos de mercado, sino el estándar exigido por las cadenas de suministro globales.

### 10.1.3. El pilar de la resiliencia (Resilience)

La resiliencia es la capacidad de un sistema industrial para anticipar, reaccionar, absorber y recuperarse rápidamente de perturbaciones sistémicas. Las crisis encadenadas de la década de 2020 (pandemias, conflictos geopolíticos, crisis energéticas, bloqueos logísticos en canales marítimos críticos) demostraron que las cadenas de suministro globales, diseñadas bajo el paradigma del *Just-in-Time* extremo y la deslocalización en busca del menor coste laboral, eran estructuralmente frágiles.

La Industria 5.0 propone un cambio hacia el *Just-in-Case* inteligente. Esto no implica una acumulación ineficiente de inventarios, sino el desarrollo de una agilidad estratégica basada en datos. Las empresas del metal están transitando hacia redes de suministro diversificadas, apoyadas en plataformas digitales que proporcionan visibilidad de extremo a extremo (End-to-End Visibility). La resiliencia 5.0 también abarca la ciberresiliencia: en un entorno hiperconectado, la capacidad de mantener las operaciones críticas (o recuperarlas en horas) tras un ciberataque de *ransomware* es tan vital como la protección física de las instalaciones.

En resumen, la visión de la Industria 5.0 para el sector metal-mecánico español es la de un ecosistema productivo que utiliza las tecnologías de la Industria 4.0 no para reemplazar al humano, sino para empoderarlo; no para consumir recursos de forma lineal, sino para regenerarlos; y no para operar en un estado de fragilidad optimizada, sino para prosperar en la incertidumbre.

## 10.2. IMPACTO DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LA INDUSTRIA

Si la conectividad y el dato fueron los cimientos de la década anterior, la Inteligencia Artificial (IA) constituye el motor de transformación más poderoso y disruptivo para la industria del metal en el horizonte 2026-2030. El diagnóstico sectorial revela una realidad dual: mientras que la adopción de la IA aplicada al negocio (analítica y predictiva) se sitúa en un incipiente 17,4%, fuertemente concentrada en las grandes corporaciones, la IA Generativa ha experimentado una penetración más rápida (28,1%), impulsada por su accesibilidad y facilidad de uso en entornos de oficina y soporte documental.

El impacto futuro de la IA en la industria no se limitará a mejoras incrementales; redefinirá la forma en que se diseñan los productos, se planifica la producción, se controla la calidad y se gestiona el conocimiento. Para comprender la magnitud de este impacto, es necesario desglosar la IA en sus diferentes tipologías y aplicaciones industriales.

### 10.2.1. Inteligencia Artificial analítica y Machine Learning (ML)

La IA analítica, basada en algoritmos de aprendizaje automático (Machine Learning) y aprendizaje profundo (Deep Learning), es la disciplina encargada de encontrar patrones complejos, correlaciones ocultas y anomalías en vastos conjuntos de datos históricos y en tiempo real. En el sector metal, donde los procesos físicos generan terabytes de datos de series temporales (temperatura, vibración, presión, consumo eléctrico), el potencial del ML es extraordinario.

- **Mantenimiento predictivo y prescriptivo:** Actualmente, el 35,3% de las empresas declara utilizar mantenimiento predictivo, aunque a menudo en fases piloto. La tendencia futura es la evolución hacia el mantenimiento *prescriptivo*. Mientras que el predictivo alerta de que un husillo de un centro de mecanizado CNC fallará en 48 horas con un 90% de probabilidad, el prescriptivo, impulsado por IA avanzada, no solo predice el fallo, sino que prescribe la acción óptima: *“Reduzca la velocidad de avance en un 15% para extender la vida útil del husillo hasta el final del turno del viernes, momento en el cual el recambio ya habrá sido entregado por el proveedor y el equipo de mantenimiento estará disponible”*.
- **Control de calidad predictivo (Zero Defect Manufacturing):** En subsectores como la fundición o la inyección de aluminio, los defectos internos (porosidades) a menudo no se detectan hasta las fases finales de mecanizado, incurriendo en enormes costes de energía y tiempo desperdiciados. Los modelos de ML del futuro analizarán en tiempo real cientos de variables termodinámicas durante la colada para predecir la probabilidad de defecto antes de que el metal se solidifique, permitiendo ajustes dinámicos en el proceso para garantizar una producción con cero defectos.

- **Optimización de la planificación (APS impulsado por IA):** La planificación a capacidad finita en talleres con alta variabilidad (CNAE 25) es un problema matemático NP-complejo. Los algoritmos de IA de optimización (como el aprendizaje por refuerzo) superarán a las heurísticas tradicionales, recalculando dinámicamente las rutas de fabricación, la asignación de máquinas y los turnos de personal en segundos ante cualquier perturbación (una avería, un pedido urgente, un retraso de materia prima), maximizando el OEE global de la planta.

### 10.2.2. Inteligencia Artificial generativa (GenAI) en el entorno industrial

La irrupción de los Grandes Modelos de Lenguaje (LLMs) y los modelos de difusión ha trascendido el ámbito del texto y la imagen para adentrarse en el núcleo de la ingeniería y las operaciones industriales. La adopción actual del 28,1% es solo la punta del iceberg de una transformación masiva en los procesos de conocimiento intensivo.

- **Diseño generativo (Generative Design):** En el subsector de maquinaria y equipo (CNAE 28), la IA generativa está revolucionando el CAD/CAE. El ingeniero ya no dibuja la pieza; en su lugar, introduce los parámetros de contorno (cargas máximas, puntos de anclaje, material, método de fabricación). La IA explora miles de permutaciones topológicas y genera diseños orgánicos, a menudo contra intuitivos para la mente humana, que son significativamente más ligeros y resistentes. Esta tecnología, combinada con la manufactura aditiva (impresión 3D metálica), permite la creación de componentes aeroespaciales o de automoción con reducciones de peso del 30% al 50%, contribuyendo directamente a la eficiencia energética del producto final.
- **Copilotos industriales y Gestión del Conocimiento:** La IA generativa actuará como un asistente experto omnipresente. Los manuales de mantenimiento de miles de páginas, los históricos de averías y los procedimientos operativos estándar (SOPs) serán ingeridos por modelos de IA corporativos (entrenados con los datos privados de la empresa mediante técnicas de RAG - Retrieval-Augmented Generation). Un técnico de mantenimiento a pie de máquina podrá interactuar por voz con el sistema: *“La prensa excéntrica número 4 muestra el código de error E-702 y hay una fuga de fluido hidráulico en el bloque de válvulas B. ¿Cuál es el procedimiento de diagnóstico seguro y qué repuestos necesito?”*. La IA sintetizará la información técnica exacta, los esquemas y el inventario en segundos, democratizando el conocimiento experto y mitigando el impacto del relevo generacional.

### 10.2.3. Agentes de IA autónomos (Autonomous AI Agents)

Con una adopción actual marginal del 8,0%, los agentes autónomos representan la frontera tecnológica a medio plazo. A diferencia de los modelos generativos pasivos que esperan un *prompt* (instrucción) del usuario, los agentes autónomos son sistemas de software dotados de objetivos, capacidad de razonamiento, acceso a herramientas (APIs del ERP, MES, CRM) y capacidad para ejecutar acciones en el mundo digital sin intervención humana directa.

En la industria del metal del futuro, redes de agentes autónomos gestionarán procesos de *back-office* y cadena de suministro con una eficiencia sin precedentes. Por ejemplo, un “agente de aprovisionamiento” monitorizará continuamente los niveles de inventario de acero en el ERP, analizará las previsiones de demanda, rastreará los precios de las materias primas en los mercados globales y las noticias geopolíticas. Al detectar un riesgo de rotura de stock debido a una huelga en un puerto clave, el agente, de forma autónoma, solicitará presupuestos a proveedores alternativos pre-homologados, negociará condiciones básicas mediante correo electrónico generado por IA, y presentará al director de compras una recomendación final lista para su aprobación con un solo clic.

## EL IMPERATIVO DE LA GOBERNANZA DE DATOS (DATA GOVERNANCE)

El impacto transformador de la IA está intrínsecamente condicionado por la calidad de los datos subyacentes. El sector metal se enfrenta al desafío del “Garbage In, Garbage Out”. Los algoritmos no pueden optimizar un proceso si los datos maestros (listas de materiales, rutas, tiempos estándar) en el ERP son inexactos, o si los operarios imputan las paradas de máquina de forma inconsistente. La tendencia futura exige que las empresas industriales traten el dato como un activo estratégico de primer orden, implementando arquitecturas de datos robustas, ontologías industriales estandarizadas y roles formales de “Propietarios del Dato” (Data Stewards) antes de escalar iniciativas de IA.

### 10.3. NUEVAS ARQUITECTURAS DIGITALES INDUSTRIALES

La materialización de la Industria 5.0 y el despliegue a escala de la Inteligencia Artificial exigen una ruptura radical con las arquitecturas informáticas industriales del pasado. El modelo tradicional, fuertemente jerárquico y segmentado (conocido como el modelo purdue o la pirámide de automatización ISA-95), donde los datos fluían de forma rígida y secuencial desde los sensores (nivel 0) hasta el ERP corporativo (Nivel 4), se ha revelado como un cuello de botella inasumible para la agilidad y el volumen de datos que requiere la fábrica moderna.

Las tendencias futuras apuntan hacia arquitecturas digitales distribuidas, interoperables, basadas en eventos y orientadas a servicios. Esta evolución tecnológica es el sustrato invisible pero crítico que permitirá a las PYMES del metal superar el “síndrome de las islas de información” y alcanzar la verdadera convergencia IT/OT.

#### 10.3.1. La convergencia IT/OT y el espacio de nombres unificado (Unified Namespace)

La separación histórica entre la tecnología de la información (IT - el mundo de las oficinas, los servidores, el ERP y el negocio) y la tecnología de operaciones (OT - el mundo de la planta, los PLCs, el SCADA y el control físico) está desapareciendo. La arquitectura del futuro se basa en la convergencia total, donde los datos de la máquina y los datos financieros coexisten y se contextualizan mutuamente en tiempo real.

La tendencia arquitectónica dominante para resolver este desafío es el **espacio de nombres unificado (Unified Namespace - UNS)**. En lugar de conectar sistemas punto a punto (creando una arquitectura “espagueti” frágil y costosa de mantener), el UNS actúa como un *hub* central de mensajería (típicamente utilizando protocolos ligeros de publicación/suscripción como MQTT). En este modelo, cada máquina, sensor, aplicación de software (MES, ERP, CRM) o algoritmo de IA actúa como un “nodo” en la red. Cuando un centro de mecanizado termina una pieza, “publica” ese evento en el UNS. Simultáneamente, el sistema MES, el módulo de control de calidad y el dashboard del director de planta, que están “suscritos” a ese tipo de evento, reciben la información en milisegundos. El UNS se convierte en la única fuente de verdad (Single Source of Truth) del estado actual del negocio, estructurada semánticamente (por ejemplo: Empresa -> Planta -> Línea -> Máquina -> Variable).

#### 10.3.2. El continuo Cloud-to-Edge (Computación en la Frontera)

Si bien la adopción del cloud computing en el sector metal alcanza ya el 57,1%, la tendencia futura no es enviar todos los datos a la nube centralizada. En entornos industriales críticos (como la metalurgia, CNAE 24), la latencia de red, los costes de ancho de banda y las exigencias de privacidad y seguridad física hacen inviable depender exclusivamente de servidores remotos para decisiones de control en tiempo real.

La arquitectura emergente es el **continuo Cloud-to-Edge**. El *Edge Computing* (computación en la frontera o en el borde) implica trasladar la capacidad de procesamiento, almacenamiento y análisis de datos (incluyendo la inferencia de modelos de IA) lo más cerca posible de la fuente de generación del dato: la propia máquina o la línea de producción. Un IPC (Industrial PC) en el borde puede ingerir miles de señales de vibración por segundo de un motor, ejecutar un algoritmo de detección de anomalías

localmente en milisegundos para detener la máquina si es necesario, y enviar a la nube únicamente el resumen agregado del evento para el entrenamiento a largo plazo del modelo. Esta arquitectura híbrida garantiza la autonomía operativa de la planta incluso si se pierde la conexión a internet, un factor crítico de resiliencia (Industria 5.0).

### 10.3.3. Espacios de datos industriales (Data Spaces) y soberanía del dato

La digitalización trasciende los muros de la fábrica individual. La competitividad futura del sector metal dependerá de la capacidad de compartir datos de forma segura y estandarizada a lo largo de toda la cadena de valor (proveedores de materia prima, subcontratistas de tratamientos térmicos, fabricantes de componentes, OEMs y clientes finales).

Iniciativas europeas como **Gaia-X** y proyectos específicos de manufactura como **Catena-X** (en el sector automoción) o **Manufacturing-X** están sentando las bases de los *espacios de datos industriales*. Estas arquitecturas federadas permiten a las empresas compartir información crítica (como la huella de carbono de un lote de acero, certificados de calidad de materiales, o previsiones de demanda) manteniendo en todo momento la soberanía y el control sobre quién accede a sus datos, bajo qué condiciones y para qué propósito. Para las PYMES del metal español, integrarse en estos espacios de datos será un requisito indispensable para no quedar excluidas de las cadenas de suministro de alto valor añadido en la próxima década.

### 10.3.4. Ciberseguridad industrial: arquitecturas Zero Trust

Con una adopción de ciberseguridad avanzada estancada en el 44,6%, la industria del metal se enfrenta a un riesgo sistémico. La convergencia IT/OT y la apertura de las redes de planta al exterior (para mantenimiento remoto o integración Cloud) han destruido el concepto tradicional de “perímetro de seguridad” (el modelo de castillo y foso).

La tendencia arquitectónica ineludible es la adopción del modelo **Zero Trust (Confianza Cero)** en entornos industriales. Bajo este paradigma, no se confía por defecto en ningún usuario, dispositivo o aplicación, independientemente de si se encuentra dentro o fuera de la red corporativa. Cada solicitud de acceso a un PLC, a un servidor SCADA o a un panel HMI debe ser autenticada, autorizada y encriptada continuamente. La implementación de microsegmentación de redes, la gestión de identidades de máquinas (Machine Identity Management) y el cumplimiento estricto de directivas europeas como **NIS2** (que impone responsabilidades legales directas a la alta dirección en caso de negligencia cibernética) configurarán la arquitectura de seguridad de la fábrica del futuro.

## 10.4. CONVERGENCIA ENTRE DIGITALIZACIÓN, SOSTENIBILIDAD Y RESILIENCIA

El núcleo conceptual de la Industria 5.0 es la interdependencia absoluta entre la transformación digital, la transición ecológica y la robustez operativa. En el contexto de 2026, estas tres fuerzas ya no se gestionan como iniciativas departamentales aisladas (el departamento de TI por un lado, el de medio ambiente por otro, y operaciones por su cuenta), sino que convergen en una única estrategia corporativa unificada. La tecnología digital es el sistema nervioso que permite a la industria del metal medir, gestionar y optimizar su impacto ambiental y su capacidad de supervivencia ante crisis globales.

### 10.4.1. El pasaporte digital de producto (DPP) y la economía circular

La economía lineal (extraer, fabricar, usar y desechar) es insostenible y está siendo penalizada regulatoria y económicamente. La industria del metal, por la naturaleza infinitamente reciclable de sus materiales (acero, aluminio, cobre), está excepcionalmente posicionada para liderar la transición hacia la economía circular. Sin embargo, la circularidad a escala industrial es un problema de gestión de información masiva.

La tendencia regulatoria y tecnológica más disruptiva en este ámbito es el **pasaporte digital de producto (Digital Product Passport - DPP)**, impulsado por el reglamento de ecodiseño para productos sostenibles (ESPR) de la Unión Europea. El DPP es un registro digital inmutable (potencialmente respaldado por tecnologías de registro distribuido o Blockchain) que acompaña a cada producto, componente o lote de material a lo largo de todo su ciclo de vida.

Para un fabricante de bienes de equipo (CNAE 28) o de componentes de automoción, el DPP contendrá información granular sobre el origen de los minerales, el porcentaje exacto de material reciclado utilizado en la aleación, la huella de carbono de alcance 1, 2 y 3 generada durante su fabricación, las instrucciones precisas para su desmontaje y reciclaje al final de su vida útil, y el historial de mantenimiento. La trazabilidad digital avanzada (que actualmente puntúa 5,25/9 en el sector) deberá evolucionar desde el simple seguimiento logístico interno hacia una trazabilidad de ciclo de vida completo, exigiendo una interoperabilidad sin precedentes entre los sistemas ERP de múltiples empresas a lo largo de la cadena de valor.

#### 10.4.2. Descarbonización y sistemas de gestión energética (EMS) Inteligentes

La industria metalúrgica y de primera transformación (CNAE 24) es uno de los sectores más intensivos en energía de la economía española. La volatilidad de los precios energéticos y la presión del mecanismo de ajuste en frontera por carbono (CBAM) hacen de la eficiencia energética un imperativo de supervivencia financiera.

La convergencia digital-sostenible se materializa en los **sistemas de gestión energética (EMS) impulsados por IA**. Ya no basta con leer la factura eléctrica a final de mes o instalar submedidores aislados. Los EMS del futuro ingieren datos en tiempo real de sensores de consumo eléctrico, caudalímetros de gas y medidores de aire comprimido, y los correlacionan directamente con los datos de producción del sistema MES (órdenes de fabricación, referencias, velocidades de máquina).

Estos sistemas permiten calcular la “huella energética por pieza” con precisión milimétrica. Más aún, la IA predictiva analizará los mercados eléctricos (precios spot) y las previsiones meteorológicas (generación renovable propia mediante paneles solares en cubierta) para sugerir a los planificadores de producción el momento óptimo para encender los hornos de tratamiento térmico o ejecutar los procesos más intensivos en energía, practicando un *Demand Response* (respuesta a la demanda) automatizado que reduce drásticamente los costes operativos (OPEX) y las emisiones de CO<sub>2</sub>.

#### 10.4.3. Torres de control de la cadena de suministro (Supply Chain Control Towers)

La resiliencia, el tercer pilar de la Industria 5.0, se construye sobre la visibilidad y la anticipación. La dependencia de la industria europea de materias primas críticas (litio, cobalto, tierras raras, magnesio) procedentes de geografías geopolíticamente inestables es una vulnerabilidad estratégica abordada por el *Critical Raw Materials Act (CRMA)*.

A nivel empresarial, la respuesta tecnológica a esta vulnerabilidad es la implementación de **torres de control de la cadena de suministro cognitivas**. Estas plataformas digitales integran datos internos (ERP, inventarios) con flujos masivos de datos externos no estructurados (sistemas de seguimiento marítimo AIS, alertas meteorológicas, noticias financieras, índices de riesgo geopolítico). Utilizando IA analítica, la torre de control proporciona una visibilidad de extremo a extremo (desde la mina hasta la fábrica) y, lo que es crucial, modela escenarios de riesgo (*What-if analysis*). Si un tifón amenaza un puerto de exportación en Asia, el sistema alerta proactivamente al director de compras en España, calcula el impacto exacto en las órdenes de fabricación programadas para las próximas tres semanas y sugiere automáticamente la activación de proveedores secundarios locales (*nearshoring*) para garantizar la continuidad operativa.

### 10.5. TECNOLOGÍAS EMERGENTES A MEDIO PLAZO (COMPUTACIÓN CUÁNTICA, EDGE AI, NUEVOS MATERIALES)

Mientras la industria del metal se afana en consolidar las tecnologías de la Industria 4.0 y adoptar los principios de la 5.0, en los laboratorios de I+D y en los ecosistemas de innovación más avanzados se están gestando tecnologías de frontera que alcanzarán su madurez comercial en la ventana de 2030-2035. Estas tecnologías emergentes no representarán mejoras incrementales, sino saltos cuánticos (literal y figuradamente) en la capacidad de computación, el procesamiento de datos y la ciencia de materiales.

Para las empresas líderes del sector (el 5,4% de la muestra actual), la vigilancia tecnológica y la participación temprana en consorcios de investigación sobre estas materias es una obligación estratégica para asegurar su ventaja competitiva a largo plazo.

### 10.5.1. Computación cuántica (Quantum Computing) en la industria del metal

La computación clásica, basada en bits (0s y 1s), se acerca a sus límites físicos para resolver problemas de optimización combinatoria extrema y simulación molecular. La computación cuántica, basada en qubits (que pueden existir en múltiples estados simultáneamente gracias a la superposición y el entrelazamiento cuántico), promete resolver en segundos problemas que a los superordenadores actuales les tomaría milenios.

En el sector metal-mecánico, las aplicaciones a medio plazo de la computación cuántica se concentrarán en dos grandes áreas:

- **Descubrimiento de nuevos materiales y aleaciones:** La simulación del comportamiento de los electrones en estructuras moleculares complejas es computacionalmente prohibitiva para las máquinas clásicas. Los algoritmos cuánticos permitirán a los metalúrgicos simular y diseñar “in silico” nuevas aleaciones metálicas a nivel atómico. Esto acelerará exponencialmente el descubrimiento de metales más ligeros, con mayor resistencia a la tracción, propiedades térmicas superiores o menor huella de carbono, reduciendo el ciclo de I+D de años a meses.
- **Optimización logística y de producción a gran escala:** Problemas como la optimización de rutas de la cadena de suministro global, la secuenciación perfecta de miles de órdenes de fabricación en una planta con cientos de máquinas (el problema del *Job Shop Scheduling*), o la optimización del corte de chapa (*Nesting*) para minimizar el desperdicio a nivel macro, son candidatos ideales para los algoritmos de optimización cuántica (como el *Quantum Annealing*).

### 10.5.2. Edge AI (Inteligencia Artificial en la frontera) y micro-Machine Learning

Como se anticipó en la sección de arquitecturas digitales, el futuro de la IA industrial no reside exclusivamente en gigantescos centros de datos en la nube, sino en la miniaturización y distribución de la inteligencia hacia el extremo físico de la red (el *Edge*). La tendencia del **Edge AI** (o *TinyML*) implica incrustar modelos de aprendizaje automático directamente en microcontroladores, sensores IoT de bajo consumo y cámaras industriales.

Esta tecnología transformará la planta de producción. Un sensor de vibración adherido a un motor ya no se limitará a enviar datos crudos a un servidor central; el propio sensor contendrá un modelo de IA pre-entrenado capaz de inferir, en microsegundos y consumiendo milivatios de energía, si la firma de vibración corresponde a un desgaste normal o a una cavitación inminente. Las ventajas son formidables: latencia ultrabaja (crítica para el control de robótica de alta velocidad), reducción drástica del ancho de banda de red requerido (solo se transmite la “decisión” o la “alerta”, no el flujo masivo de datos crudos), y una mejora inherente de la ciberseguridad y la privacidad de los datos, ya que la información sensible de producción nunca abandona los límites físicos de la máquina.

### 10.5.3. Nuevos materiales, metamateriales y manufactura aditiva avanzada

La evolución de la tecnología digital corre en paralelo con la revolución en la ciencia de los materiales. La industria del metal del futuro no solo procesará acero, aluminio o titanio tradicionales, sino que trabajará con una nueva generación de materiales inteligentes y programables.

Los **metamateriales** son estructuras diseñadas artificialmente a nivel micro o nanoscópico para exhibir propiedades físicas (acústicas, electromagnéticas, mecánicas) que no existen en la naturaleza. Por ejemplo, metamateriales metálicos diseñados para absorber vibraciones extremas o redirigir ondas de choque, con aplicaciones revolucionarias en los sectores aeroespacial, de defensa y automoción.

Asimismo, el desarrollo de **aleaciones con memoria de forma (Shape Memory Alloys)** y metales autorreparables (*Self-healing metals*) alterará los paradigmas de mantenimiento y ciclo de vida de los productos. Estos materiales, capaces de recuperar su forma original tras una deformación mediante la aplicación de calor, o de sellar microfisuras internas de forma autónoma, extenderán drásticamente la durabilidad de los bienes de equipo.

La explotación comercial de estos nuevos materiales estará indisolublemente ligada a la maduración de la **manufactura aditiva metálica (Impresión 3D)**. A medio plazo, la impresión 3D dejará de ser una tecnología de nicho para prototipado rápido o utillajes, y se consolidará como un proceso de producción en serie para geometrías complejas imposibles de mecanizar por métodos sustractivos tradicionales. La convergencia del diseño generativo (IA), la simulación de procesos (gemelos digitales) y la manufactura aditiva permitirá la creación de componentes biónicos, hiper-ligeros y personalizados, consolidando la visión de una Industria 5.0 altamente tecnológica, sostenible y centrada en el valor añadido.

### CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO: EL IMPERATIVO ESTRATÉGICO

Las tendencias futuras hacia la Industria 5.0 descritas en este capítulo no son escenarios de ciencia ficción, sino realidades tecnológicas en fase de gestación acelerada.

Para la industria española del metal, el mensaje es inequívoco: la ventana de oportunidad para consolidar los fundamentos de la digitalización (ERP, calidad del dato, integración IT/OT, ciberseguridad) se está cerrando. Las empresas que no logren dominar la gestión de la información en la presente década carecerán de la infraestructura, la cultura organizativa y el talento necesarios para absorber las tecnologías disruptivas (IA, cuántica, Edge Computing) de la próxima. La transición hacia la Industria 5.0 exige un liderazgo audaz, capaz de equilibrar la urgencia de la eficiencia operativa a corto plazo con la visión estratégica de construir organizaciones resilientes, sostenibles y profundamente humanas a largo plazo.

Figura 10: Tendencias futuras. Hacia la Industria 5.0



## 11. ROADMAP DE TRANSFORMACIÓN DIGITAL DEL SECTOR METAL.

A fecha de junio de 2026, la industria española del metal se encuentra en una encrucijada histórica. El diagnóstico exhaustivo realizado sobre una muestra nacional de 318 empresas revela un índice medio de madurez digital de 50,4 sobre 100. Este dato constata que el sector ha superado con éxito las fases iniciales de informatización administrativa (con tasas de adopción de facturación electrónica del 87,5% y de sistemas ERP del 62,9%), pero se enfrenta a un estancamiento estructural en la transición hacia la verdadera Industria 4.0 y los paradigmas emergentes de la Industria 5.0. La adopción de tecnologías de frontera, como la Inteligencia Artificial aplicada al negocio (17,4%), el Business Intelligence (36,2%) o el mantenimiento predictivo (35,3%), sigue siendo minoritaria y se concentra en nichos muy específicos del ecosistema industrial.

El horizonte 2030 impone un sentido de urgencia sin precedentes.

La convergencia de presiones regulatorias europeas (como el Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono - CBAM, la Directiva NIS2 de ciberseguridad, el Critical Raw Materials Act - CRMA y el Net Zero Industry Act - NZIA), junto con la volatilidad de los costes energéticos, la escasez crónica de talento técnico y la agresiva competencia de mercados asiáticos con sobrecapacidad productiva, dictaminan que la digitalización ha dejado de ser una ventaja competitiva opcional para convertirse en un imperativo de supervivencia.

Este capítulo, diseñado desde una perspectiva de consultoría estratégica avanzada, articula el **Roadmap de Transformación Digital del Sector Metal para el quinquenio 2025-2030**. No se trata de un mero inventario de tecnologías a adquirir, sino de una hoja de ruta sistémica, secuencial y accionable. El documento desglosa los principios estratégicos innegociables, las prioridades tecnológicas y organizativas, y formula recomendaciones hiper-segmentadas tanto para el tejido empresarial (dominado en un 99,2% por PYMES) como para las administraciones públicas y organizaciones sectoriales que deben orquestar este cambio de paradigma.

### 11.1. PRINCIPIOS ESTRATÉGICOS PARA LA TRANSFORMACIÓN DEL SECTOR

La ejecución exitosa de un roadmap a cinco años en un entorno de alta volatilidad tecnológica requiere anclajes conceptuales sólidos. La evidencia empírica demuestra que los fracasos en la digitalización industrial rara vez se deben a deficiencias del software o del hardware; casi invariablemente, **el origen del fracaso es la ausencia de una estrategia coherente**.

Por consiguiente, la transformación del sector metal hacia 2030 debe regirse por los siguientes seis principios estratégicos innegociables:

#### Principio 1: La digitalización como medio, no como fin (Alineación a negocio)

La tecnología carece de valor intrínseco si no resuelve un problema de negocio tangible o habilita una nueva ventaja competitiva. El sector debe abandonar el "solucionismo tecnológico" (adquirir tecnología por moda o por disponibilidad de subvenciones) y adoptar un enfoque basado en el Retorno de Inversión (ROI) y la resolución de "puntos de dolor" operativos. Cada iniciativa digital debe estar justificada por su impacto directo en métricas críticas: mejora del OEE (Overall Equipment Effectiveness), reducción de mermas (scrap), optimización del consumo energético (kWh/tonelada), acortamiento del *time-to-market* o incremento del margen operativo. La digitalización útil es siempre una digitalización situada y contextualizada en la realidad de la planta.

#### Principio 2: Convergencia IT/OT y la consolidación del "Hilo Digital"

La fractura histórica entre los sistemas de gestión corporativa (Information Technology - IT) y los sistemas de control de planta (Operational Technology - OT) es el principal cuello de botella del sector. El roadmap

2030 exige la demolición de estos silos. El objetivo estratégico es construir un “Hilo Digital” (Digital Thread) ininterrumpido que conecte el diseño de ingeniería (CAD/CAM/CAE), la planificación de recursos (ERP), la ejecución en planta (MES/SCADA), la logística y el servicio posventa. Esta interoperabilidad bidireccional es el único mecanismo que permite que las decisiones directivas se alimenten de la realidad productiva en tiempo real, y que la planta reciba contexto relevante desde la gestión comercial.

### **Principio 3: Gobernanza del dato como cimiento innegociable**

El paradigma de la Inteligencia Artificial y la analítica predictiva se sustenta sobre la calidad de los datos. El principio de *Garbage In, Garbage Out* (basura entra, basura sale) es implacable en la industria. Antes de aspirar a la automatización cognitiva, las empresas del metal deben instaurar una disciplina espartana en la gestión de la información. Esto implica definir ontologías comunes, estandarizar datos maestros (artículos, listas de materiales, rutas, clientes), establecer reglas de captura en origen y nombrar “Propietarios del Dato” (Data Owners) responsables de su integridad. La gobernanza del dato no es un proyecto de TI, es una función crítica de operaciones.

### **Principio 4: Centralidad humana y transición a la Industria 5.0**

En un sector amenazado por el envejecimiento de las plantillas y la escasez de talento técnico, la tecnología no debe diseñarse para sustituir al trabajador, sino para aumentarlo. Alineado con el mandato de la Comisión Europea para la Industria 5.0, el roadmap prioriza tecnologías humano-céntricas: interfaces adaptativas, cobótica para tareas ergonómicamente lesivas, exoesqueletos y sistemas de realidad aumentada para la transferencia del conocimiento tácito. La digitalización debe hacer que las fábricas del metal sean entornos más seguros, atractivos y cognitivamente estimulantes para las nuevas generaciones de profesionales STEM.

### **Principio 5: Sostenibilidad y resiliencia integradas desde el diseño**

La digitalización y la descarbonización son procesos gemelos (la “doble transición”). El sector metal, altamente intensivo en energía, debe utilizar la infraestructura digital para medir, auditar y optimizar su huella ambiental. La trazabilidad digital avanzada será obligatoria para la emisión de Pasaportes Digitales de Producto (DPP) y el cumplimiento del mecanismo CBAM. Simultáneamente, la arquitectura digital debe aportar resiliencia sistémica, permitiendo a las empresas reconfigurar rápidamente sus cadenas de suministro y procesos productivos ante disrupciones geopolíticas o climáticas.

### **Principio 6: Ciberseguridad como habilitador de la continuidad de negocio**

Con una adopción actual de ciberseguridad avanzada de apenas el 44,6%, el sector asume un riesgo existencial inaceptable. A medida que las máquinas se conectan a la nube y las cadenas de suministro se integran digitalmente, la superficie de ataque se expande exponencialmente. La ciberseguridad industrial (OT Security) deja de ser un gasto defensivo para convertirse en un requisito contractual para operar en cadenas de valor críticas (defensa, automoción, aeroespacial). El principio de “Seguridad desde el Diseño” (Security by Design) y el cumplimiento de la Directiva NIS2 deben guiar cualquier despliegue tecnológico futuro.

#### **INSIGHT DE CONSULTORÍA: LA TRAMPA DE LA “DIGITALIZACIÓN COSMÉTICA”**

A lo largo de las auditorías realizadas en 2025-2026, se ha detectado un patrón recurrente en las PYMES del metal: la adquisición de licencias de software de alto nivel (ERPs complejos, herramientas de BI) que terminan siendo infrautilizadas, conviviendo con hojas de cálculo paralelas y procesos manuales en la sombra. El roadmap 2025-2030 exige erradicar esta “digitalización cosmética”. El éxito no se mide por el número de aplicaciones instaladas, sino por el grado en que la tecnología ha alterado y optimizado los flujos de trabajo reales de la organización.

## 11.2. PRIORIDADES TECNOLÓGICAS

La evolución tecnológica del sector metal no debe abordarse como una carrera desordenada por adoptar simultáneamente todas las soluciones emergentes, sino mediante una secuencia progresiva de maduración. Basado en el diagnóstico del estado del arte en 2026, se establecen las siguientes prioridades tecnológicas estructuradas en cuatro horizontes temporales y de complejidad, adaptables según el subsector (CNAE) y el tamaño de la empresa.

### Fase 1: Consolidación de la Base Digital y Ciberhigiene.

Para el 47,8% de las empresas que se encuentran en niveles de “Rezago Estructural” o “Transición”, la prioridad absoluta es construir cimientos robustos. Las tecnologías de frontera son inalcanzables sin resolver primero las deficiencias transaccionales.

- **Optimización y parametrización profunda del ERP:** Pasar de un uso meramente financiero/compras a la explotación integral de los módulos de planificación de la producción (MRP), control de planta y gestión de calidad. Eliminación total de las “islas de información” basadas en Excel.
- **Migración estratégica al Cloud:** Aceleración de la adopción de infraestructuras en la nube (SaaS/laaS) para garantizar la escalabilidad, facilitar el trabajo colaborativo y, fundamentalmente, asegurar la continuidad de negocio mediante arquitecturas de recuperación ante desastres (Disaster Recovery).
- **Ciberseguridad Industrial (OT/IT):** Implementación urgente de arquitecturas de red segmentadas (Modelo Purdue), Autenticación Multifactor (MFA), sistemas de detección de intrusos (IDS) específicos para protocolos industriales y políticas de copias de seguridad inmutables (regla 3-2-1).

### Fase 2: Conectividad, Visibilidad Operativa y Trazabilidad.

Una vez asegurada la base transaccional, la prioridad se desplaza hacia la planta de producción (OT) para iluminar las ineficiencias ocultas y conectar los activos físicos.

- **Industrial Internet of Things (IIoT) y Edge Computing:** Despliegue de redes de sensórica avanzada para capturar variables críticas de máquina (vibración, temperatura, consumo eléctrico, tiempos de ciclo). El uso de Edge Computing permitirá procesar datos de alta frecuencia en la periferia de la red, reduciendo la latencia en procesos críticos como la metalurgia (CNAE 24).
- **Sistemas de Ejecución de Manufactura (MES):** Implantación de sistemas MES para la digitalización total del puesto de trabajo en el taller. Eliminación del papel en las órdenes de fabricación, captura automática de tiempos, declaración de mermas en tiempo real y cálculo dinámico del OEE.
- **Trazabilidad Digital Unitaria:** Adopción de tecnologías de marcaje directo (DPM, láser) y lectura automatizada (RFID, visión) para garantizar la trazabilidad end-to-end desde la colada de materia prima hasta el componente final, requisito indispensable para los sectores de automoción y aeroespacial.

### Fase 3: Inteligencia Analítica y Automatización Avanzada

Con los datos fluyendo de manera estructurada y fiable, el sector debe escalar hacia la toma de decisiones proactiva y la automatización flexible.

- **Business Intelligence (BI) y Analítica Descriptiva/Diagnóstica:** Democratización del acceso a los datos mediante cuadros de mando industriales. Transición de la generación manual de informes a la visualización en tiempo real de KPIs consensuados, permitiendo a los mandos intermedios reaccionar instantáneamente ante desviaciones.
- **Mantenimiento Predictivo Basado en Condición:** Evolución desde el mantenimiento preventivo (por calendario) hacia modelos predictivos impulsados por Machine Learning, analizando firmas de vibración y termografía para anticipar fallos catastróficos en activos críticos (prensas, hornos, centros CNC), reduciendo drásticamente el MTTR y el coste de paradas no planificadas.

- **Robótica Colaborativa (Cobots) y Visión Artificial:** Integración de cobots equipados con sistemas de visión artificial impulsados por Deep Learning para tareas de *machine tending*, soldadura de series cortas y control de calidad automatizado (detección de porosidades, medición dimensional), aportando flexibilidad a los entornos de alta variabilidad (CNAE 25).

#### Fase 4: Tecnologías de Frontera, Ecosistemas y Servitización

En el horizonte final del roadmap, las empresas líderes y avanzadas consolidarán modelos de negocio disruptivos y arquitecturas de datos complejas.

- **Inteligencia Artificial a Escala (Analítica y Generativa):** Despliegue de algoritmos de IA para la planificación avanzada a capacidad finita (APS), optimización de recetas metalúrgicas para minimizar el consumo de ferroaleaciones, y uso de Agentes Autónomos supervisados para la automatización de procesos indirectos (compras, homologación de proveedores, redacción de ofertas técnicas complejas).
- **Gemelos Digitales (Digital Twins):** Especialmente críticos para el subsector de Maquinaria y Equipo (CNAE 28). Creación de réplicas virtuales sincronizadas en tiempo real para realizar *Virtual Commissioning*, simular cuellos de botella en planta y optimizar el diseño de producto sin necesidad de prototipos físicos.
- **Plataformas de Servitización (Equipment-as-a-Service):** Transición del modelo de venta de bienes de equipo hacia la venta de rendimiento o disponibilidad, apoyado en conectividad 5G industrial, telemetría en la nube y contratos de mantenimiento predictivo.
- **Pasaporte Digital de Producto (DPP) y Espacios de Datos:** Implementación de tecnologías (potencialmente basadas en Blockchain o registros distribuidos) para certificar la huella de carbono, el contenido reciclado y la circularidad de los productos metálicos, compartiendo esta información de forma segura a través de Espacios de Datos Sectoriales europeos (Data Spaces).

### 11.3. PRIORIDADES ORGANIZATIVAS Y DE TALENTO

La tecnología es el motor de la transformación, pero la cultura organizativa y el talento son el chasis que soporta la tracción. El diagnóstico de 2026 revela que el perfil tecnológico medio de la plantilla en el sector metal se sitúa en un 4,75 sobre 9, evidenciando una asimetría peligrosa entre la ambición tecnológica y la capacidad humana de absorción. Para el período 2025-2030, las prioridades organizativas deben centrarse en cuatro ejes fundamentales:

#### 1. Liderazgo Digital y Gobernanza Transversal

La transformación digital no puede delegarse en el departamento de TI. Requiere el patrocinio activo, visible y sostenido de la Alta Dirección. Las empresas deben instaurar modelos de gobernanza transversal, rompiendo los silos históricos entre Ingeniería, Producción, Calidad y Mantenimiento. Se recomienda la creación de “Comités de Digitalización” multidisciplinares que evalúen el ROI de las iniciativas y aseguren el alineamiento con la estrategia de negocio. Asimismo, el liderazgo debe fomentar una cultura de “bimodalidad”: mantener el rigor absoluto y la seguridad en la producción física (Modo 1), mientras se crea un espacio seguro, ágil y tolerante al error para la experimentación tecnológica y los proyectos piloto (Modo 2).

#### 2. Desarrollo de Perfiles Híbridos y Nuevos Roles

La industria del metal no puede depender exclusivamente de ingenieros informáticos puros que desconocen la realidad física de la planta. La prioridad es desarrollar “Perfiles Híbridos” (los traductores): profesionales que combinan un profundo conocimiento metalúrgico o mecánico con competencias en analítica de datos e integración de sistemas. Deben formalizarse nuevos roles críticos, como el **Ingeniero de Manufactura Digital**, el **Analista de Datos de Planta** y, fundamentalmente, el **Propietario del Dato (Data Owner)**, responsable de negocio encargado de garantizar la integridad y actualización de los datos maestros en su dominio.

### 3. Estrategias Agresivas de Upskilling y Reskilling

Ante la escasez de talento en el mercado abierto, la industria debe reciclar a su propia fuerza laboral. El *Upskilling* debe dotar a los operarios tradicionales de competencias en alfabetización de datos (Data Literacy), ciberhigiene y manejo de interfaces ciberfísicas. El *Reskilling* debe reorientar perfiles administrativos cuyas tareas rutinarias serán automatizadas hacia roles de auditoría de calidad de datos o gestión de trazabilidad. El modelo formativo debe abandonar los cursos teóricos esporádicos y adoptar el **Microlearning** (píldoras formativas híper específicas accesibles a pie de máquina) y el uso de tecnologías inmersivas (Realidad Virtual/Aumentada) para acelerar la curva de aprendizaje en tareas complejas y peligrosas de forma segura.

### 4. Gestión del Cambio y Captura del Conocimiento Tácito

La resistencia al cambio en el taller (el mantenimiento de Excels paralelos, la introducción tardía de datos) debe gestionarse con rigor metodológico (ej. Modelo ADKAR). Es imperativo involucrar a los operarios clave (Key Users) desde la fase de diseño de las soluciones para garantizar la ergonomía de las interfaces. Simultáneamente, ante el inminente relevo generacional, las empresas deben utilizar herramientas digitales (como la Realidad Asistida y la grabación de Procedimientos Operativos Estándar - SOPs interactivos) para capturar, estructurar y transferir el invaluable conocimiento tácito de los operarios veteranos antes de su jubilación, convirtiéndolos en mentores digitales de las nuevas generaciones.

## 11.4. RECOMENDACIONES PARA EMPRESAS

Dado que el tamaño empresarial es el principal determinante de la madurez digital (con brechas abismales entre microempresas y grandes corporaciones), el roadmap no puede prescribir “café para todos”. A continuación, se detallan recomendaciones hiper-segmentadas y una hoja de ruta operativa en cuatro oleadas, diseñada para ser pragmática y acumulativa.

Figura 11.1: Recomendaciones por segmento de madurez y tamaño



## Recomendaciones por Segmento de Madurez y Tamaño. Hoja de Ruta Operativa: Las 4 Oleadas de Implantación

Para materializar estas recomendaciones, las empresas deben estructurar su ejecución en un ciclo de 24 meses, adaptable a su punto de partida:

- **Oleada 1 (0-3 meses) - Asegurar Cimientos:** El objetivo es la estabilización. Realizar un inventario exhaustivo de activos digitales y físicos. Implementar protocolos de ciberseguridad innegociables. Definir la visión digital de la dirección y establecer un catálogo mínimo de KPIs. Iniciar la limpieza de datos maestros.
- **Oleada 2 (3-9 meses) - Integrar y Medir:** El objetivo es la visibilidad. Extender el uso del ERP a todas las áreas relevantes. Conectar los sistemas comerciales (CRM) con operaciones. Desplegar los primeros dashboards de Business Intelligence automatizados, eliminando el reporting manual. Normalizar los procedimientos de captura de datos en el taller.
- **Oleada 3 (9-15 meses) - Automatizar con Datos:** El objetivo es la eficiencia proactiva. Ejecutar pilotos tecnológicos con retorno claro y rápido (Quick Wins). Sensorizar cuellos de botella productivos (IoT). Iniciar la captura de variables de condición para mantenimiento predictivo. Implementar sistemas de trazabilidad digital por lote/serie y automatizar procesos administrativos repetitivos (RPA).
- **Oleada 4 (15-24 meses) - Escalar y Diferenciar:** El objetivo es la ventaja competitiva. Escalar los pilotos exitosos a toda la planta. Desplegar modelos de Machine Learning para optimización de calidad y energía. Integrar digitalmente la cadena de suministro con clientes y proveedores. Explorar nuevos modelos de negocio (servitización).

### MÉTRICAS DE SEGUIMIENTO (KPIs) RECOMENDADAS

El éxito del roadmap debe auditarse continuamente. Se recomienda seleccionar 3-5 métricas transversales, tales como: Gestión: OTIF (On Time In Full), Tiempo de ciclo pedido-entrega. Producción: OEE real, Tasa de scrap/retrabajos. Mantenimiento: MTBF (Mean Time Between Failures), Coste de parada no planificada. Sostenibilidad: Consumo energético por unidad producida (kWh/ud). Ciberseguridad: Tiempo de respuesta a incidencias, % de equipos con parches críticos.

## 11.5. RECOMENDACIONES PARA ORGANIZACIONES SECTORIALES Y ADMINISTRACIONES

La transformación digital del sector metal no puede recaer exclusivamente sobre los hombros de las empresas individuales, especialmente considerando la extrema atomización del tejido productivo. El éxito del roadmap 2025-2030 requiere una orquestación sistémica por parte de las administraciones públicas (locales, nacionales y europeas) y de las organizaciones empresariales sectoriales (como CONFEMETAL y sus federaciones territoriales). Las políticas públicas deben evolucionar desde el mero subsidio de activos hacia la construcción de capacidades estructurales.

### 1. Rediseño de los Instrumentos de Financiación Pública

La experiencia acumulada con los fondos del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR) hasta 2026 ha demostrado que la complejidad normativa, la exigencia documental y los largos plazos de resolución actúan como una barrera de entrada insalvable para las PYMES. Para el período 2026-2030, las administraciones deben:

- **Simplificación Administrativa Radical:** Implementar procesos de concesión de ayudas basados en la confianza y la auditoría *ex post*, utilizando plataformas digitales unificadas que reduzcan la carga burocrática.

- **Transición de CAPEX a OPEX:** Las líneas de financiación tradicionales (como el FAIIP) suelen primar la compra de maquinaria física (CAPEX). Las nuevas políticas deben financiar decididamente los gastos operativos (OPEX) asociados a la digitalización: suscripciones a software en la nube (SaaS), servicios de ciberseguridad gestionada (SOC), consultoría de integración de sistemas y, sobre todo, horas de ingeniería interna dedicadas a la gestión del cambio.
- **Apoyo a la Ciberseguridad como Bien Público:** Ante la entrada en vigor de la Directiva NIS2, crear fondos específicos de “Ciber-resiliencia Industrial” para cofinanciar auditorías de seguridad OT, segmentación de redes y planes de recuperación ante desastres en PYMES críticas para la cadena de suministro.

## 2. Impulso a la Formación Profesional (FP) Dual y Ecosistemas de Talento

Las organizaciones sectoriales deben liderar la alineación entre el sistema educativo y las necesidades tecnológicas reales de la industria.

- **Actualización Ágil de Currículos:** Presionar a las administraciones educativas para integrar de manera transversal competencias en analítica de datos, ciberseguridad OT, programación de cobots y operación de sistemas MES en los grados tradicionales de mecanizado, soldadura y mecatrónica.
- **Fomento de la FP Dual:** Las asociaciones deben facilitar que las PYMES (que a menudo carecen de estructura para acoger aprendices) participen en modelos de FP Dual mediante figuras de “tutoría compartida” o consorcios formativos.
- **Programas de Reskilling Sectorial:** Diseñar, con fondos públicos de empleo, programas intensivos de reciclaje profesional para transformar perfiles administrativos en riesgo de automatización en técnicos de calidad de datos o gestores de trazabilidad digital.

## 3. Fomento de Ecosistemas de Innovación y Colaboración Abierta

El 24,1% de participación actual en clusters y Digital Innovation Hubs (DIHs) debe incrementarse drásticamente. La innovación en solitario es inasumible para una pyme.

- **Creación de “Testbeds” y Demostradores Físicos:** Las administraciones y centros tecnológicos deben financiar entornos de prueba compartidos donde las PYMES del metal puedan testear tecnologías de frontera (Gemelos Digitales, 5G industrial, visión artificial) con sus propios datos y materiales antes de asumir el riesgo de inversión en sus plantas.
- **Impulso a los Espacios de Datos Sectoriales (Data Spaces):** Las organizaciones sectoriales deben liderar la creación de consorcios de compartición de datos seguros y soberanos (alineados con Gaia-X), permitiendo a las empresas del metal intercambiar información de trazabilidad, huella de carbono y calidad con sus clientes y proveedores sin perder el control sobre su propiedad intelectual.

## 4. Acompañamiento Regulatorio y Estandarización

La avalancha regulatoria europea (CBAM, Pasaporte Digital de Producto, normativas de ecodiseño) amenaza con asfixiar administrativamente a las PYMES.

- **Herramientas de Cumplimiento Digital:** Las administraciones deben proveer plataformas digitales gratuitas o de bajo coste, estandarizadas y certificadas, para que las PYMES puedan calcular y reportar su huella de carbono y generar los Pasaportes Digitales de Producto sin depender de costosas consultorías externas.
- **Promoción de Estándares Abiertos de Interoperabilidad:** Las organizaciones sectoriales deben ejercer presión sobre los fabricantes de maquinaria industrial (OEMs) para que adopten protocolos de comunicación abiertos (como OPC UA o MTConnect) por defecto, evitando el *vendor lock-in* y abaratando los costes de integración OT/IT para las empresas del metal.

En conclusión, el Roadmap 2025-2030 para el sector metal español traza un camino exigente pero ineludible. La transición desde una industria basada en la fuerza bruta y la intuición hacia una industria ciberfísica, guiada por datos, sostenible y centrada en el talento, determinará qué empresas prosperarán en la próxima década y cuáles quedarán relegadas a los márgenes de las cadenas de valor globales. La ejecución disciplinada de esta hoja de ruta, apoyada por un ecosistema público-privado cohesionado, es la garantía definitiva para la soberanía industrial y la competitividad futura del sector.

## 12. CONCLUSIONES FINALES DEL INFORME

A lo largo de la memoria se ha descrito un tejido industrial de gran importancia estratégica para la economía española, pero también sometido a una presión creciente derivada de la competencia internacional, la transición energética, la necesidad de resiliencia, la evolución regulatoria y la propia transformación tecnológica. En este contexto, la digitalización aparece como condición de competitividad, no como una línea auxiliar de modernización.

Las conclusiones se organizan en tres bloques.

- El primero formula el diagnóstico global del sector, evitando una lectura simplificada de retraso o liderazgo homogéneo.
- El segundo identifica los principales retos y oportunidades, diferenciando entre barreras estructurales, brechas tecnológicas y palancas de mejora.
- El tercero concreta las claves estratégicas que deben orientar la competitividad futura del sector, tanto desde la perspectiva de las empresas como desde la de las organizaciones sectoriales y los instrumentos públicos de apoyo.

BLOQUE CONCLUSIVO	OBJETO DE ANÁLISIS	FUNCIÓN DENTRO DE LA MEMORIA
12.1 Diagnóstico global del sector	Síntesis del estado de madurez digital, grado de adopción tecnológica, heterogeneidad empresarial y situación de la planta productiva.	Ofrece la fotografía final del punto de partida del sector.
12.2 Principales retos y oportunidades	Identificación de brechas y palancas prioritarias: integración, datos, talento, ciberseguridad, sostenibilidad, IA y colaboración.	Convierte el diagnóstico en agenda de actuación.
12.3 Claves estratégicas para la competitividad futura	Principios de actuación para avanzar hacia una industria conectada, gobernada por datos, sostenible y centrada en las personas.	Cierra la memoria con una orientación estratégica 2026-2030.

### 12.1. DIAGNÓSTICO GLOBAL DEL SECTOR

El diagnóstico global permite afirmar que la industria española del metal ha dejado atrás una situación de digitalización meramente incipiente, pero todavía no ha alcanzado una madurez digital homogénea, integrada y avanzada. La lectura agregada del estudio muestra un sector situado en una fase intermedia de evolución: existen herramientas, infraestructura básica, automatización instalada y un grado creciente de sensibilización; sin embargo, persisten brechas relevantes cuando la digitalización exige conectar sistemas, gobernar datos, integrar planta y oficina, convertir la información en inteligencia y sostener la transformación mediante liderazgo y talento.

La idea principal que debe retenerse es que el sector tiene base, pero necesita densidad. La base se observa en la adopción de tecnologías de gestión, en el avance de la facturación electrónica, en la presencia de ERP, en la incorporación progresiva de soluciones cloud y en la existencia de automatización en numerosas empresas. La densidad pendiente se refiere a la integración entre esos sistemas, la normalización de datos, la ciberseguridad industrial, la utilización sistemática de BI, la explotación de datos de producción y la incorporación prudente de tecnologías avanzadas como IA, mantenimiento predictivo, gemelos digitales o visión artificial.

El estudio ha trabajado sobre una muestra nacional amplia del sector metal-mecánico, con presencia territorial relevante y diversidad por tamaño y subsector. La fotografía resultante no debe interpretarse como un promedio plano. Su principal valor reside precisamente en mostrar que el metal no es un bloque uniforme. Coexisten empresas con sistemas de gestión consolidados, automatización productiva, proyectos de analítica y visión estratégica, junto a empresas que continúan dependiendo de procesos manuales,

hojas de cálculo, conocimiento tácito no documentado y decisiones operativas basadas en experiencia no formalizada.

Esta heterogeneidad obliga a matizar cualquier conclusión. El sector no puede describirse como atrasado en conjunto, porque una parte significativa del tejido ha avanzado de forma clara. Tampoco puede considerarse digitalmente maduro, porque la madurez no se alcanza con la mera presencia de herramientas. La madurez exige que las tecnologías formen un sistema coherente y que dicho sistema modifique la manera de planificar, producir, mantener, comprar, vender, medir y aprender. En este sentido, la transformación digital del metal español se encuentra en una fase de transición avanzada, pero incompleta.

El índice medio de madurez digital, situado en 50,4 sobre 100, resume bien esta posición intermedia. No es un valor bajo en términos de punto de partida, pero tampoco permite hablar de liderazgo generalizado. La concentración mayoritaria de empresas en los niveles de Transición y Avanzada confirma que existe una masa crítica con capacidad de progresar hacia modelos más exigentes. Al mismo tiempo, la reducida proporción de empresas líderes y la presencia de organizaciones en rezago estructural evidencian que la distancia entre segmentos sigue siendo significativa.

La distribución de madurez muestra una lectura de especial importancia para la política sectorial. La prioridad no debe ser exclusivamente rescatar empresas sin ninguna base digital, aunque este segmento requiere atención específica. Tampoco debe concentrarse solo en las empresas más avanzadas. El mayor efecto tractor se encuentra en la franja intermedia: empresas que ya cuentan con herramientas, conocen sus problemas operativos y disponen de una cierta capacidad de implantación, pero necesitan acompañamiento para ordenar arquitectura, datos, procesos y competencias.

INDICADOR DE CIERRE	VALOR / LECTURA RECOGIDA EN LA MEMORIA	INTERPRETACIÓN CONCLUSIVA
Índice medio de madurez digital	50,4/100	Madurez intermedia: el sector ha superado la digitalización básica, pero no ha consolidado una transformación integrada.
Facturación electrónica	87,5%	Digitalización administrativa ampliamente asentada y normalizada.
ERP	62,9%	Base transaccional relevante, aunque con distintos grados de uso e integración.
Cloud	57,1%	Adopción significativa como infraestructura de escalabilidad y continuidad.
CRM	46,4%	Avance en gestión comercial, con potencial de integración con producción y servicio.
BI	36,2%	Brecha clara entre captura de datos y conversión en inteligencia de gestión.
Ciberseguridad avanzada	44,6%	Necesidad de reforzar ciberhigiene e integración segura IT/OT.
IA aplicada al negocio	17,4%	Tecnología todavía emergente, condicionada por la calidad del dato y la madurez previa.

### 12.1.1. Una base digital asentada, pero todavía fragmentada

La digitalización administrativa y de gestión constituye la capa más consolidada del sector. La facturación electrónica, el ERP, las soluciones cloud y, en menor medida, los CRM, son ya elementos presentes en una parte relevante de las empresas. Esto indica que el sector ha asumido la necesidad de digitalizar sus procesos de soporte, reducir dependencia del papel, profesionalizar la gestión documental y disponer de sistemas básicos para registrar transacciones, pedidos, facturas, clientes, compras y almacenes.

Sin embargo, la existencia de estas herramientas no garantiza una gestión integrada. Una conclusión repetida a lo largo del estudio es que muchas empresas disponen de sistemas, pero mantienen todavía rutinas paralelas que reducen el valor de la inversión realizada. La coexistencia de ERP con hojas de cálculo críticas, la duplicidad de maestros, la captura manual de datos de taller, los informes preparados de forma artesanal y la falta de cuadros de mando operativos impiden que la tecnología disponible se convierta en inteligencia directiva.

La fragmentación se manifiesta también en la separación entre áreas. Comercial, producción, calidad, mantenimiento, compras, almacén y administración no siempre comparten una visión común del dato. En consecuencia, los estados de pedido, las previsiones de entrega, los consumos reales, las incidencias de producción o los costes de no calidad no fluyen con la velocidad y fiabilidad necesarias. Esta desconexión ralentiza la toma de decisiones y reduce la capacidad de anticipación.

El problema no es únicamente técnico. También es organizativo. La integración exige definir responsabilidades, estándares de dato, propietarios de información, procedimientos de captura y mecanismos de revisión. Sin esa gobernanza mínima, cualquier herramienta corre el riesgo de operar como una isla funcional. Por ello, una de las conclusiones centrales del estudio es que la siguiente etapa de la digitalización del metal no debe centrarse solo en implantar más sistemas, sino en ordenar y conectar los existentes.

El concepto de “hilo digital” resulta especialmente útil para describir la dirección de avance. La empresa industrial madura debe poder seguir la información desde la oportunidad comercial hasta la entrega, pasando por oferta, ingeniería, compra, planificación, producción, calidad, mantenimiento, expedición y facturación. Cuando este hilo se rompe, la empresa pierde trazabilidad, incrementa el error, depende de llamadas internas y convierte la gestión en reconstrucción permanente de información.

### **12.1.2. La planta productiva como principal frontera de integración**

La digitalización de la planta productiva constituye una de las fronteras más importantes del estudio. El sector metal cuenta con una tradición relevante de automatización industrial: máquinas CNC, células robotizadas, sistemas de control, equipos de corte, soldadura, mecanizado, tratamientos y líneas parcialmente automatizadas. No obstante, la automatización existente no siempre está conectada a sistemas de información ni se explota de forma analítica.

Esta situación explica la diferencia entre automatizar y digitalizar. Automatizar reduce intervención manual y mejora repetibilidad; digitalizar permite capturar la huella de la operación, integrarla con el resto del proceso y convertirla en base de decisión. Una empresa puede tener máquinas avanzadas y, al mismo tiempo, desconocer con precisión sus causas de parada, sus microparadas, su rendimiento real, el coste del retrabajo, la evolución de la calidad por lote o el consumo energético asociado a cada familia de producto.

La planta aparece, por tanto, como un espacio donde el potencial de mejora es muy elevado. La captura de datos de taller, la sensorización progresiva de activos críticos, la conexión con mantenimiento y calidad, la trazabilidad de lote o serie, y la implantación de dashboards operativos pueden generar mejoras tangibles sin necesidad de abordar de forma inmediata proyectos de alta complejidad. Antes de desplegar IA industrial o gemelos digitales, muchas empresas deben asegurar que los datos básicos de producción son fiables, oportunos y comparables.

El diagnóstico confirma también que el rezago productivo no afecta por igual a todos los segmentos. Las empresas de mayor tamaño o con procesos más estandarizados suelen disponer de más capacidad de digitalización productiva. En cambio, microempresas y pequeñas empresas, especialmente en entornos de alta variabilidad o pedido corto, presentan mayores dificultades para capturar información en tiempo real, formalizar procedimientos y mantener sistemas actualizados. La conclusión es clara: el taller sigue siendo una asignatura pendiente, pero no una asignatura uniforme.

La integración IT/OT representa un requisito crítico para avanzar. Sin conectar los sistemas industriales con los sistemas de gestión, la trazabilidad queda incompleta, el mantenimiento predictivo carece de datos suficientes, la optimización del OEE se vuelve parcial y la IA aplicada a calidad o proceso se convierte en una promesa difícil de materializar. Por tanto, la convergencia segura entre planta y oficina no es un proyecto técnico aislado; es una condición de madurez industrial.

### **12.1.3. El tamaño empresarial como gran determinante, pero no como única explicación**

El tamaño empresarial se confirma como uno de los factores que más condicionan la madurez digital. Las microempresas presentan mayores dificultades de acceso a tecnología, menor disponibilidad de personal especializado, menor tiempo directivo para planificar la transformación y una mayor dependencia de

proveedores externos. En muchos casos, la digitalización se concentra en la gestión administrativa básica, mientras producción, calidad, mantenimiento o almacén continúan operando con procedimientos poco formalizados.

Las pequeñas empresas se sitúan habitualmente en un punto intermedio. Suelen disponer de herramientas de gestión y cierta capacidad de mejora, pero arrastran islas de información, uso intensivo de hojas de cálculo y falta de roles claros de dato o proceso. En este segmento, la oportunidad está en convertir herramientas ya existentes en rutinas de gestión más consistentes, extendiendo el ERP, conectando áreas y estabilizando un primer nivel de BI operativo.

Las medianas empresas presentan una situación distinta. Su reto ya no suele ser la mera adopción, sino la gobernanza. A medida que crece la complejidad organizativa, aumentan los sistemas, las plantas, las líneas de producto, los clientes y las necesidades de trazabilidad. Sin arquitectura de datos, responsables transversales y criterios comunes, la digitalización puede convertirse en una suma de proyectos inconexos. En estas empresas, el salto competitivo exige profesionalizar la gestión del dato, integrar IT/OT y estructurar proyectos de Industria 4.0 con retorno medible.

Las grandes empresas muestran mejores niveles de implantación, pero no están exentas de problemas. Su desafío se desplaza hacia el escalado, la gestión del legado tecnológico, la ciberseguridad, la integración con proveedores y la capacidad de actuar como tractoras del ecosistema. La memoria ha subrayado que las grandes compañías pueden desempeñar un papel relevante si trasladan estándares, exigencias y apoyo técnico hacia la cadena de suministro, evitando que la brecha digital se profundice entre cliente tractor y pyme proveedora.

Con todo, el tamaño no explica por sí solo la madurez digital. El liderazgo, la cultura, la disciplina de dato, la existencia de responsables claros y la capacidad de ejecución introducen diferencias sustanciales entre empresas de tamaño similar. Hay organizaciones pequeñas con visión muy clara y avances relevantes, y empresas mayores que mantienen fragmentación interna y proyectos poco conectados. Esta conclusión es importante porque evita un determinismo excesivo: la dimensión importa, pero la gestión importa también.

#### **12.1.4. La heterogeneidad subsectorial como condición de diseño**

El sector metal agrupa realidades productivas muy distintas. La memoria diferencia subsectores como fabricación de productos metálicos, maquinaria y equipo, y metalurgia y primera transformación, pero también recuerda que la cadena de valor metal-mecánica incorpora actividades más amplias y muy diversas. Esta heterogeneidad condiciona el tipo de digitalización útil en cada caso.

En fabricación de productos metálicos, donde predominan muchas PYMES y procesos con variedad de producto, la prioridad suele estar en controlar el taller, capturar tiempos, ordenar rutas, conectar producción con calidad y reducir la dependencia de conocimiento informal. En maquinaria y equipo, el peso de la ingeniería, la configuración, la documentación técnica, el ciclo de vida y el servicio posventa hace que la integración entre oficina técnica, comercial, producción y cliente sea especialmente relevante. En metalurgia y primera transformación, la intensidad energética, la continuidad del proceso, la estabilidad operativa y la sostenibilidad sitúan la sensorización, la eficiencia energética y la trazabilidad ambiental en el centro de la agenda.

La conclusión no es que cada subsector necesite una estrategia completamente separada, sino que las prioridades deben formularse de forma situada. La digitalización no puede diseñarse como catálogo universal de tecnologías. Debe partir del proceso real, del producto, de las exigencias de cliente, de la criticidad energética, de la regulación aplicable y de la capacidad interna de ejecución. En caso contrario, existe riesgo de sobredimensionar soluciones o de implantar herramientas que no resuelven los problemas principales de la empresa.

Esta lectura coincide con las conclusiones del proceso cualitativo: el metal no debe ser tratado como un bloque homogéneo. Las diferencias por tamaño, subsector, nivel de automatización, exposición internacional y cultura empresarial obligan a diseñar intervenciones diferenciadas. La efectividad de cualquier programa de apoyo dependerá de su capacidad para reconocer esta diversidad.

### 12.1.5. De la herramienta al dato: la brecha decisiva

La principal brecha de madurez identificada en el diagnóstico se encuentra en la distancia entre registrar datos y utilizarlos para decidir. El sector captura información en múltiples puntos, pero una parte importante de esa información permanece en silos o se transforma en reporting manual. Esta situación impide que el dato opere como activo estratégico y mantiene a muchas empresas en una lógica reactiva.

La adopción de BI, inferior a la de ERP, cloud o facturación electrónica, refleja esta brecha. El ERP registra transacciones, pero no siempre genera visión directiva. La planta produce señales, pero no siempre las convierte en indicadores. Calidad documenta incidencias, pero no siempre las conecta con causas de proceso. Mantenimiento interviene, pero no siempre construye históricos explotables. Comercial recoge oportunidades, pero no siempre comparte previsión con producción. La empresa dispone de información, pero no siempre de inteligencia.

Gobernar el dato no significa burocratizar. Significa acordar definiciones, limpiar maestros, asignar propietarios, establecer reglas de captura, automatizar informes y revisar periódicamente la calidad de la información. Este trabajo puede parecer menos visible que la compra de una nueva tecnología, pero es el cimiento sobre el que se construyen todas las capacidades avanzadas. Sin datos fiables, la IA no aprende, el predictivo no predice, el gemelo digital no representa y los cuadros de mando no orientan decisiones.

Por ello, una conclusión fuerte del estudio es que la competitividad futura no dependerá solo de quién invierta más en tecnología, sino de quién consiga convertir sus datos en capacidad operativa. Las empresas que midan mejor podrán decidir antes, corregir desviaciones con más precisión, anticipar riesgos, negociar con mayor información y responder con más trazabilidad a clientes y reguladores.

### 12.1.6. Talento, cultura y liderazgo como condiciones de madurez

El factor humano aparece en la memoria como condición habilitadora de la transformación. La carencia de talento digital no se limita a la falta de perfiles informáticos. El reto específico del metal es desarrollar perfiles híbridos capaces de comprender simultáneamente el proceso industrial y las herramientas digitales. La empresa necesita personas que sepan interpretar un dato de producción, entender una orden de fabricación, dialogar con mantenimiento, leer un cuadro de mando y traducir una necesidad operativa en requerimiento tecnológico.

La cultura empresarial y el liderazgo directivo son igualmente decisivos. Allí donde la digitalización depende de impulsos ocasionales, subvenciones disponibles o presión externa, los proyectos tienden a fragmentarse. Allí donde la dirección define objetivos, asigna responsables, exige indicadores y participa en el seguimiento, la tecnología tiene más posibilidades de generar retornos. El focus group validó precisamente que estrategia, talento y cultura pesan más que la financiación entendida de forma aislada.

La resistencia al cambio no debe interpretarse como oposición irracional. En entornos industriales, la introducción de sistemas digitales modifica rutinas, visibiliza errores, exige disciplina de captura y puede generar incertidumbre en perfiles acostumbrados a trabajar con autonomía basada en experiencia. Por ello, la transformación debe gestionarse con comunicación, formación práctica, participación de usuarios clave y diseño de soluciones que no compliquen innecesariamente el trabajo de planta.

La memoria subraya además el reto del relevo generacional. Parte del conocimiento crítico del sector reside en operarios, encargados, técnicos y mandos con gran experiencia acumulada. La digitalización puede ayudar a capturar ese conocimiento en procedimientos, datos, vídeos, instrucciones asistidas y sistemas de soporte, evitando que la jubilación o rotación de perfiles provoque pérdida de capacidad productiva. En este sentido, digitalizar también significa preservar saber industrial.

### 12.1.7. Sostenibilidad, resiliencia y competitividad: una misma agenda

La digitalización no puede separarse de la sostenibilidad y la resiliencia. La memoria ha abordado la Industria 5.0 como marco que integra centralidad humana, sostenibilidad y capacidad de adaptación. En el metal, esta convergencia es especialmente evidente por la intensidad energética de determinados

procesos, la presión regulatoria, la importancia de la trazabilidad material y la necesidad de asegurar cadenas de suministro más robustas.

La medición energética, la trazabilidad digital, el control de mermas, la economía circular, el pasaporte digital de producto y la gestión de huella ambiental requieren datos. Sin sistemas de captura e integración, la sostenibilidad queda reducida a reporting parcial o estimaciones agregadas. Con datos fiables, en cambio, puede convertirse en herramienta de eficiencia, reducción de costes, diferenciación comercial y cumplimiento normativo.

La resiliencia también depende de la digitalización. Las empresas que conocen mejor sus inventarios, proveedores críticos, consumos, capacidades, cuellos de botella, calidad y plazos pueden reaccionar con mayor rapidez ante perturbaciones. La digitalización, por tanto, no solo aumenta productividad; refuerza la capacidad de continuidad de negocio. En un entorno geopolítico y energético incierto, esta dimensión adquiere valor estratégico.

## 12.2. PRINCIPALES RETOS Y OPORTUNIDADES

Los retos y oportunidades del sector metal deben leerse como dos caras de la misma realidad. Cada brecha identificada señala, al mismo tiempo, una palanca de mejora. La fragmentación de sistemas abre la oportunidad de construir un hilo digital. La baja explotación del dato abre la oportunidad de desarrollar BI y analítica. La insuficiente digitalización de planta abre la oportunidad de sensorización y trazabilidad. La escasez de talento obliga a crear perfiles híbridos. La presión energética convierte la eficiencia digital en una oportunidad de retorno rápido.

El focus group de validación reforzó una conclusión especialmente importante: el problema principal del sector no es exclusivamente el acceso a tecnología ni la financiación en sentido estricto. La financiación es relevante, sobre todo para microempresas y pequeñas empresas, pero no basta. Las barreras más determinantes son la falta de estrategia, el déficit de talento, la cultura reactiva, la limitada capacidad interna de ejecución y la dificultad para convertir diagnóstico en implantación real.

Esta lectura desplaza el centro de gravedad de las recomendaciones. No se trata solo de comprar software, maquinaria, sensores o plataformas, sino de acompañar a las empresas en la definición de prioridades, en la implantación efectiva, en la formación de usuarios, en la integración de sistemas y en la medición de resultados. La oportunidad sectorial no reside en una tecnología única, sino en la capacidad de articular una transformación ordenada.

### 12.2.1. Retos estratégicos prioritarios

#### Reto 1. Pasar de una digitalización reactiva a una digitalización dirigida

El primer reto es estratégico. Muchas empresas del metal han digitalizado por necesidad: obligación administrativa, presión de clientes, disponibilidad de ayudas, renovación de un sistema obsoleto o adquisición de maquinaria. Esta digitalización reactiva puede producir avances parciales, pero rara vez genera una transformación coherente. El reto consiste en pasar a una digitalización dirigida por prioridades de negocio: mejorar entregas, reducir no calidad, controlar costes, aumentar trazabilidad, disminuir paradas, profesionalizar la relación con clientes o cumplir exigencias ambientales.

La digitalización dirigida requiere un plan, aunque sea sencillo. La empresa debe saber qué problema quiere resolver, qué indicador medirá, qué proceso se modificará, qué personas serán responsables y cómo se verificará el retorno. Sin esta disciplina, los proyectos se convierten en iniciativas aisladas y la tecnología pierde credibilidad interna.

#### Reto 2. Integrar sistemas y reducir islas de información

El segundo reto es la integración. La memoria ha identificado la persistencia de islas tecnológicas como uno de los obstáculos más relevantes. La empresa puede disponer de ERP, CRM, software de calidad, hojas de cálculo, carpetas compartidas, programas de máquina y soluciones cloud, pero si esos elementos no comparten datos de forma ordenada, el resultado es una arquitectura fragmentada.

La integración debe priorizarse según impacto. No todas las conexiones son igual de urgentes. En muchos casos, la prioridad será conectar ERP con producción y almacén; en otros, calidad con trazabilidad; en otros, CRM con planificación; y en otros, mantenimiento con activos críticos. El reto no consiste en integrarlo todo a la vez, sino en identificar los flujos de información que más errores, retrasos o costes generan y resolverlos de forma progresiva.

### **Reto 3. Gobernar el dato y profesionalizar el BI**

El tercer reto es convertir el dato en un recurso fiable. La baja penetración relativa de BI y la persistencia de reporting manual muestran que muchas empresas siguen dedicando más tiempo a preparar la información que a interpretarla. Esto genera lentitud, incertidumbre y dependencia de personas concretas.

La profesionalización del BI debe comenzar por pocos indicadores, pero bien definidos. Cumplimiento de plazo, rechazo, retrabajo, disponibilidad, consumo, margen, rotación de stock, reclamaciones, coste de no calidad y cumplimiento de planificación son ejemplos de métricas con capacidad de orientar decisiones. El reto es que estos indicadores se actualicen con regularidad, procedan de fuentes fiables y sean revisados en rutinas de gestión.

### **Reto 4. Conectar la automatización con la decisión operativa**

El cuarto reto se encuentra en producción. La automatización instalada debe transformarse en automatización conectada. Una máquina automatizada que no aporta datos al sistema de gestión o que no permite analizar causas de desviación ofrece un valor inferior al que podría generar. La empresa necesita medir estados, tiempos, incidencias, consumos y calidad, y relacionar esos datos con órdenes, lotes, turnos y productos.

El objetivo no debe ser implantar tecnologías de máxima complejidad desde el inicio, sino construir visibilidad operativa. Muchos retornos inmediatos provendrán de saber dónde se producen las paradas, qué lotes generan más incidencia, qué máquinas concentran retrabajo, qué consumos energéticos son anómalos o qué cuellos de botella condicionan el servicio al cliente.

### **Reto 5. Reforzar la ciberseguridad como condición de continuidad**

El quinto reto es la ciberseguridad. A medida que la empresa se conecta más, aumenta su exposición. La ciberseguridad no puede tratarse como un asunto externo al negocio, porque un incidente puede paralizar producción, bloquear documentación técnica, afectar expediciones, comprometer facturación o interrumpir la relación con clientes.

El reto inmediato es establecer una ciberhigiene verificable: inventario de activos, control de accesos, copias de seguridad probadas, autenticación robusta, segmentación básica, actualización de sistemas y protocolos de respuesta. En entornos industriales, debe prestarse atención particular a la seguridad OT, evitando que la conexión de planta se realice sin criterios de protección.

### **Reto 6. Desarrollar talento híbrido y gestionar el cambio**

El sexto reto es el talento. La transformación digital del metal exige competencias que no siempre existen en el mercado ni dentro de las empresas. La solución no puede depender únicamente de captar perfiles externos. Es necesario formar a la plantilla existente, identificar usuarios clave, crear roles de propietario de dato, fortalecer mandos intermedios y diseñar programas de upskilling y reskilling adaptados a la realidad de taller.

La gestión del cambio debe acompañar cada implantación. Los sistemas digitales fracasan cuando se perciben como carga administrativa añadida o como control sin valor. En cambio, ganan aceptación cuando reducen incertidumbre, mejoran seguridad, facilitan el trabajo, evitan errores o ayudan a resolver problemas reales de producción. La tecnología debe demostrar utilidad en el puesto de trabajo.

### Reto 7. Evitar la sobreventa tecnológica y adoptar IA con realismo

El séptimo reto afecta a las tecnologías emergentes, especialmente la inteligencia artificial. La IA suscita interés, pero también desconocimiento sobre sus posibilidades y límites. La conclusión de la memoria es prudente: la IA puede aportar valor en calidad, mantenimiento, planificación, documentación técnica, análisis comercial o soporte operativo, pero requiere datos fiables, procesos estables y objetivos claros.

La adopción de IA debe seguir una secuencia lógica. Primero, ordenar los datos. Segundo, automatizar reporting y análisis descriptivo. Tercero, seleccionar casos de uso concretos. Cuarto, validar el resultado en piloto. Quinto, escalar solo si existe fiabilidad, trazabilidad y retorno. Sin esta secuencia, el riesgo es invertir en soluciones que no pueden alimentarse adecuadamente o que no se integran en la operación.

### Reto 8. Adaptar los instrumentos de apoyo a la realidad de la pyme

El octavo reto es institucional y sectorial. Las PYMES necesitan apoyo, pero no solo en forma de financiación para activos. Requieren simplificación administrativa, acompañamiento técnico, espacios demostrativos, formación práctica, ayuda para definir proyectos, asistencia en ciberseguridad e instrumentos que cubran costes de integración, software, datos y gestión del cambio. La política pública debe evolucionar desde el subsidio de compra hacia la construcción de capacidades.

Este punto es especialmente relevante porque muchas microempresas y pequeñas empresas carecen de recursos internos para preparar convocatorias, comparar soluciones o gestionar implantaciones. Si los instrumentos son complejos, los capturan quienes ya tienen capacidad, y la brecha se amplía. La política de apoyo debe diseñarse para reducir esa asimetría.

#### 12.2.2. Oportunidades de mayor impacto

Las oportunidades identificadas a lo largo de la memoria pueden agruparse en varias líneas de actuación. Algunas ofrecen retorno inmediato y deben abordarse como fundamentos. Otras requieren mayor madurez previa y deben programarse de forma escalonada. La clave no es escoger una única oportunidad, sino secuenciarlas según el punto de partida de cada empresa.

OPORTUNIDAD	MOTIVO DE PRIORIDAD	CONDICIÓN DE ÉXITO
Eficiencia energética mediante digitalización	Permite reducir consumos, detectar pérdidas y vincular energía con proceso productivo.	Medición fiable por equipo, línea o proceso y revisión periódica de desviaciones.
Economía circular y trazabilidad digital	Facilita cumplimiento, control de materiales, reducción de residuos y diferenciación.	Datos de lote, material, proceso y proveedor conectados de forma consistente.
IoT industrial y sensorización	Aporta visibilidad de planta y habilita mantenimiento, calidad y productividad.	Empezar por activos críticos y variables de valor operativo.
BI y analítica de datos	Transforma datos capturados en decisiones de gestión y mejora continua.	Datos maestros gobernados y KPIs accionables.
Mantenimiento basado en condición	Reduce paradas no planificadas y mejora disponibilidad de activos.	Históricos de averías, criticidad de activos y señales fiables.
IA aplicada a calidad y proceso	Puede detectar patrones y mejorar control operativo en empresas maduras.	Casos acotados, datos suficientes y validación técnica.
Colaboración sectorial	Permite compartir aprendizaje, reducir riesgo y acelerar adopción en PYMES.	Ecosistemas, demostradores y estándares comunes.

#### Oportunidad 1. Activar los datos existentes

La oportunidad más inmediata no consiste necesariamente en generar nuevos datos, sino en activar los ya existentes. Muchas empresas disponen de información en ERP, hojas de cálculo, sistemas de calidad, máquinas, almacenes o facturación. El problema es que esos datos no están integrados ni estructurados para decidir. Activarlos implica limpiar, ordenar, conectar y visualizar.

Esta oportunidad tiene un alto potencial porque no siempre exige grandes inversiones iniciales. Un primer cuadro de mando bien definido puede cambiar la conversación de gestión: pasar de discutir percepciones a revisar evidencias; de reaccionar tarde a detectar desviaciones; de preparar informes manuales a automatizar rutinas; de depender de una persona a institucionalizar información compartida.

### **Oportunidad 2. Digitalizar la eficiencia energética**

La eficiencia energética mediante digitalización aparece como una oportunidad especialmente relevante para el metal. La energía incide directamente en costes, márgenes y sostenibilidad, sobre todo en procesos intensivos. Medir consumos por equipo, turno, línea o familia de producto permite identificar pérdidas ocultas, consumos en vacío, picos no justificados y oportunidades de optimización.

La oportunidad es doble. Por un lado, mejora el resultado económico. Por otro, prepara a la empresa para exigencias crecientes de sostenibilidad, huella de carbono, trazabilidad ambiental y requerimientos de clientes. La digitalización energética convierte una obligación potencial en una herramienta de gestión.

### **Oportunidad 3. Trazabilidad digital y economía circular**

La trazabilidad digital es una oportunidad transversal. Permite conectar materiales, proveedores, lotes, operaciones, controles, no conformidades, expediciones y documentación. En un sector donde la calidad, la certificación y la procedencia del material son relevantes, la trazabilidad refuerza la confianza y reduce tiempos de respuesta ante incidencias.

La economía circular amplía esta lógica. Gestionar mermas, reciclaje, reutilización, reprocesos y huella material requiere datos conectados. La digitalización permite identificar dónde se generan pérdidas, qué productos o procesos concentran residuos y cómo mejorar el aprovechamiento material. Por tanto, circularidad y trazabilidad no son líneas aisladas, sino parte de una misma infraestructura de información.

### **Oportunidad 4. Mantenimiento predictivo y producción conectada**

El mantenimiento predictivo con IoT ha sido identificado como oportunidad de alto potencial, aunque condicionado por la madurez previa. Antes de predecir fallos, la empresa necesita conocer activos críticos, históricos, modos de fallo, repuestos, paradas y señales relevantes. La sensorización debe responder a una hipótesis operativa: reducir averías, anticipar desgaste, evitar paradas de una línea crítica o mejorar disponibilidad.

La producción conectada, por su parte, permite avanzar hacia una gestión más proactiva del taller. La conexión de datos de máquina con órdenes, calidad y mantenimiento favorece la mejora continua. En lugar de analizar el problema semanas después, la empresa puede detectar desviaciones durante la operación y actuar con mayor rapidez.

### **Oportunidad 5. Formación práctica y perfiles híbridos**

La formación aparece como una oportunidad de alto valor porque actúa sobre varias barreras simultáneamente. Mejora el uso de herramientas existentes, reduce resistencia al cambio, aumenta autonomía interna y permite que la empresa dependa menos de proveedores externos. La formación debe ser práctica, vinculada a procesos reales y adaptada a perfiles: dirección, mandos, oficina técnica, calidad, mantenimiento, producción, administración y comercial.

El desarrollo de perfiles híbridos es especialmente importante. La industria del metal necesita personas que traduzcan entre taller y tecnología. Estos perfiles no solo implantan herramientas; ayudan a definir datos, interpretar indicadores, detectar problemas y generar confianza entre áreas. Sin ellos, la transformación queda atrapada entre proveedores tecnológicos que desconocen el proceso y equipos internos que no siempre dominan las posibilidades digitales.

## Oportunidad 6. Colaboración sectorial y proyectos tractores

La colaboración sectorial es una oportunidad necesaria para un tejido empresarial atomizado. La innovación en solitario resulta costosa y arriesgada para muchas PYMES. Los proyectos demostrativos, los hubs, los clusters, los centros tecnológicos y las organizaciones sectoriales pueden reducir incertidumbre, compartir aprendizajes, crear estándares y facilitar acceso a capacidades que una empresa individual no puede sostener.

Los proyectos tractores son especialmente relevantes cuando conectan grandes empresas con su cadena de suministro. Si las empresas líderes exigen trazabilidad, calidad de datos, sostenibilidad o integración digital sin acompañar a sus proveedores, pueden ampliar la brecha. Si, por el contrario, actúan como motor colectivo, pueden acelerar la modernización del ecosistema y mejorar la competitividad de toda la cadena de valor.

### 12.2.3. Lectura integrada de retos y oportunidades

La relación entre retos y oportunidades puede resumirse en una idea: el sector debe pasar de la digitalización como acumulación de herramientas a la digitalización como sistema de gestión industrial. Esto exige combinar tecnología, procesos, personas y objetivos de negocio. Las empresas que traten la digitalización como proyecto informático limitado obtendrán resultados parciales. Las que la conviertan en agenda directiva y operativa tendrán mayor capacidad de competir.

La oportunidad competitiva más sólida se encuentra en aquello que la tecnología permite hacer mejor: medir, conectar, anticipar, asegurar, aprender y diferenciar. Medir consumos, tiempos, calidad y capacidad. Conectar planta, oficina y cadena de suministro. Anticipar fallos, desviaciones y necesidades. Asegurar continuidad, trazabilidad y ciberseguridad. Aprender de los datos y del conocimiento interno. Diferenciarse mediante calidad, rapidez, sostenibilidad y servicio.

Las oportunidades deben priorizarse de forma realista. No todas las empresas deben empezar por IA, gemelos digitales o espacios de datos. Muchas obtendrán más retorno inmediato de limpiar maestros, automatizar reporting, conectar producción con ERP, asegurar copias de seguridad o digitalizar la trazabilidad de almacén. El enfoque correcto no es adoptar lo más avanzado, sino construir la siguiente capacidad necesaria.

## 12.3. CLAVES ESTRATÉGICAS PARA LA COMPETITIVIDAD FUTURA

La competitividad futura de la industria española del metal dependerá de su capacidad para avanzar desde una base digital funcional hacia un modelo industrial conectado, gobernado por datos, seguro, sostenible y centrado en las personas. Esta transformación no será uniforme ni inmediata. Requerirá una secuencia disciplinada, adaptada por tamaño y subsector, y apoyada por un ecosistema público-privado que entienda la digitalización como inversión en capacidades.

Las claves estratégicas que se presentan a continuación sintetizan el conjunto de la memoria. No constituyen recomendaciones aisladas, sino principios de cierre que deben orientar la toma de decisiones. Su valor reside en ordenar prioridades y evitar dos riesgos habituales: la paralización por complejidad y la adopción precipitada de tecnologías sin base suficiente.

### 12.3.1. Digitalización alineada a negocio

La primera clave estratégica es entender la digitalización como medio, no como fin. La empresa del metal no se digitaliza para acumular software, sensores o dashboards, sino para competir mejor. Esto implica seleccionar proyectos que respondan a problemas concretos: mejorar el cumplimiento de plazo, reducir no calidad, aumentar disponibilidad, controlar costes, acortar tiempos de respuesta, reforzar trazabilidad o cumplir exigencias energéticas y ambientales.

La alineación a negocio exige que cada iniciativa digital tenga propietario, indicador y criterio de éxito. Un proyecto de BI debe reducir tiempos de reporting o mejorar decisiones. Un proyecto IoT debe disminuir paradas, detectar pérdidas o controlar variables críticas. Una implantación cloud debe mejorar continuidad

y colaboración. Una solución de IA debe resolver un caso de uso medible. Sin esa conexión, la digitalización pierde foco y puede generar frustración.

Esta clave es especialmente importante para las PYMES, donde los recursos son limitados. La selección de proyectos debe atender al retorno operativo y a la capacidad real de ejecución. Un proyecto pequeño, bien implantado y medido, puede generar más aprendizaje que una iniciativa ambiciosa sin responsables internos suficientes.

### **12.3.2. Cimientos digitales y ciberhigiene antes de escalar**

La segunda clave consiste en asegurar fundamentos. Inventario de activos, control de accesos, copias de seguridad verificadas, datos maestros, KPIs básicos y ciberseguridad mínima son requisitos previos para cualquier avance. Sin estos cimientos, las tecnologías avanzadas se apoyan sobre una base frágil.

La ciberhigiene debe considerarse parte de la continuidad de negocio. La empresa conectada necesita proteger sus sistemas porque su dependencia digital aumenta. Un ERP inaccesible, una documentación técnica bloqueada o una red de planta comprometida pueden detener la actividad. Por tanto, la ciberseguridad no es un coste accesorio, sino una condición de funcionamiento.

Los cimientos también incluyen normalización de datos. Antes de automatizar decisiones, la empresa debe asegurarse de que clientes, artículos, rutas, listas de materiales, ubicaciones, lotes, incidencias y estados de proceso están definidos con criterios comunes. La calidad del dato es una inversión invisible, pero determina el éxito de todo lo que viene después.

### **12.3.3. Hilo digital e integración IT/OT**

La tercera clave estratégica es construir progresivamente un hilo digital que conecte el proceso completo. La competitividad futura dependerá de que la empresa pueda vincular información comercial, técnica, productiva, logística, financiera, de calidad y de mantenimiento. Esta conexión permite trazabilidad, coordinación, análisis causal y capacidad de respuesta.

La integración IT/OT ocupa un lugar central en esta clave. La planta no puede seguir operando como un mundo separado de la gestión. Tampoco debe conectarse sin seguridad y sin propósito. La integración debe diseñarse con criterios de utilidad operativa, protección de activos, escalabilidad y estándares abiertos siempre que sea posible.

El hilo digital no se construye de una vez. Debe avanzar por prioridades: primero flujos críticos, después procesos relacionados, finalmente cadena de suministro y cliente. Esta secuencia evita proyectos excesivamente grandes y permite demostrar valor en fases sucesivas.

### **12.3.4. Gobernanza del dato como capacidad competitiva**

La cuarta clave es convertir la gobernanza del dato en una capacidad de gestión. Las empresas líderes no serán necesariamente las que más datos acumulen, sino las que mejor los utilicen. Para ello, deben definir quién es responsable de cada dominio de información, qué dato es válido, cómo se captura, con qué frecuencia se actualiza y cómo se corrige cuando falla.

La figura del propietario del dato resulta especialmente útil. No se trata de un perfil puramente tecnológico, sino de una persona de negocio responsable de asegurar que la información crítica de su área es fiable. Producción, calidad, compras, almacén, comercial o finanzas deben asumir responsabilidades de dato, coordinadas por una visión transversal.

La gobernanza del dato permite escalar BI, analítica avanzada e IA. También facilita auditorías, trazabilidad, cumplimiento normativo y sostenibilidad. En un entorno donde clientes y reguladores exigirán cada vez más información verificable, la capacidad de producir datos confiables será una ventaja competitiva.

### 12.3.5. Talento híbrido y centralidad humana

La quinta clave es desarrollar talento híbrido y mantener una visión humano-céntrica de la transformación. La Industria 5.0 no plantea una digitalización contra las personas, sino una digitalización que aumente seguridad, ergonomía, aprendizaje, capacidad de decisión y calidad del trabajo. Esta perspectiva es particularmente relevante en un sector con conocimiento técnico acumulado y retos de relevo generacional.

La empresa debe formar a sus equipos en competencias digitales aplicadas: lectura de indicadores, ciberhigiene, captura de datos, uso de ERP/MES/CRM, análisis de incidencias, manejo de interfaces digitales y participación en mejora continua. La formación debe ser continua, breve, práctica y relacionada con problemas reales. La plantilla debe ver que la digitalización ayuda a resolver dificultades, no que añade burocracia.

La centralidad humana exige también implicar a mandos intermedios y operarios clave. Estos perfiles conocen el proceso y pueden anticipar problemas de implantación. Incorporarlos desde el diseño aumenta la calidad de la solución y reduce resistencia. La transformación digital no puede hacerse solo desde sistemas o dirección; debe construirse con quienes sostienen la operación diaria.

### 12.3.6. Sostenibilidad integrada desde el diseño

La sexta clave estratégica es integrar sostenibilidad y eficiencia energética dentro de la transformación digital, no tratarlas como un capítulo separado. En el sector metal, medir energía, materiales, mermas, reprocesos, huella y circularidad forma parte de la competitividad. La empresa que controla estos datos puede reducir costes, cumplir mejor, responder a clientes y prepararse para nuevas exigencias regulatorias.

La digitalización sostenible debe orientarse a datos accionables. No basta con calcular indicadores agregados de forma anual. Es necesario conectar consumos con procesos, lotes, productos, máquinas o turnos cuando sea relevante. La trazabilidad ambiental será cada vez más importante, y la empresa que no disponga de datos estructurados tendrá dificultades para acreditar desempeño.

La sostenibilidad integrada también ofrece oportunidades comerciales. Clientes industriales, especialmente en cadenas de valor más exigentes, valorarán proveedores capaces de demostrar trazabilidad, eficiencia, reducción de residuos y control de huella. La digitalización convierte estos atributos en evidencia verificable.

### 12.3.7. Segmentación de actuaciones por tamaño, madurez y subsector

La séptima clave es segmentar. El sector necesita evitar recetas universales. Las microempresas requieren cimientos, acompañamiento, soluciones sencillas, ciberhigiene y apoyo para superar barreras de percepción y ejecución. Las pequeñas empresas necesitan integración básica, reporting, formación y uso más completo de herramientas disponibles. Las medianas deben avanzar en gobierno, IT/OT, analítica y proyectos estructurados. Las grandes deben escalar, estandarizar, asegurar la cadena y actuar como tractoras.

La segmentación por subsector es igualmente necesaria. No se digitaliza igual una planta de metalurgia intensiva en energía que una empresa de maquinaria con fuerte contenido de ingeniería o un taller de productos metálicos con alta variabilidad. La actuación debe adaptarse al proceso, al cliente, a la presión regulatoria, a la criticidad de los activos y a la capacidad interna.

Esta clave debe orientar también la acción de organizaciones sectoriales y administraciones. Programas demasiado genéricos pierden eficacia. La asistencia debe ser diferenciada, práctica y cercana al proceso industrial real.

### 12.3.8. Roadmap operativo y disciplina de ejecución

La octava clave es ejecutar mediante una hoja de ruta por oleadas. La memoria propone avanzar desde cimientos hacia integración, automatización con datos y escalado. Esta secuencia evita el salto prematuro a tecnologías de frontera sin base suficiente y facilita que cada fase genere capacidades para la siguiente.

En una primera etapa, la prioridad es asegurar fundamentos: activos, accesos, copias, datos maestros, KPIs y ciberseguridad. En una segunda, integrar y medir: extender sistemas, conectar áreas, automatizar reporting y normalizar captura de datos. En una tercera, automatizar con datos: sensorización, mantenimiento basado en condición, trazabilidad y pilotos con retorno. En una cuarta, escalar y diferenciar: IA, integración de cadena, visión artificial, servitización y modelos de negocio avanzados.

La disciplina de ejecución es tan importante como la visión. Cada oleada debe tener responsables, plazos, indicadores y mecanismos de revisión. La transformación digital fracasa cuando se concibe como proyecto puntual. Tiene más posibilidades de éxito cuando se convierte en rutina directiva y operativa, con seguimiento periódico y aprendizaje acumulativo.

OLEADA	HORIZONTE	PRIORIDAD ESTRATÉGICA	RESULTADO ESPERADO
1. Asegurar cimientos	0-3 meses	Inventario, ciberhigiene, datos maestros, KPIs mínimos y visión digital.	Base segura y ordenada para evitar riesgos y dispersión.
2. Integrar y medir	3-9 meses	Extensión de ERP/CRM, primera capa de BI, normalización de captura y responsables de dato.	Visibilidad operativa y reducción de reporting manual.
3. Automatizar con datos	9-15 meses	IoT en activos críticos, trazabilidad, mantenimiento basado en condición y pilotos de automatización.	Eficiencia proactiva y aprendizaje de casos de uso.
4. Escalar y diferenciar	15-24 meses	IA, cadena de suministro integrada, visión artificial, servitización y escalado de pilotos.	Ventaja competitiva basada en datos, calidad, sostenibilidad y servicio.

### 12.3.9. Ecosistema público-privado como acelerador

La novena clave es reconocer que la transformación del sector no puede recaer solo en empresas individuales. La estructura empresarial del metal, con fuerte predominio de PYMES, exige un ecosistema de apoyo que facilite acceso a conocimiento, financiación, demostradores, talento, estándares y acompañamiento. Organizaciones sectoriales, administraciones, centros tecnológicos, hubs, clusters y empresas tractoras tienen un papel complementario.

La acción pública debe simplificar trámites, adaptar instrumentos a la realidad de la pyme, financiar capacidades además de activos, apoyar ciberseguridad industrial, impulsar formación profesional y promover estándares de interoperabilidad. Las organizaciones sectoriales pueden actuar como traductoras entre política pública, tecnología y necesidades empresariales reales.

La colaboración no debe limitarse a jornadas o difusión. Debe materializarse en demostradores, testbeds, programas de implantación acompañada, bancos de buenas prácticas, espacios de datos, proyectos de cadena y mecanismos de aprendizaje compartido. Solo así la digitalización dejará de ser una carrera individual desigual para convertirse en proceso sectorial de modernización.

### 12.3.10. Conclusión final: de la base digital a la ventaja industrial

La conclusión final de la memoria puede formularse de forma clara: la industria española del metal dispone de una base digital suficiente para acelerar su transformación, pero esa aceleración no será automática. Requiere liderazgo, integración, datos, talento, ciberseguridad, sostenibilidad y ejecución disciplinada. La base existe; el reto es convertirla en ventaja industrial.

El sector ya no se encuentra en el debate inicial sobre si digitalizarse. Ese debate está superado. La cuestión central es cómo digitalizarse de forma útil, segura, integrada y orientada a resultados. Las empresas que limiten la digitalización a obligaciones administrativas o proyectos aislados perderán capacidad de adaptación. Las que construyan un sistema conectado de datos, procesos y personas podrán mejorar productividad, calidad, trazabilidad, resiliencia y capacidad de diferenciación.

La competitividad futura se decidirá en varios planos simultáneos. En la planta, por la capacidad de medir, conectar y optimizar. En la gestión, por la capacidad de decidir con datos fiables. En la cadena de suministro, por la trazabilidad y la colaboración. En el talento, por la creación de perfiles híbridos y cultura digital. En la sostenibilidad, por la capacidad de demostrar eficiencia y circularidad. En la estrategia, por la capacidad de ejecutar una hoja de ruta coherente.

El metal español tiene fortalezas relevantes: base industrial, experiencia productiva, presencia en cadenas de valor estratégicas, automatización en segmentos avanzados y una masa crítica de empresas en niveles intermedios de madurez. Pero estas fortalezas deben consolidarse antes de que la brecha entre empresas líderes y rezagadas se convierta en fractura estructural. La digitalización debe ser un instrumento de cohesión competitiva, no un factor adicional de desigualdad dentro del sector.

Por todo ello, el cierre del estudio no es una conclusión estática, sino una llamada a la acción ordenada. El diagnóstico está formulado, las brechas están identificadas, las buenas prácticas están descritas y el roadmap ofrece una secuencia de avance. La prioridad ahora es convertir conocimiento en implantación, implantación en datos, datos en decisiones y decisiones en competitividad sostenible.

CLAVE FINAL	MENSAJE DE CIERRE
Base	El sector ha superado la digitalización básica, pero necesita consolidar integración y madurez.
Dato	La ventaja competitiva se desplazará hacia empresas capaces de gobernar y explotar información fiable.
Planta	La automatización debe evolucionar hacia producción conectada, trazable y analítica.
Personas	El talento híbrido y la gestión del cambio son condiciones de éxito, no elementos secundarios.
Sostenibilidad	Eficiencia energética, circularidad y trazabilidad deben integrarse en la estrategia digital.
Ecosistema	La colaboración público-privada y sectorial será decisiva para que la pyme avance.
Competitividad	La digitalización es la condición para sostener calidad, servicio, resiliencia y diferenciación futura.

### Conclusión de cierre:

El futuro competitivo de la industria española del metal dependerá de su capacidad para transformar una digitalización todavía fragmentada en una arquitectura integrada de procesos, datos, personas y decisiones.

La tecnología está disponible; el desafío es convertirla en capacidad industrial sostenible.

**ANEXOS**

## ANEXO I. GLOSARIO DE TÉRMINOS TÉCNICOS

### ALCANCE Y MODO DE USO DEL GLOSARIO

Este glosario está concebido como anexo de consulta para una memoria de consultoría sobre digitalización del sector del metal en España. Su función no es sustituir el cuerpo principal del estudio, sino aportar definiciones claras, contexto de uso e implicaciones prácticas de los términos técnicos que aparecen a lo largo de la memoria.

Cada entrada se ha redactado con tres niveles de lectura:

- una definición contextual,
- una explicación del uso del término dentro de la memoria
- y una implicación práctica para empresas, organizaciones sectoriales o administraciones.

De este modo, el glosario no se limita a traducir siglas, sino que explica su relevancia en la transformación digital del sector.

Los términos se han agrupado alfabéticamente para facilitar su localización. Cuando una sigla procede del inglés o de un marco europeo, se conserva su denominación habitual porque así aparece en el lenguaje técnico industrial, pero se explica su sentido operativo en castellano y en el contexto de la empresa del metal.

### GLOSARIO ALFABÉTICO DE TÉRMINOS TÉCNICOS

Las entradas se presentan en orden alfabético. En aquellos casos en que un término tiene un uso muy amplio, la definición se centra en el sentido empleado en la memoria y en sus implicaciones para la industria española del metal.

#### A

##### Activa Industria 4.0

**Ámbito:** Programas de apoyo y acompañamiento

**Definición contextual.** Programa de diagnóstico y acompañamiento orientado a apoyar a las PYMES industriales en la identificación de su posición digital y en la definición de actuaciones de transformación. En la memoria aparece como uno de los instrumentos vinculados al contexto de apoyo público y a la necesidad de acompañar a las empresas, especialmente a aquellas con menor capacidad interna para planificar proyectos digitales.

**Uso en la memoria.** Su relevancia no reside únicamente en la financiación o en el valor económico del servicio, sino en la función de orientación. Para una empresa del metal con recursos limitados, un diagnóstico estructurado puede evitar inversiones aisladas, priorizar necesidades y traducir la digitalización en un plan operativo comprensible.

**Implicación práctica.** Debe entenderse como herramienta habilitadora, no como sustituto de la estrategia empresarial. Si la empresa no asigna responsables, no adopta decisiones y no ejecuta las recomendaciones, el diagnóstico pierde capacidad transformadora.

## Agentes de IA autónomos

**Ámbito:** Inteligencia artificial y automatización avanzada

**Definición contextual.** Aplicaciones de inteligencia artificial capaces de ejecutar tareas con cierto grado de autonomía, encadenar acciones, consultar información y asistir procesos de decisión o gestión. En la memoria se tratan como una tecnología de adopción todavía muy incipiente dentro del sector del metal, con concentración en empresas de mayor madurez y con fuerte dependencia de la calidad del dato.

**Uso en la memoria.** En el contexto industrial, pueden apoyar tareas como consulta de documentación técnica, preparación de informes, asistencia a mantenimiento, seguimiento de incidencias o explotación de bases de conocimiento. No sustituyen la gobernanza del proceso ni la validación humana en decisiones críticas.

**Implicación práctica.** Su implantación exige bases previas: datos ordenados, permisos claros, trazabilidad de acciones, ciberseguridad, supervisión y conocimiento de los riesgos. Sin esos cimientos, el agente puede amplificar errores o actuar sobre información incompleta.

## Analítica avanzada

**Ámbito:** Datos, decisión y mejora continua

**Definición contextual.** Conjunto de técnicas que permiten pasar del reporte descriptivo a la detección de patrones, predicción de comportamientos y apoyo a decisiones complejas. Incluye modelos estadísticos, aprendizaje automático, análisis predictivo y explotación de grandes volúmenes de datos operativos.

**Uso en la memoria.** En la memoria se vincula a la necesidad de convertir datos capturados en inteligencia accionable. En una empresa del metal puede utilizarse para anticipar defectos, prever cargas de trabajo, optimizar consumos, analizar retrasos, identificar causas de parada o mejorar la planificación.

**Implicación práctica.** No debe implantarse antes de resolver problemas básicos de integración, calidad del dato y definición de indicadores. La analítica avanzada aporta valor cuando responde a preguntas de negocio concretas y cuando sus resultados se incorporan a rutinas reales de decisión.

## Automatización conectada

**Ámbito:** Producción, planta y sistemas industriales

**Definición contextual.** Modelo en el que los equipos automatizados no solo ejecutan operaciones, sino que generan, transmiten y reciben datos dentro de un sistema integrado. Supone superar la automatización aislada, frecuente en entornos industriales con maquinaria avanzada pero desconectada de sistemas de gestión o análisis.

**Uso en la memoria.** En el sector del metal permite asociar información de máquina, orden de fabricación, lote, operador, parámetros de proceso, calidad y mantenimiento. De esta forma, la automatización deja de ser únicamente una mejora de productividad y se convierte en fuente de visibilidad operativa.

**Implicación práctica.** La automatización conectada requiere integración IT/OT, estándares de datos, seguridad industrial y responsables de proceso. Su valor se mide por la capacidad de reducir pérdidas ocultas, mejorar la trazabilidad y acelerar la respuesta ante desviaciones.

## Automatización industrial

**Ámbito:** Producción y eficiencia operativa

**Definición contextual.** Uso de sistemas mecánicos, eléctricos, electrónicos y digitales para ejecutar tareas productivas con menor intervención manual, mayor estabilidad y capacidad de repetición. En el metal incluye desde CNC, PLC y robots hasta líneas semiautomatizadas o células de fabricación.

**Uso en la memoria.** La memoria diferencia automatizar de digitalizar. Una planta puede estar automatizada y, al mismo tiempo, carecer de datos integrados, trazabilidad o análisis en tiempo real. Por ello, la automatización industrial constituye una base importante, pero no equivale por sí sola a madurez digital.

**Implicación práctica.** La prioridad estratégica es convertir la automatización existente en una fuente de datos y aprendizaje. Instalar más equipos no siempre es la primera necesidad; con frecuencia lo es conectar, medir y explotar mejor los activos ya disponibles.

## Autonomía estratégica abierta

**Ámbito:** Estrategia industrial europea

**Definición contextual.** Concepto de política industrial europea que combina apertura comercial con capacidad de actuación propia en ámbitos críticos como energía, materias primas, tecnología, defensa o salud. En la memoria se relaciona con la reindustrialización europea y con la reducción de dependencias estratégicas.

**Uso en la memoria.** Para el sector metal, la autonomía estratégica se concreta en disponibilidad de materias primas, capacidades productivas locales, cadenas de suministro más resilientes y fabricación de componentes de alto valor para sectores tractores.

**Implicación práctica.** La digitalización contribuye a esta autonomía al mejorar trazabilidad, productividad, planificación, flexibilidad y capacidad de respuesta ante perturbaciones. No es un concepto geopolítico abstracto, sino una condición que afecta a compras, producción, logística, inversión y estrategia empresarial.

## B

### Base digital

**Ámbito:** Madurez digital y fundamentos tecnológicos

**Definición contextual.** Conjunto mínimo de herramientas, procesos y prácticas que permiten a una empresa operar de forma digital en sus funciones esenciales. Incluye sistemas de gestión, facturación electrónica, infraestructura cloud, control de accesos, copias de seguridad y datos maestros suficientemente ordenados.

**Uso en la memoria.** La memoria señala que el sector dispone de una base digital relevante en ámbitos administrativos y de gestión, aunque no siempre integrada con producción, datos o capacidades avanzadas. La base digital es el punto de partida, no el resultado final de la transformación.

**Implicación práctica.** Sin base digital no es recomendable abordar proyectos complejos de IA, gemelo digital o mantenimiento predictivo. La primera prioridad de muchas PYMES es consolidar cimientos antes de escalar hacia tecnologías de mayor sofisticación.

## Big Data industrial

**Ámbito:** Datos industriales y analítica

**Definición contextual.** Tratamiento de volúmenes elevados, variados y veloces de datos procedentes de máquinas, sensores, sistemas de gestión, calidad, mantenimiento, logística o clientes. En el sector del metal cobra sentido cuando esos datos permiten identificar patrones que no son visibles mediante informes manuales.

**Uso en la memoria.** La memoria lo vincula al uso del dato en producción, a la analítica avanzada y a la transición hacia modelos de decisión basados en evidencia. Su aplicación puede abarcar control de proceso, previsión de demanda, detección de anomalías o análisis de consumos.

**Implicación práctica.** No es necesario que todas las empresas comiencen con grandes plataformas. La prioridad inicial suele ser ordenar fuentes, automatizar capturas, definir KPIs y garantizar calidad del dato. El Big Data sin gobierno puede convertirse en acumulación de información sin utilidad operativa.

## Business Intelligence (BI)

**Ámbito:** Gestión, reporting y toma de decisiones

**Definición contextual.** Conjunto de herramientas y métodos que transforman datos de negocio y operación en cuadros de mando, indicadores y análisis estructurados. En la memoria aparece como una de las brechas relevantes: muchas empresas capturan datos, pero una proporción menor los convierte en inteligencia sistemática para decidir.

**Uso en la memoria.** En una empresa del metal, el BI permite visualizar plazos, producción, calidad, ventas, compras, stock, margen, consumos y carga de trabajo. Su valor aumenta cuando los datos proceden de sistemas integrados y no de hojas de cálculo manuales difíciles de mantener.

**Implicación práctica.** La implantación de BI debe comenzar por pocos indicadores críticos, bien definidos y con responsables claros. Un cuadro de mando extenso, pero alimentado por datos inconsistentes, genera más ruido que mejora real.

## C

### CAD/CAM

**Ámbito:** Oficina técnica, ingeniería y fabricación

**Definición contextual.** CAD hace referencia al diseño asistido por ordenador y CAM a la fabricación asistida por ordenador. En conjunto, conectan la fase de diseño técnico con la preparación de procesos de mecanizado, corte, programación o fabricación.

**Uso en la memoria.** En la industria metalmecánica son herramientas habituales en oficina técnica, maquinaria, mecanizado y fabricación de productos metálicos. La memoria las menciona como parte del contexto de empresas que pueden tener herramientas avanzadas, pero no necesariamente integradas con ERP, producción, calidad o trazabilidad.

**Implicación práctica.** La buena práctica no consiste solo en disponer de CAD/CAM, sino en controlar versiones, planos, listas de materiales, rutas y cambios de ingeniería. La desconexión entre diseño y taller es una fuente frecuente de errores, retrabajos y costes ocultos.

## Cadena de suministro

**Ámbito:** Compras, logística y resiliencia

**Definición contextual.** Red de proveedores, materiales, subcontratistas, procesos logísticos y flujos de información que permiten a la empresa fabricar y entregar sus productos. En el metal incluye materias primas, componentes, tratamientos, servicios externos, transporte y documentación asociada.

**Uso en la memoria.** La memoria la relaciona con resiliencia industrial, trazabilidad, riesgos geopolíticos, suministro de materias primas críticas y necesidad de digitalizar compras y logística. La cadena de suministro ya no se gestiona solo por precio, sino también por plazo, riesgo, dependencia y capacidad de respuesta.

**Implicación práctica.** Digitalizar la cadena de suministro implica evaluar proveedores, controlar incidencias, anticipar roturas, conectar pedidos y almacenes, y disponer de visibilidad sobre materiales críticos. Es una palanca de competitividad y continuidad de negocio.

## Cadena de valor

**Ámbito:** Estrategia sectorial y competitividad

**Definición contextual.** Secuencia de actividades que generan valor desde el suministro de materias primas hasta el producto final, el servicio al cliente y, en algunos casos, el ciclo de vida completo del producto. En la memoria se utiliza para describir la función estructural del metal dentro de sectores tractores como automoción, energía, construcción, defensa o aeronáutica.

**Uso en la memoria.** El concepto permite entender que la digitalización de una empresa del metal afecta también a clientes y proveedores. La capacidad de trazabilidad, calidad, rapidez y documentación condiciona el acceso a cadenas de valor más exigentes.

**Implicación práctica.** La competitividad futura no dependerá solo de fabricar piezas o materiales, sino de integrarse digitalmente en cadenas de valor que exigirán información fiable, respuesta ágil, sostenibilidad documentada y colaboración técnica.

## Capacidades avanzadas

**Ámbito:** Modelo de madurez digital

**Definición contextual.** Bloque del análisis de madurez que agrupa tecnologías y prácticas de mayor sofisticación, como inteligencia artificial, analítica avanzada, mantenimiento predictivo, visión artificial, agentes de IA, gemelos digitales o automatización conectada.

**Uso en la memoria.** En la memoria se diferencia la presencia de una base digital de la existencia de capacidades avanzadas. El sector muestra avances en gestión, pero una adopción más reducida de tecnologías de frontera, especialmente en microempresas y PYMES de menor madurez.

**Implicación práctica.** Las capacidades avanzadas deben incorporarse de forma gradual y vinculada a casos de uso concretos. Sin integración de sistemas, gobierno del dato y talento híbrido, su implantación corre el riesgo de quedarse en pilotos aislados.

## CBAM

**Ámbito:** Regulación climática y competitividad industrial

**Definición contextual.** Siglas de Carbon Border Adjustment Mechanism, traducido como Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono. En la memoria se trata como una regulación europea que afecta a sectores intensivos en carbono, especialmente en relación con acero, aluminio y cadenas de suministro industriales.

**Uso en la memoria.** Para empresas del metal, el CBAM introduce presión para conocer, documentar y reducir la huella de carbono asociada a materiales y procesos. También refuerza la importancia de trazabilidad, datos fiables y gestión energética.

**Implicación práctica.** La adaptación al CBAM no es solo un asunto regulatorio. Exige capacidades digitales para medir, registrar, auditar y comunicar información ambiental. Las empresas con datos desordenados tendrán más dificultades para responder a nuevas exigencias de mercado y cumplimiento.

## Ciberhigiene

**Ámbito:** Ciberseguridad básica y continuidad de negocio

**Definición contextual.** Conjunto de prácticas mínimas y recurrentes que reducen el riesgo digital cotidiano: copias de seguridad, actualización de sistemas, control de accesos, autenticación robusta, revisión de permisos, protección de correo y formación básica frente a amenazas.

**Uso en la memoria.** La memoria la plantea como una prioridad especialmente relevante para microempresas y PYMES, antes de abordar arquitecturas de ciberseguridad más sofisticadas. Su enfoque es práctico: proteger la continuidad operativa y evitar incidentes evitables.

**Implicación práctica.** Una empresa del metal puede sufrir una parada de producción, pérdida de documentación técnica o bloqueo de facturación por fallos básicos de seguridad. La ciberhigiene debe formar parte de los cimientos digitales, no tratarse como un complemento posterior.

## Ciberseguridad industrial

**Ámbito:** Seguridad IT/OT y continuidad de negocio

**Definición contextual.** Protección de sistemas digitales, redes, datos y activos industriales frente a accesos no autorizados, interrupciones, manipulación o pérdida de información. En entornos industriales incluye tanto sistemas IT como tecnologías operacionales vinculadas a maquinaria y control de planta.

**Uso en la memoria.** La memoria la identifica como una brecha crítica del sector, especialmente cuando aumenta la interconexión entre máquinas, sensores, ERP, cloud y sistemas de producción. La ciberseguridad industrial es condición para avanzar hacia integración OT/IT, IA y mantenimiento predictivo.

**Implicación práctica.** No debe limitarse a antivirus o firewall. Requiere inventario de activos, segmentación, copias verificadas, gestión de identidades, protocolos de recuperación y coordinación entre sistemas, mantenimiento y dirección.

## Cloud computing

**Ámbito:** Infraestructura digital y escalabilidad

**Definición contextual.** Modelo de prestación de servicios tecnológicos a través de infraestructura remota, que permite acceder a almacenamiento, aplicaciones, capacidad de cómputo y servicios digitales sin depender exclusivamente de servidores locales.

**Uso en la memoria.** En la memoria aparece como una tecnología de base con adopción significativa y como elemento de continuidad, colaboración y escalabilidad. Para PYMES del metal puede facilitar acceso remoto, copias de seguridad, trabajo colaborativo, actualización de aplicaciones y reducción de dependencia de infraestructura propia.

**Implicación práctica.** Migrar a cloud no equivale automáticamente a madurez digital. Debe acompañarse de control de identidades, permisos, clasificación de información, copias, gobierno del dato y criterios de ciberseguridad proporcionales al riesgo.

## CNC

**Ámbito:** Producción avanzada y mecanizado

**Definición contextual.** Control numérico por ordenador. Tecnología que permite programar y controlar máquinas de mecanizado, corte u otras operaciones industriales con precisión, repetibilidad y menor dependencia de ajustes manuales.

**Uso en la memoria.** En la memoria aparece como parte de la evolución de la automatización industrial y de la base tecnológica del sector metal. Muchas empresas disponen de CNC, pero no siempre explotan los datos asociados a programas, tiempos, incidencias, parámetros o calidad.

**Implicación práctica.** El reto no es únicamente tener máquinas CNC, sino conectarlas al sistema productivo, controlar versiones de programas, capturar tiempos reales, asociar resultados de calidad y convertir la máquina en parte del hilo digital de fabricación.

## Cobots

**Ámbito:** Robótica colaborativa e Industria 5.0

**Definición contextual.** Robots colaborativos diseñados para trabajar en proximidad con personas, realizando tareas de apoyo, manipulación, repetición o asistencia bajo condiciones de seguridad adecuadas. Se vinculan con la dimensión humano-céntrica de la Industria 5.0.

**Uso en la memoria.** En empresas del metal pueden utilizarse en carga y descarga de máquinas, manipulación de piezas, soldadura auxiliar, montaje, inspección o tareas repetitivas. Su interés no reside solo en sustituir trabajo manual, sino en mejorar ergonomía, seguridad y estabilidad de procesos.

**Implicación práctica.** La implantación de cobots requiere análisis de proceso, seguridad, formación de operarios y rediseño del puesto. Bien aplicados, pueden aliviar tareas de bajo valor o riesgo, manteniendo a la persona como supervisora y gestora del proceso.

## Competencias digitales

**Ámbito:** Talento y factor humano

**Definición contextual.** Conjunto de conocimientos, habilidades y actitudes necesarias para utilizar herramientas digitales, interpretar datos, operar sistemas, colaborar en entornos conectados y participar en procesos de mejora tecnológica.

**Uso en la memoria.** La memoria las presenta como un factor crítico de transformación. No se limitan al personal informático; afectan a operarios, mandos intermedios, calidad, mantenimiento, oficina técnica, administración, comercial y dirección.

**Implicación práctica.** El desarrollo de competencias digitales debe adaptarse al perfil profesional y al entorno de trabajo. La formación genérica tiene menor impacto que el aprendizaje aplicado a procesos reales, datos de la empresa y casos de uso cercanos.

## Conocimiento tácito

**Ámbito:** Talento, relevo generacional y operación industrial

**Definición contextual.** Saber práctico acumulado por trabajadores expertos que no siempre está documentado en procedimientos, planos o sistemas. Incluye criterios de ajuste, interpretación de señales, resolución de incidencias y experiencia adquirida en planta.

**Uso en la memoria.** En el sector metal es especialmente relevante por la importancia de oficios, procesos complejos, maquinaria específica y experiencia operativa. La memoria lo vincula al relevo generacional y a la necesidad de capturar y transferir saber hacer.

**Implicación práctica.** La digitalización puede ayudar a documentar procedimientos, registrar incidencias, crear bases de conocimiento y formar nuevos perfiles. Si no se gestiona, la salida de personal experto puede provocar pérdida de productividad, calidad y capacidad de resolución.

## Control de calidad automatizado

**Ámbito:** Calidad, inspección y proceso

**Definición contextual.** Uso de tecnologías digitales, sensores, visión artificial, equipos de medición o reglas de validación automática para detectar defectos, desviaciones o no conformidades con menor intervención manual y mayor repetibilidad.

**Uso en la memoria.** La memoria lo vincula a visión artificial, IA aplicada a calidad y digitalización de controles. En el metal puede aplicarse a dimensiones, acabados, soldaduras, superficies, piezas mecanizadas, series repetitivas o controles de proceso.

**Implicación práctica.** Para que sea eficaz, debe estar conectado con datos de producción, lotes, materiales, máquinas y acciones correctivas. Automatizar la inspección sin integrar resultados limita el aprendizaje y reduce la capacidad de prevenir defectos futuros.

## Convergencia IT/OT

**Ámbito:** Arquitectura industrial y planta conectada

**Definición contextual.** Integración entre tecnologías de la información, orientadas a datos y gestión empresarial, y tecnologías operacionales, orientadas al control de equipos, máquinas y procesos industriales.

**Uso en la memoria.** En la memoria se presenta como una condición necesaria para avanzar en trazabilidad, OEE, mantenimiento predictivo, IA industrial y control en tiempo real. Muchas empresas tienen automatización en planta, pero no una conexión robusta con sistemas de gestión o análisis.

**Implicación práctica.** La convergencia IT/OT exige colaboración entre sistemas, mantenimiento, producción y seguridad. También requiere gobernanza, arquitectura, protocolos de comunicación y criterios de ciberseguridad que protejan la continuidad de planta.

## CRM

**Ámbito:** Relación con clientes y gestión comercial

**Definición contextual.** Sistema de gestión de relaciones con clientes. Permite registrar oportunidades, contactos, ofertas, interacciones, reclamaciones, histórico comercial y previsiones vinculadas al ciclo de venta.

**Uso en la memoria.** En la memoria aparece como tecnología de gestión empresarial con adopción inferior a ERP y facturación electrónica, pero relevante para profesionalizar la relación B2B industrial. En el metal, el CRM debe contemplar ofertas técnicas, plazos, planos, incidencias y posventa.

**Implicación práctica.** Su valor aumenta cuando se integra con ERP, producción y calidad. Un CRM aislado puede ser una agenda avanzada; conectado al negocio, se convierte en herramienta para mejorar servicio, previsión, seguimiento y rentabilidad de clientes.

## CRMA

**Ámbito:** Materias primas críticas y política industrial europea

**Definición contextual.** Siglas de Critical Raw Materials Act, marco europeo sobre materias primas críticas. En la memoria se menciona por su relevancia para el suministro, reciclaje y procesamiento de materiales necesarios para cadenas de valor tecnológicas e industriales.

**Uso en la memoria.** Para el sector metal, el CRMA se relaciona con disponibilidad de metales estratégicos, reciclaje, economía circular y oportunidades de proyectos industriales vinculados a materiales críticos.

**Implicación práctica.** La digitalización contribuye a cumplir este marco mediante trazabilidad de materiales, documentación de origen, eficiencia en el uso de recursos y capacidad de demostrar circularidad. La gestión del dato material se vuelve un activo estratégico.

## Cultura del dato

**Ámbito:** Organización, decisión y liderazgo

**Definición contextual.** Forma de gestión en la que las decisiones se apoyan de manera sistemática en información fiable, indicadores definidos y análisis compartido, en lugar de depender exclusivamente de intuición, experiencia individual o informes manuales dispersos.

**Uso en la memoria.** La memoria la vincula con la transición desde una cultura analógica hacia una organización data-driven. En el sector metal supone revisar cómo se habla de producción, calidad, compras, mantenimiento, energía o servicio al cliente.

**Implicación práctica.** No se crea solo con herramientas de BI. Requiere liderazgo, disciplina de registro, definición de KPIs, responsabilidades sobre datos y reuniones de gestión donde la información se use para decidir y mejorar.

## D

### Data Spaces o espacios de datos

**Ámbito:** Soberanía del dato y colaboración industrial

**Definición contextual.** Entornos de intercambio de datos entre organizaciones bajo reglas de gobernanza, control, interoperabilidad y confianza. En la memoria aparecen vinculados a arquitecturas digitales futuras, soberanía del dato y colaboración en cadenas industriales.

**Uso en la memoria.** En el sector metal pueden facilitar intercambio seguro de información sobre materiales, trazabilidad, sostenibilidad, calidad, logística o ciclo de vida de producto entre proveedores, clientes y agentes de la cadena de valor.

**Implicación práctica.** Requieren madurez previa en datos internos. Una empresa que no gobierna sus propios datos tendrá dificultades para participar en espacios compartidos con garantías, utilidad y control sobre lo que comparte.

### Descarbonización industrial

**Ámbito:** Sostenibilidad y transición energética

**Definición contextual.** Proceso de reducción de emisiones de carbono asociadas a la actividad industrial, especialmente relevante en subsectores intensivos en energía como siderurgia, fundición y transformación metálica.

**Uso en la memoria.** La memoria la conecta con eficiencia energética, acero verde, hidrógeno verde, CBAM, economía circular y exigencias regulatorias europeas. La digitalización permite medir consumos, optimizar procesos y documentar avances ambientales.

**Implicación práctica.** No puede abordarse solo desde inversión energética. Exige datos, medición, trazabilidad, mantenimiento, control de proceso y decisiones operativas. La empresa que mide mejor sus consumos y mermas tiene más capacidad para reducirlos.

## Digitalización administrativa

**Ámbito:** Gestión empresarial y procesos de oficina

**Definición contextual.** Transformación de procesos administrativos mediante herramientas digitales, como facturación electrónica, contabilidad, gestión documental, ERP, firma digital, archivo electrónico y flujos de aprobación.

**Uso en la memoria.** La memoria identifica esta dimensión como una de las más consolidadas del sector, especialmente frente a la digitalización productiva. En microempresas puede ser, en muchos casos, el único ámbito digitalizado de forma relevante.

**Implicación práctica.** Es una base necesaria, pero no suficiente. El siguiente paso consiste en conectar administración con compras, producción, almacén, calidad y finanzas, evitando recapturas manuales y mejorando control de costes, plazos y márgenes.

## Digitalización industrial

**Ámbito:** Transformación tecnológica y operativa

**Definición contextual.** Aplicación de tecnologías digitales a procesos industriales, sistemas de gestión, producción, mantenimiento, calidad, cadena de suministro, energía y toma de decisiones. No equivale a informatizar tareas aisladas, sino a integrar información, procesos y personas para generar valor operativo.

**Uso en la memoria.** Es el eje central de la memoria. El diagnóstico muestra que el sector metal ha avanzado, pero de manera heterogénea, con brechas entre gestión y planta, entre grandes empresas y PYMES, y entre adopción de herramientas e integración real.

**Implicación práctica.** La digitalización industrial debe evaluarse por resultados: visibilidad, trazabilidad, productividad, calidad, resiliencia, sostenibilidad y capacidad de aprendizaje. La tecnología es medio, no fin.

## DPP o Pasaporte Digital de Producto

**Ámbito:** Trazabilidad, sostenibilidad y regulación

**Definición contextual.** Instrumento digital asociado al ciclo de vida de un producto que permite registrar y comunicar información sobre composición, origen, trazabilidad, sostenibilidad, reparación, reciclaje y otros atributos relevantes.

**Uso en la memoria.** En la memoria se vincula a economía circular, sostenibilidad e Industria 5.0. Para el sector metal puede adquirir relevancia en productos, componentes y materiales sujetos a exigencias crecientes de trazabilidad ambiental y documental.

**Implicación práctica.** Prepararse para el DPP exige datos fiables desde compras y producción hasta expedición y posventa. La empresa que no controle materiales, lotes, procesos y documentación tendrá más dificultades para responder a estas obligaciones futuras.

## E

### Eficiencia energética

**Ámbito:** Sostenibilidad, costes y operación

**Definición contextual.** Capacidad de producir el mismo resultado o valor industrial consumiendo menos energía o utilizando la energía de forma más adecuada. En el metal es especialmente crítica por el peso de electricidad, gas, calor, hornos, compresores y maquinaria intensiva.

**Uso en la memoria.** La memoria la identifica como oportunidad prioritaria por su impacto y retorno a corto-medio plazo. La digitalización permite medir consumos por máquina, proceso, línea, turno o producto, en lugar de limitarse a la factura agregada.

**Implicación práctica.** La eficiencia energética debe tratarse como variable operativa. Medir consumos en vacío, picos, desviaciones y relación entre energía y producción permite detectar pérdidas ocultas y justificar inversiones con datos.

### EMS o sistema de gestión energética

**Ámbito:** Energía, sostenibilidad y datos

**Definición contextual.** Sistema orientado a medir, analizar y optimizar consumos energéticos de instalaciones, líneas o activos industriales. Puede apoyarse en sensores, IoT, analítica, cuadros de mando y procedimientos de gestión energética.

**Uso en la memoria.** En la memoria aparece como herramienta vinculada a sostenibilidad, eficiencia energética y tecnologías para la descarbonización. Su función es convertir el consumo energético en una variable gestionable y no solo contable.

**Implicación práctica.** Un EMS eficaz requiere medición granular, indicadores, responsables y relación con producción. El dato energético cobra valor cuando se vincula a unidades producidas, estados de máquina, calidad, mantenimiento y planificación.

## ERP

**Ámbito:** Gestión empresarial integrada

**Definición contextual.** Sistema de planificación de recursos empresariales. Integra información y procesos de áreas como compras, ventas, almacén, producción, contabilidad, facturación, planificación y control de gestión.

**Uso en la memoria.** En la memoria se presenta como una de las tecnologías de base más extendidas y como columna vertebral de la gestión. Sin embargo, su valor depende de la calidad de implantación, cobertura funcional, datos maestros e integración con procesos reales.

**Implicación práctica.** Un ERP mal parametrizado o infrautilizado puede convivir con hojas de cálculo paralelas y datos contradictorios. La buena práctica consiste en usarlo como sistema de referencia, ampliando su cobertura y conectándolo con planta, calidad y reporting.

## Espacio de nombres unificado (Unified Namespace)

**Ámbito:** Arquitectura IT/OT y datos industriales

**Definición contextual.** Arquitectura de datos industriales que organiza y publica información de planta y sistemas en una estructura común, accesible y coherente. Facilita que aplicaciones, máquinas y usuarios consuman datos con una semántica compartida.

**Uso en la memoria.** La memoria lo menciona dentro de nuevas arquitecturas digitales industriales. Se relaciona con la necesidad de superar sistemas aislados y crear una capa que permita visibilidad operativa, integración y analítica sobre datos fiables.

**Implicación práctica.** No es una solución inicial para todas las empresas. Tiene sentido cuando existe suficiente complejidad industrial y una estrategia clara de integración IT/OT. Antes deben resolverse inventario de sistemas, datos maestros y prioridades de proceso.

## Estrategia digital

**Ámbito:** Dirección, planificación y gobierno

**Definición contextual.** Plan explícito que define cómo una empresa utilizará tecnologías, datos, personas y procesos para mejorar competitividad, productividad, calidad, resiliencia y sostenibilidad. Incluye objetivos, prioridades, recursos, responsables, indicadores y calendario.

**Uso en la memoria.** La memoria y el focus group resaltan la falta de estrategia digital como una de las barreras principales del sector, por encima de la financiación considerada de forma aislada. Muchas iniciativas surgen de urgencias o subvenciones, no de una visión planificada.

**Implicación práctica.** Sin estrategia digital, la empresa corre el riesgo de comprar herramientas inconexas. Con estrategia, la inversión se ordena en oleadas: cimientos, integración, datos, automatización avanzada y diferenciación.

## F

### Fabricación aditiva

**Ámbito:** Producción avanzada y nuevos materiales

**Definición contextual.** Tecnologías de fabricación que construyen piezas añadiendo material capa a capa, frente a procesos sustractivos tradicionales. En el metal puede incluir impresión 3D metálica para prototipos, utillajes, piezas complejas o aplicaciones de alto valor.

**Uso en la memoria.** La memoria la trata como tecnología emergente con potencial, especialmente en contextos de fabricación avanzada, personalización, reducción de material y diseño optimizado. Su adopción depende de sector, producto, certificación y madurez técnica.

**Implicación práctica.** No es una solución universal. Requiere análisis de casos de uso, materiales, costes, calidad, homologación y capacidades de diseño. Puede ser estratégica cuando permite fabricar geometrías, series o componentes que los procesos convencionales no resuelven eficientemente.

## Facturación electrónica

**Ámbito:** Administración, cumplimiento y trazabilidad documental

**Definición contextual.** Emisión, recepción y gestión de facturas en formato digital, con validez administrativa y capacidad de integración con sistemas contables o ERP. En la memoria aparece como una de las tecnologías más implantadas en el sector.

**Uso en la memoria.** Su adopción elevada indica que la digitalización administrativa está más consolidada que otras áreas. No obstante, su valor real aumenta cuando se integra con pedidos, albaranes, cobros, pagos, archivo documental y control de gestión.

**Implicación práctica.** Debe entenderse como punto de entrada a la trazabilidad administrativa. No transforma por sí sola la empresa, pero crea una base de registro, control y automatización sobre la que pueden apoyarse procesos financieros y comerciales más maduros.

## FAIIP

**Ámbito:** Financiación industrial

**Definición contextual.** Fondo de Apoyo a la Inversión Industrial Productiva. En la memoria se incluye entre los instrumentos de financiación relacionados con inversión industrial, modernización productiva y apoyo a empresas manufactureras.

**Uso en la memoria.** Para el sector metal puede ser relevante en proyectos de modernización, ampliación de capacidades, renovación de activos o inversiones productivas. Su utilidad depende de la capacidad de la empresa para preparar proyectos, documentación y justificación económica.

**Implicación práctica.** La financiación no elimina la necesidad de estrategia y ejecución. Una ayuda o préstamo puede facilitar inversión, pero no sustituye la definición de objetivos, el análisis de retorno, la gestión del cambio ni la capacidad técnica interna.

## Focus group

**Ámbito:** Metodología cualitativa y validación

**Definición contextual.** Técnica de consulta participativa en la que un grupo de agentes representativos contrasta, matiza y prioriza hallazgos del diagnóstico. En la memoria se utiliza para validar el análisis cuantitativo y enriquecerlo con percepción sectorial.

**Uso en la memoria.** El focus group permitió confirmar la heterogeneidad del sector, el rezago de microempresas, la digitalización administrativa más avanzada y la relevancia de estrategia, talento y cultura como barreras principales.

**Implicación práctica.** Su valor metodológico está en aportar contexto. No sustituye los datos cuantitativos, pero ayuda a interpretar por qué ocurren las brechas y qué tipo de actuaciones pueden ser más realistas para cada segmento empresarial.

## G

### Gemelo digital

**Ámbito:** Simulación, ingeniería y optimización

**Definición contextual.** Representación digital de un producto, activo, proceso o sistema físico que permite simular, analizar y optimizar su comportamiento. Puede alimentarse con datos históricos, modelos de ingeniería y, en casos más avanzados, datos en tiempo real.

**Uso en la memoria.** En la memoria se vincula a tecnologías emergentes, simulación, eficiencia, sostenibilidad e Industria 4.0/5.0. En el metal puede aplicarse a procesos productivos, líneas, hornos, maquinaria, mantenimiento o diseño de productos.

**Implicación práctica.** Su implantación requiere una base de datos sólida y conocimiento del proceso físico. Sin datos fiables, el gemelo digital se convierte en una maqueta conceptual. Su valor aparece cuando permite probar escenarios, reducir riesgo y mejorar decisiones.

### Gobernanza del dato

**Ámbito:** Datos, organización y control

**Definición contextual.** Conjunto de reglas, roles, responsabilidades y procedimientos que aseguran que los datos críticos se definen, capturan, mantienen y utilizan de forma coherente, fiable y segura.

**Uso en la memoria.** La memoria la presenta como cimiento innegociable de la transformación. En empresas del metal, afecta a artículos, clientes, proveedores, listas de materiales, lotes, estados de proceso, incidencias, costes, calidad y consumos.

**Implicación práctica.** Sin gobernanza del dato, BI, IA, trazabilidad o integración pierden fiabilidad. Gobernar datos no significa burocratizar; significa saber quién define cada dato, dónde se registra, cómo se corrige y qué valor tiene para el proceso.

## H

### Hidrógeno verde

**Ámbito:** Descarbonización y transición energética

**Definición contextual.** Hidrógeno producido mediante energías renovables, considerado vector potencial para reducir emisiones en procesos industriales difíciles de electrificar. En la memoria aparece asociado a acero verde, reindustrialización y oportunidades estratégicas para España.

**Uso en la memoria.** En el sector metal, especialmente en siderurgia, se relaciona con procesos de reducción directa y con la sustitución progresiva de combustibles fósiles en aplicaciones intensivas.

**Implicación práctica.** Su despliegue depende de coste, infraestructura, disponibilidad y apoyo regulatorio. Para las empresas del metal, su relevancia estratégica debe acompañarse de medición energética, planificación de inversiones y vigilancia de la evolución tecnológica.

## Hilo digital

**Ámbito:** Integración de procesos y trazabilidad

**Definición contextual.** Continuidad de información que conecta diseño, compras, producción, calidad, mantenimiento, logística, cliente y ciclo de vida del producto. Permite seguir la información sin rupturas entre áreas, sistemas y fases del proceso.

**Uso en la memoria.** La memoria lo vincula a convergencia IT/OT, trazabilidad y transformación industrial. En el metal resulta esencial para relacionar plano, versión, material, operación, máquina, lote, control de calidad y entrega final.

**Implicación práctica.** El hilo digital reduce errores, duplicidades y pérdidas de contexto. Su construcción suele ser gradual: primero datos maestros y procesos críticos; después integración de sistemas; finalmente analítica, trazabilidad avanzada y colaboración externa.

## I

### I+D+i

**Ámbito:** Innovación y desarrollo tecnológico

**Definición contextual.** Investigación, desarrollo e innovación. Agrupa actividades orientadas a generar conocimiento, desarrollar soluciones, mejorar productos o procesos e introducir innovaciones técnicas u organizativas.

**Uso en la memoria.** La memoria lo vincula a competitividad, tecnologías emergentes, sostenibilidad, nuevos materiales, fabricación avanzada y colaboración con centros tecnológicos. En el metal, la I+D+i puede estar vinculada tanto a producto como a proceso.

**Implicación práctica.** La digitalización aumenta la capacidad de innovar cuando permite experimentar, simular, medir y aprender con mayor rapidez. La I+D+i no debe quedar desconectada de producción, cliente y estrategia de negocio.

### IA generativa

**Ámbito:** Automatización cognitiva y gestión documental

**Definición contextual.** Rama de la inteligencia artificial capaz de generar texto, resúmenes, respuestas, código, imágenes u otros contenidos a partir de instrucciones y datos. En la memoria se presenta como tecnología emergente con adopción superior a otras IA aplicadas en algunos ámbitos de gestión.

**Uso en la memoria.** En empresas del metal puede apoyar redacción de documentación, consulta de manuales, preparación de informes, soporte a oficina técnica, formación interna, análisis documental o asistencia comercial. Su aplicación industrial requiere control sobre fuentes y validación humana.

**Implicación práctica.** No debe confundirse uso individual de herramientas con transformación empresarial. Para aportar valor debe integrarse en procesos, respetar confidencialidad, usar información validada y definir criterios de revisión.

## IloT o Internet Industrial de las Cosas

**Ámbito:** Sensorización y conectividad industrial

**Definición contextual.** Conectividad de máquinas, sensores, dispositivos y activos industriales para capturar datos de funcionamiento, estado, consumo, calidad o proceso. Es la versión industrial del IoT, adaptada a entornos productivos.

**Uso en la memoria.** La memoria lo relaciona con producción conectada, mantenimiento predictivo, sensorización, trazabilidad y visibilidad operativa. En el metal puede medir vibraciones, temperaturas, tiempos, estados de máquina, consumos y parámetros de proceso.

**Implicación práctica.** El IloT aporta valor cuando sus datos se integran en sistemas de decisión. Instalar sensores sin taxonomía, responsables o cuadros de mando puede generar datos no utilizados. La prioridad es vincular medición con acciones concretas.

## Industria 4.0

**Ámbito:** Paradigma industrial y fábrica conectada

**Definición contextual.** Marco de transformación industrial basado en interconexión de máquinas, sistemas, personas y datos mediante tecnologías como IoT, robótica, analítica, cloud, IA, sistemas ciberfísicos y automatización avanzada.

**Uso en la memoria.** La memoria lo utiliza para describir el tránsito hacia fábricas más conectadas, integradas y basadas en datos. Muchas empresas del metal se encuentran en etapas intermedias de este proceso, con automatización o gestión digital, pero con integración incompleta.

**Implicación práctica.** Industria 4.0 no es una etiqueta comercial, sino una forma de operar. Su valor aparece cuando permite tomar mejores decisiones, reducir pérdidas, mejorar calidad, anticipar incidencias y conectar planta con gestión.

## Industria 5.0

**Ámbito:** Futuro industrial, personas y sostenibilidad

**Definición contextual.** Paradigma europeo que amplía la Industria 4.0 incorporando tres pilares: centralidad humana, sostenibilidad y resiliencia. No sustituye necesariamente a la Industria 4.0, sino que la orienta hacia objetivos sociales, ambientales y estratégicos más amplios.

**Uso en la memoria.** La memoria la presenta como horizonte de futuro para el sector metal. Implica que la tecnología debe mejorar productividad, pero también seguridad, ergonomía, cualificación, sostenibilidad, circularidad y capacidad de respuesta ante crisis.

**Implicación práctica.** La competitividad futura dependerá de combinar tecnología con personas, datos con sostenibilidad y eficiencia con resiliencia. La empresa que digitaliza sin cuidar talento, energía y cadena de suministro queda incompleta.

## Integración horizontal y vertical

**Ámbito:** Arquitectura industrial y cadena de valor

**Definición contextual.** La integración vertical conecta niveles internos de la empresa, desde máquina y planta hasta sistemas de gestión y dirección. La integración horizontal conecta áreas, proveedores, clientes y actores de la cadena de valor.

**Uso en la memoria.** En la memoria aparece como fundamento de la Industria 4.0. En el metal, la integración vertical permite relacionar datos de taller con ERP o BI; la horizontal facilita coordinación con compras, logística, clientes y proveedores.

**Implicación práctica.** Ambas son necesarias. La empresa puede estar bien ordenada internamente, pero desconectada de su cadena; o colaborar externamente, pero sin datos internos fiables. El avance debe equilibrar proceso, sistema y ecosistema.

## Inteligencia artificial (IA)

**Ámbito:** Tecnologías avanzadas y decisión

**Definición contextual.** Conjunto de técnicas que permiten a sistemas informáticos realizar tareas asociadas a aprendizaje, reconocimiento de patrones, predicción, clasificación, generación de contenido o apoyo a decisiones.

**Uso en la memoria.** La memoria distingue entre IA aplicada al negocio, IA generativa, IA en control de calidad y agentes autónomos. La adopción en el sector todavía es limitada y desigual, especialmente en comparación con tecnologías de gestión más consolidadas.

**Implicación práctica.** La IA debe introducirse con casos de uso claros y datos adecuados. Antes de implantarla conviene resolver integración, calidad del dato, ciberseguridad y competencias. La sobreventa tecnológica puede generar frustración si no existe base operativa.

## Interoperabilidad

**Ámbito:** Sistemas, datos e integración

**Definición contextual.** Capacidad de distintos sistemas, aplicaciones, equipos o plataformas para intercambiar y utilizar información de forma coherente. Es una condición clave para evitar recapturas, duplicidades y silos.

**Uso en la memoria.** La memoria identifica la baja interoperabilidad y la fragmentación de sistemas como barreras tecnológicas. En empresas del metal se observa cuando ERP, CAD/CAM, hojas de cálculo, máquinas, calidad y almacén no comparten información de forma fluida.

**Implicación práctica.** Mejorar interoperabilidad no exige siempre sustituir todos los sistemas. Puede comenzar con mapas de datos, conectores prioritarios, normalización de maestros y eliminación de intercambios manuales en procesos críticos.

## K

### KPI

**Ámbito:** Medición y control de gestión

**Definición contextual.** Indicador clave de rendimiento. Métrica seleccionada para evaluar el comportamiento de un proceso, área o proyecto frente a un objetivo concreto. En la memoria se asocia a cuadros de mando, gestión digital y madurez del dato.

**Uso en la memoria.** En empresas del metal pueden ser KPIs el cumplimiento de plazo, rechazo, OEE, coste de no calidad, rotación de stock, consumo energético por unidad, margen por pedido o incidencias de proveedor.

**Implicación práctica.** Un KPI debe tener fórmula, fuente, responsable, frecuencia y criterio de uso. Medir demasiados indicadores sin disciplina genera dispersión; medir pocos pero relevantes permite mejorar la conversación de gestión.

## L

### Legacy systems o sistemas heredados

**Ámbito:** Arquitectura tecnológica y deuda digital

**Definición contextual.** Aplicaciones, equipos, bases de datos o soluciones antiguas que siguen siendo críticas para la operación, pero que presentan limitaciones de integración, mantenimiento, seguridad o escalabilidad.

**Uso en la memoria.** La memoria los menciona como parte de la deuda tecnológica y del desafío de interoperabilidad. En el metal pueden ser programas de máquina, aplicaciones específicas, bases locales, versiones antiguas de ERP o desarrollos a medida.

**Implicación práctica.** No siempre deben eliminarse de inmediato. La estrategia adecuada puede combinar mantenimiento controlado, integración parcial, sustitución progresiva o aislamiento por seguridad. Lo importante es conocer su riesgo y dependencia.

## M

### Machine learning

**Ámbito:** IA, predicción y análisis de patrones

**Definición contextual.** Conjunto de técnicas de aprendizaje automático mediante las cuales un sistema identifica patrones en datos y mejora su capacidad de clasificación, predicción o detección sin estar programado mediante reglas fijas para cada caso.

**Uso en la memoria.** En el sector metal puede aplicarse a mantenimiento predictivo, calidad, demanda, consumo energético, detección de anomalías o ajuste de parámetros. La memoria lo incluye dentro de IA analítica y tecnologías avanzadas.

**Implicación práctica.** Requiere datos históricos suficientes, variables relevantes y validación experta. El modelo no sustituye el conocimiento industrial: lo complementa cuando los datos están bien contextualizados y las decisiones se integran en el proceso.

## Madurez digital

**Ámbito:** Diagnóstico y segmentación empresarial

**Definición contextual.** Grado en que una empresa utiliza tecnologías, datos, procesos, organización y cultura digital de forma coherente para mejorar su funcionamiento y competitividad. No se mide solo por tener herramientas, sino por integrarlas y explotárlas.

**Uso en la memoria.** La memoria utiliza un índice sintético para clasificar empresas en niveles como rezago, transición, avanzada o líder. Esta segmentación permite distinguir necesidades y actuaciones por tamaño, subsector y capacidad de ejecución.

**Implicación práctica.** La madurez digital orienta prioridades. Una empresa en fase básica necesita cimientos; una avanzada debe escalar integración, datos e innovación. Aplicar la misma solución a todas las empresas reduce eficacia.

## Mantenimiento basado en condición

**Ámbito:** Mantenimiento industrial y disponibilidad

**Definición contextual.** Estrategia de mantenimiento que programa intervenciones en función del estado real de los equipos, medido mediante inspecciones, señales, sensores o datos de funcionamiento, en lugar de actuar solo por calendario o avería.

**Uso en la memoria.** La memoria lo plantea como paso intermedio o base hacia mantenimiento predictivo. Es especialmente útil en activos críticos del metal: centros de mecanizado, compresores, hornos, líneas, puentes grúa o equipos auxiliares.

**Implicación práctica.** Permite reducir paradas imprevistas y usar mejor los recursos de mantenimiento. Requiere inventario de activos, criticidad, historial de fallos, variables significativas y protocolos claros de intervención.

## Mantenimiento predictivo

**Ámbito:** IoT, datos y mantenimiento avanzado

**Definición contextual.** Uso de datos, sensores, modelos analíticos y conocimiento del modo de fallo para anticipar averías o degradaciones antes de que provoquen paradas o defectos.

**Uso en la memoria.** En la memoria aparece como una oportunidad tecnológica de alto potencial, pero condicionada por la disponibilidad de datos conectados y capacidad de implantación. No es simplemente instalar sensores, sino interpretar señales y actuar a tiempo.

**Implicación práctica.** Su éxito depende de calidad de históricos, variables adecuadas, conocimiento experto y respuesta operativa. Una alerta sin procedimiento de actuación no genera valor. Por ello, debe implantarse sobre activos críticos y con objetivos claros.

## MES

**Ámbito:** Ejecución de producción y planta

**Definición contextual.** Manufacturing Execution System o sistema de ejecución de manufactura. Conecta la planificación con la operación real de planta, registrando órdenes, avances, tiempos, incidencias, consumos, calidad y estados productivos.

**Uso en la memoria.** En la memoria se incluye entre tecnologías de gestión y operación. Para empresas del metal con producción compleja, lotes, rutas, controles y operaciones de taller, el MES puede aportar visibilidad sobre lo que ocurre realmente en planta.

**Implicación práctica.** Su implantación exige procesos definidos y disciplina de uso. Un MES aporta valor cuando reduce partes manuales, mejora trazabilidad, conecta con ERP y convierte el taller en fuente fiable de información.

## Microempresa

**Ámbito:** Segmentación empresarial

**Definición contextual.** Empresa de menos de diez personas empleadas. En la memoria aparece como el segmento con mayores restricciones de recursos, menor digitalización productiva y mayor necesidad de acompañamiento diferenciado.

**Uso en la memoria.** El diagnóstico y la validación cualitativa destacan que muchas microempresas presentan rezago estructural, ausencia de personal especializado, estrategia digital poco definida y dificultades para percibir la digitalización como opción viable.

**Implicación práctica.** Las actuaciones para microempresas deben ser simples, acompañadas, de bajo umbral de entrada y orientadas a cimientos: administración digital, ciberhigiene, copias, herramientas básicas, formación práctica y primeras integraciones.

## Migración a la nube

**Ámbito:** Infraestructura y modernización tecnológica

**Definición contextual.** Proceso de trasladar aplicaciones, datos o servicios desde infraestructura local hacia soluciones cloud. Puede ser total o parcial, y puede afectar a correo, almacenamiento, ERP, copias, colaboración o analítica.

**Uso en la memoria.** La memoria la sitúa como necesidad tecnológica relevante y vinculada a escalabilidad. Para PYMES del metal puede facilitar continuidad, acceso, actualización y reducción de carga técnica interna.

**Implicación práctica.** Debe planificarse con criterios de seguridad, permisos, respaldo, disponibilidad y coste. Migrar sistemas desordenados a la nube no resuelve por sí mismo problemas de datos, procesos o responsabilidades.

## MES

**Ámbito:** Ejecución de producción y planta

**Definición contextual.** Manufacturing Execution System o sistema de ejecución de manufactura. Conecta la planificación con la operación real de planta, registrando órdenes, avances, tiempos, incidencias, consumos, calidad y estados productivos.

**Uso en la memoria.** En la memoria se incluye entre tecnologías de gestión y operación. Para empresas del metal con producción compleja, lotes, rutas, controles y operaciones de taller, el MES puede aportar visibilidad sobre lo que ocurre realmente en planta.

**Implicación práctica.** Su implantación exige procesos definidos y disciplina de uso. Un MES aporta valor cuando reduce partes manuales, mejora trazabilidad, conecta con ERP y convierte el taller en fuente fiable de información.

## Microempresa

**Ámbito:** Segmentación empresarial

**Definición contextual.** Empresa de menos de diez personas empleadas. En la memoria aparece como el segmento con mayores restricciones de recursos, menor digitalización productiva y mayor necesidad de acompañamiento diferenciado.

**Uso en la memoria.** El diagnóstico y la validación cualitativa destacan que muchas microempresas presentan rezago estructural, ausencia de personal especializado, estrategia digital poco definida y dificultades para percibir la digitalización como opción viable.

**Implicación práctica.** Las actuaciones para microempresas deben ser simples, acompañadas, de bajo umbral de entrada y orientadas a cimientos: administración digital, ciberhigiene, copias, herramientas básicas, formación práctica y primeras integraciones.

## Migración a la nube

**Ámbito:** Infraestructura y modernización tecnológica

**Definición contextual.** Proceso de trasladar aplicaciones, datos o servicios desde infraestructura local hacia soluciones cloud. Puede ser total o parcial, y puede afectar a correo, almacenamiento, ERP, copias, colaboración o analítica.

**Uso en la memoria.** La memoria la sitúa como necesidad tecnológica relevante y vinculada a escalabilidad. Para PYMES del metal puede facilitar continuidad, acceso, actualización y reducción de carga técnica interna.

**Implicación práctica.** Debe planificarse con criterios de seguridad, permisos, respaldo, disponibilidad y coste. Migrar sistemas desordenados a la nube no resuelve por sí mismo problemas de datos, procesos o responsabilidades.

## Modelo multidimensional de madurez digital

**Ámbito:** Metodología del estudio

**Definición contextual.** Marco de análisis que evalúa la digitalización desde varias dimensiones complementarias, como estrategia, personas, producción, cadena de suministro, sistemas de información, clientes, innovación y sostenibilidad.

**Uso en la memoria.** La memoria lo utiliza para evitar una lectura reducida de la digitalización como simple adopción de tecnologías. Permite analizar intensidad, integración, capacidades organizativas y diferencia entre sectores y tamaños.

**Implicación práctica.** Su principal utilidad es orientar decisiones. Dos empresas con herramientas similares pueden tener madurez distinta si una integra datos, gobierna procesos y utiliza información para decidir, mientras la otra opera con sistemas aislados.

## Muestra del estudio

**Ámbito:** Metodología y representatividad

**Definición contextual.** Conjunto de empresas y respuestas utilizadas para construir el diagnóstico. En la memoria se describe una muestra nacional segmentada por tamaño, subsector y territorio, complementada con validación cualitativa.

**Uso en la memoria.** La muestra permite analizar patrones agregados de adopción tecnológica, madurez y brechas. Sus resultados deben interpretarse como fotografía sectorial y herramienta de referencia, no como auditoría técnica individual de cada empresa.

**Implicación práctica.** La lectura de la muestra exige prudencia metodológica. Las respuestas autodeclaradas, la variabilidad en conceptos técnicos y la distribución territorial condicionan la interpretación, aunque no invalidan las tendencias principales.

## N

### Nearshoring y reshoring

**Ámbito:** Cadenas de suministro y reindustrialización

**Definición contextual.** Nearshoring es la relocalización de producción o suministro hacia países cercanos; reshoring es el retorno de capacidades productivas al país o región de origen. Ambos conceptos se relacionan con resiliencia y autonomía industrial.

**Uso en la memoria.** La memoria los vincula a perturbaciones geopolíticas, vulnerabilidad de cadenas globales y búsqueda de suministros más controlables. Para el metal, pueden generar oportunidades si las empresas ofrecen calidad, trazabilidad y capacidad de respuesta.

**Implicación práctica.** Aprovechar estas tendencias exige digitalización. Los clientes que relocalizan buscan proveedores fiables, trazables, integrados y capaces de responder con datos, plazos y calidad documentada.

## NZIA

**Ámbito:** Industria verde y política europea

**Definición contextual.** Siglas de Net Zero Industry Act. Marco europeo orientado a impulsar la fabricación de tecnologías de cero emisiones netas dentro de la Unión Europea.

**Uso en la memoria.** La memoria lo vincula al sector metal porque la transición energética demanda acero, aluminio, cobre, componentes, estructuras, maquinaria y equipos asociados a renovables, almacenamiento, movilidad y electrificación.

**Implicación práctica.** El NZIA puede generar oportunidades industriales, pero exige modernización. Las empresas del metal deberán competir en calidad, productividad, sostenibilidad documentada y capacidad de integrarse en cadenas de valor verdes.

## O

### OEE

**Ámbito:** Rendimiento de activos productivos

**Definición contextual.** Overall Equipment Effectiveness o eficiencia global del equipo. Indicador que combina disponibilidad, rendimiento y calidad para medir el aprovechamiento real de un activo productivo.

**Uso en la memoria.** En la memoria aparece asociado a integración OT/IT, trazabilidad y optimización de planta. En el metal puede ayudar a cuantificar paradas, pérdidas de velocidad, rechazos y rendimiento real frente a capacidad teórica.

**Implicación práctica.** El OEE solo es útil si sus componentes se registran con fiabilidad y se analizan por máquina, línea, producto o turno. Un valor agregado sin causas de pérdida no orienta la mejora.

### OT o tecnología operacional

**Ámbito:** Planta, equipos y control industrial

**Definición contextual.** Conjunto de tecnologías que supervisan, controlan o interactúan con procesos físicos industriales: máquinas, PLC, sensores, sistemas de control, líneas y equipos de planta.

**Uso en la memoria.** La memoria utiliza OT en contraste con IT para explicar la convergencia necesaria entre sistemas de planta y sistemas de información. En el metal, OT está presente en automatización, CNC, robótica, sensorización y control de proceso.

**Implicación práctica.** La OT requiere criterios específicos de disponibilidad, seguridad y estabilidad. Integrarla con IT no significa tratarla como una aplicación de oficina, sino proteger la continuidad productiva mientras se habilitan datos e interoperabilidad.

## P

### Perfiles híbridos

**Ámbito:** Talento industrial y digital

**Definición contextual.** Profesionales que combinan conocimiento del proceso industrial con competencias digitales, de datos, automatización o sistemas. No son perfiles puramente informáticos ni únicamente operarios tradicionales.

**Uso en la memoria.** La memoria los identifica como necesidad transversal. Ejemplos son técnicos de mantenimiento con capacidades de datos, responsables de calidad digital, mandos de producción con visión analítica o propietarios de procesos con criterio tecnológico.

**Implicación práctica.** Son esenciales para traducir necesidades de planta a soluciones digitales y evitar dependencia excesiva de proveedores. Su desarrollo exige formación interna, experiencia práctica y reconocimiento organizativo.

## PERTE

**Ámbito:** Política industrial y proyectos tractores

**Definición contextual.** Proyecto Estratégico para la Recuperación y Transformación Económica. Instrumento de colaboración público-privada orientado a movilizar inversiones en cadenas de valor estratégicas.

**Uso en la memoria.** La memoria lo menciona dentro del PRTR y de los programas con impacto en el metal. Los PERTEs pueden actuar como palanca para grandes proyectos de digitalización, descarbonización, movilidad, energía o fabricación avanzada.

**Implicación práctica.** Para que las PYMES del metal se beneficien, deben integrarse en ecosistemas tractores, preparar capacidades de ejecución y cumplir exigencias técnicas, documentales y de colaboración. El proyecto tractor debe arrastrar al tejido proveedor, no concentrar el beneficio en grandes actores.

## PLC

**Ámbito:** Automatización y control industrial

**Definición contextual.** Controlador lógico programable. Equipo utilizado para automatizar secuencias, controlar máquinas y gestionar señales en procesos industriales.

**Uso en la memoria.** La memoria lo menciona en la evolución de la automatización industrial. En el metal, los PLC son habituales en líneas, maquinaria, manipulación, hornos, equipos auxiliares y procesos automatizados.

**Implicación práctica.** Los PLC pueden ser fuente de datos valiosa si se integran adecuadamente. La conexión debe realizarse con criterios de seguridad, estabilidad y mantenimiento, evitando afectar al control de proceso.

## Proyecto tractor

**Ámbito:** Transformación sectorial y colaboración

**Definición contextual.** Iniciativa con capacidad de arrastrar a una cadena de proveedores, clientes o empresas relacionadas hacia una mejora tecnológica, productiva o estratégica común.

**Uso en la memoria.** La memoria lo vincula a masa crítica, colaboración sectorial y papel de grandes empresas en la transformación del ecosistema proveedor. Puede articular digitalización, trazabilidad, sostenibilidad o integración de cadena.

**Implicación práctica.** Un proyecto tractor eficaz debe compartir aprendizajes, estándares y beneficios con PYMES participantes. Si no incorpora acompañamiento y requisitos proporcionados, puede ampliar la brecha entre empresas líderes y proveedores pequeños.

## PRTR

**Ámbito:** Financiación y transformación económica

**Definición contextual.** Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. Marco español vinculado a fondos europeos para impulsar reformas e inversiones en transición digital, ecológica, cohesión y modernización económica.

**Uso en la memoria.** La memoria lo presenta como contexto relevante para la digitalización del sector metal. Ha facilitado programas y recursos, aunque con dificultades de acceso y absorción para PYMES con menor capacidad administrativa.

**Implicación práctica.** El PRTR es oportunidad, pero no solución automática. Las empresas deben traducir convocatorias en proyectos viables, con objetivos, documentación, retorno y capacidad de ejecución. La complejidad administrativa puede ser barrera para las PYMES.

## Pyme industrial

**Ámbito:** Estructura empresarial del sector metal

**Definición contextual.** Pequeña o mediana empresa dedicada a actividad industrial. En el sector metal constituye la mayor parte del tejido empresarial y condiciona la velocidad de adopción tecnológica, inversión, talento y capacidad de gestión del cambio.

**Uso en la memoria.** La memoria insiste en que la digitalización del sector no puede diseñarse solo desde la realidad de grandes empresas. Las PYMES requieren soluciones escalables, acompañamiento y prioridades adaptadas a su capacidad.

**Implicación práctica.** La política de transformación debe segmentar por tamaño. Una pyme puede avanzar mucho si resuelve cimientos, integración básica, formación y datos críticos antes de intentar tecnologías de frontera.

## R

### Realidad aumentada

**Ámbito:** Formación, mantenimiento y asistencia operativa

**Definición contextual.** Tecnología que superpone información digital sobre el entorno físico mediante dispositivos visuales, móviles o gafas. Puede guiar tareas, mostrar instrucciones, asistir mantenimiento o facilitar formación práctica.

**Uso en la memoria.** La memoria la identifica como oportunidad con viabilidad relativamente alta en formación y mantenimiento. En el metal puede apoyar instrucciones de montaje, inspección, reparación, seguridad o transferencia de conocimiento.

**Implicación práctica.** Su valor depende de disponer de procedimientos bien definidos y contenidos fiables. La realidad aumentada no corrige procesos desordenados; los hace más visibles. Por ello debe apoyarse en documentación técnica y formación estructurada.

### Reindustrialización

**Ámbito:** Estrategia industrial y competitividad

**Definición contextual.** Proceso de recuperación, fortalecimiento o modernización de la base industrial de un territorio. En la memoria se enmarca en la estrategia europea y española de reforzar capacidades productivas, autonomía estratégica y cadenas de valor críticas.

**Uso en la memoria.** Para el sector metal, la reindustrialización implica oportunidades en energía, movilidad, defensa, maquinaria, componentes, materiales, reciclaje y tecnologías verdes. También exige aumentar productividad y capacidad tecnológica.

**Implicación práctica.** La digitalización es condición de la reindustrialización. No basta con producir localmente; hay que producir con calidad, trazabilidad, flexibilidad, eficiencia energética y capacidad de integrarse en cadenas de valor exigentes.

### Resiliencia industrial

**Ámbito:** Estrategia, riesgos y continuidad

**Definición contextual.** Capacidad de una empresa o sistema productivo para anticipar perturbaciones, resistir impactos, adaptarse y recuperarse con rapidez. Incluye riesgos de suministro, energía, ciberseguridad, mercado, regulación y talento.

**Uso en la memoria.** La memoria la vincula a Industria 5.0, crisis geopolíticas, cadenas de suministro y necesidad de digitalizar información crítica. Una empresa resiliente conoce dependencias, alternativas, inventarios, capacidades y riesgos.

**Implicación práctica.** La resiliencia se construye con datos, procesos y organización. La digitalización ayuda a anticipar problemas y coordinar respuestas, pero requiere planes, responsables y decisiones preventivas.

## Roadmap de transformación digital

**Ámbito:** Planificación estratégica

**Definición contextual.** Hoja de ruta temporal que ordena prioridades, fases, proyectos y objetivos de transformación digital. En la memoria se plantea para el horizonte 2025-2030 y se estructura en fases progresivas.

**Uso en la memoria.** El roadmap permite pasar del diagnóstico a la acción: cimientos digitales, conectividad, visibilidad operativa, inteligencia analítica, automatización avanzada y tecnologías de frontera.

**Implicación práctica.** Debe adaptarse al punto de partida de cada empresa. Un roadmap útil evita saltos prematuros, asigna responsables, vincula proyectos a negocio y establece indicadores para verificar avance real.

## Robótica industrial

**Ámbito:** Producción avanzada y automatización

**Definición contextual.** Uso de robots para realizar tareas productivas como manipulación, soldadura, paletizado, carga de máquinas, ensamblaje, corte, pintura o inspección. En el metal es una tecnología con larga trayectoria y potencial de mejora.

**Uso en la memoria.** La memoria la integra en producción avanzada y automatización. Su presencia no implica necesariamente madurez digital si los robots no están conectados con datos de producción, calidad o mantenimiento.

**Implicación práctica.** La robótica debe evaluarse por retorno operativo, seguridad, estabilidad y capacidad de integración. Su mayor valor aparece cuando se combina con trazabilidad, sensorización y análisis de rendimiento.

## RPA

**Ámbito:** Automatización de procesos administrativos

**Definición contextual.** Robotic Process Automation. Tecnología que automatiza tareas repetitivas de oficina basadas en reglas, como copiar datos, generar documentos, consultar sistemas o completar formularios.

**Uso en la memoria.** La memoria la incluye entre oportunidades tecnológicas. En empresas del metal puede aplicarse a administración, compras, finanzas, gestión documental, pedidos, informes o conciliaciones, especialmente donde existen tareas manuales recurrentes.

**Implicación práctica.** La RPA es útil para procesos estables y bien definidos. Si se automatiza un proceso desordenado, se aceleran errores. Antes conviene revisar flujo, reglas, excepciones y fuentes de datos.

## S

### Servitización

**Ámbito:** Modelo de negocio y ciclo de vida

**Definición contextual.** Evolución desde la venta de producto hacia la oferta de servicios asociados, como mantenimiento, monitorización, disponibilidad, asesoramiento, actualización o pago por uso.

**Uso en la memoria.** La memoria la vincula a maquinaria y equipo, nuevos modelos de negocio y economía circular. En el metal puede implicar vender equipos conectados, servicios posventa digitales o soluciones basadas en rendimiento.

**Implicación práctica.** Requiere datos de uso, conectividad, soporte técnico, contratos, indicadores de servicio y capacidad de atención continua. La servitización convierte el producto en una relación de largo plazo con el cliente.

### Silos de información

**Ámbito:** Organización, sistemas e integración

**Definición contextual.** Situación en la que datos y conocimiento permanecen aislados en departamentos, aplicaciones, personas o archivos, sin fluir de forma coherente por la organización.

**Uso en la memoria.** La memoria identifica los silos como una de las limitaciones recurrentes: hojas de cálculo paralelas, datos duplicados, sistemas sin conexión y decisiones basadas en información parcial. **Implicación práctica.** Romper silos exige procesos transversales, integración de sistemas, gobierno del dato y colaboración entre áreas. No es solo un problema técnico; también es cultural y organizativo.

### Sistemas ciberfísicos

**Ámbito:** Industria 4.0 y automatización avanzada

**Definición contextual.** Sistemas que integran componentes físicos, sensores, software, conectividad y capacidad de control o decisión. Representan la conexión entre mundo físico industrial y mundo digital. **Uso en la memoria.** La memoria los menciona como base conceptual de la Industria 4.0. En el metal pueden materializarse en máquinas conectadas, células automatizadas, líneas monitorizadas o procesos que ajustan su comportamiento a partir de datos.

**Implicación práctica.** Su desarrollo exige integración, seguridad, fiabilidad y comprensión del proceso. No basta con conectar equipos; hay que garantizar que la información generada mejora control, calidad y decisión.

## Smart factory o fábrica inteligente

**Ámbito:** Modelo de planta digital

**Definición contextual.** Entorno productivo en el que máquinas, sistemas, personas y datos están conectados para mejorar planificación, ejecución, control, calidad, mantenimiento y capacidad de adaptación.

**Uso en la memoria.** La memoria utiliza el concepto como resultado de la convergencia de tecnologías habilitadoras de Industria 4.0. Para el metal, no implica una fábrica totalmente autónoma, sino una planta con visibilidad y capacidad de aprendizaje.

**Implicación práctica.** La smart factory se construye por etapas. Primero se ordena la base, después se conectan procesos críticos y finalmente se incorporan analítica, automatización avanzada e IA donde aporten valor verificable.

## Soberanía del dato

**Ámbito:** Datos, control y colaboración

**Definición contextual.** Capacidad de una organización para controlar sus datos, decidir cómo se usan, con quién se comparten, bajo qué condiciones y con qué garantías de seguridad, trazabilidad y cumplimiento.

**Uso en la memoria.** La memoria la vincula a espacios de datos industriales, colaboración sectorial y nuevas arquitecturas digitales. En cadenas de valor del metal, compartir información será cada vez más importante, pero también más sensible.

**Implicación práctica.** La empresa debe conocer qué datos posee, cuáles son críticos y cómo protegerlos. La soberanía del dato no impide colaborar; permite hacerlo con reglas claras y confianza.

## Sostenibilidad industrial

**Ámbito:** Industria 5.0, energía y medio ambiente

**Definición contextual.** Capacidad de producir bienes industriales reduciendo impacto ambiental, consumo de recursos, emisiones, residuos y vulnerabilidad energética, sin perder competitividad ni continuidad operativa.

**Uso en la memoria.** La memoria la integra con digitalización, eficiencia energética, economía circular, trazabilidad, acero verde y regulación europea. No se trata de un capítulo separado, sino de una dimensión transversal de competitividad.

**Implicación práctica.** La sostenibilidad industrial necesita datos. Medir consumos, mermas, materiales, lotes y emisiones permite actuar. Sin medición, la sostenibilidad queda en declaración de intenciones.

## T

### Trazabilidad digital

**Ámbito:** Calidad, cadena de suministro y sostenibilidad

**Definición contextual.** Capacidad de registrar y seguir digitalmente materiales, lotes, operaciones, controles, incidencias y documentación a lo largo del proceso productivo y de la cadena de suministro. Uso en la memoria. La memoria la identifica como una de las palancas principales para calidad, economía circular, cumplimiento, sostenibilidad y respuesta ante reclamaciones. En el metal afecta a certificados, materiales, tratamientos, piezas y expediciones.

**Implicación práctica.** La trazabilidad debe ser continua y fiable. Si se rompe entre almacén, taller, calidad o expedición, pierde utilidad. Su implantación empieza por codificación, registros disciplinados y conexión de sistemas.

## U

### Upskilling y reskilling

**Ámbito:** Formación, talento y adaptación profesional

**Definición contextual.** Upskilling es la mejora de competencias dentro del puesto o área actual; reskilling es la recualificación para desempeñar funciones nuevas. Ambos conceptos aparecen vinculados a transformación digital y brecha de habilidades.

**Uso en la memoria.** En el sector metal son necesarios para adaptar perfiles técnicos, operarios, mandos y personal de gestión a herramientas digitales, datos, automatización, ciberseguridad y nuevos procesos.

**Implicación práctica.** La formación debe ser práctica, continua y conectada con proyectos reales. No basta con cursos genéricos; la plantilla debe ver cómo las nuevas competencias mejoran su trabajo y la competitividad de la empresa.

## V

### Visibilidad operativa

**Ámbito:** Producción, datos y gestión diaria

**Definición contextual.** Capacidad de conocer con suficiente precisión y oportunidad lo que ocurre en la operación: estados de máquina, avance de órdenes, paradas, incidencias, consumos, calidad, carga y cumplimiento de planificación.

**Uso en la memoria.** La memoria la presenta como una necesidad antes de abordar analítica compleja. Muchas empresas del metal tienen actividad productiva intensa, pero carecen de información en tiempo real o fiable para decidir.

**Implicación práctica.** La visibilidad operativa reduce dependencia de llamadas, partes manuales y experiencia individual. Permite gestionar por hechos, detectar desviaciones y priorizar acciones de mejora con rapidez.

## Visión artificial

**Ámbito:** Calidad, inspección y automatización

**Definición contextual.** Tecnología que utiliza cámaras, iluminación, algoritmos y sistemas de procesamiento de imagen para inspeccionar, medir, clasificar o detectar defectos en productos y procesos.

**Uso en la memoria.** En la memoria aparece como tecnología avanzada vinculada a control de calidad automatizado. En el metal puede aplicarse a superficies, geometrías, presencia de componentes, soldaduras, marcas, defectos o verificación dimensional.

**Implicación práctica.** Su eficacia depende de condiciones de proceso, iluminación, variabilidad del producto, criterios de aceptación y datos de entrenamiento. Debe conectarse con calidad y producción para que las detecciones generen aprendizaje y acción.

## Z

### Zero Trust

**Ámbito:** Ciberseguridad y arquitectura de acceso

**Definición contextual.** Modelo de seguridad basado en no confiar por defecto en ningún usuario, dispositivo o sistema, aunque esté dentro de la red corporativa. Exige verificación continua, mínimos privilegios y control granular de accesos.

**Uso en la memoria.** La memoria lo menciona dentro de arquitecturas futuras de ciberseguridad industrial. Su aplicación cobra importancia cuando crecen cloud, trabajo remoto, integración IT/OT, proveedores conectados y datos compartidos.

**Implicación práctica.** En PYMES puede traducirse inicialmente en medidas simples: autenticación robusta, revisión de permisos, segmentación, registro de accesos y eliminación de cuentas innecesarias. La filosofía es limitar daños y reducir exposición.

## ANEXO 2: RESUMEN DE FUENTES CONSULTADAS PARA LA EJECUCIÓN DEL DOCUMENTO.

### 2.1 FUENTES INSTITUCIONALES, GUBERNAMENTALES Y ESTADÍSTICAS ESPAÑOLAS

#### Programa Kit Digital (Red.es)

**URL:** <https://www.aceleradorpymes.gob.es/>

**Tipo de fuente:** Sitio web oficial gubernamental

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** Portal oficial del Programa Kit Digital, iniciativa del Gobierno de España gestionada por Red.es para impulsar la digitalización de pequeñas y medianas empresas españolas. El programa ofrece bonos digitales para la adopción de soluciones de digitalización en áreas estratégicas.

**Aplicación en el informe:** Esta fuente se utilizó principalmente en el Resumen Ejecutivo para contextualizar el esfuerzo institucional hacia la digitalización empresarial, en la sección de Marco Normativo para explicar los instrumentos de apoyo disponibles, y como referencia para las recomendaciones estratégicas sobre financiación de proyectos de transformación digital.

#### Estrategia Digital Spain 2026 (Ministerio de Asuntos Económicos)

**URL:** <https://portal.mineco.gob.es/>

**Tipo de fuente:** Sitio web oficial gubernamental

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** Portal del Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital que alberga la Estrategia Digital Spain 2026, marco de referencia para la transformación digital de España. Incluye información sobre políticas públicas, fondos europeos y líneas de actuación ministerial.

**Aplicación en el informe:** Se utilizó para contextualizar el entorno institucional de la transformación digital, establecer el marco de referencia nacional y conectar las iniciativas empresariales con la estrategia país.

#### Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia

**URL:** <https://planderecuperacion.gob.es/>

**Tipo de fuente:** Sitio web oficial gubernamental

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** Documento oficial del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia de España, que establece las reformas e inversiones financiadas con fondos europeos Next Generation EU. Incluye específicamente reformas orientadas a la transformación digital de la industria manufacturera.

**Aplicación en el informe:** Se empleó en la sección de Marco Normativo para explicar las oportunidades de financiación disponibles para la transformación digital del sector metal, y como argumento para recomendar a las empresas aprovechar estos fondos.

### Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM)

**URL:** [https://www.oepm.es/es/propiedad\\_industrial/enlaces\\_de\\_interes/centros\\_regionales\\_informacion\\_propiedad\\_industrial/index.html](https://www.oepm.es/es/propiedad_industrial/enlaces_de_interes/centros_regionales_informacion_propiedad_industrial/index.html)

**Tipo de fuente:** Sitio web oficial gubernamental

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** Portal de la OEPM con información sobre servicios de propiedad industrial e intelectual, incluyendo enlaces a Centros Regionales de Información en Propiedad Industrial y Comercial.

**Aplicación en el informe:** Esta fuente se mencionó en los diagnósticos empresariales como recurso para empresas que requieren trámites de registro industrial.

### Portal de Contratación del Estado

**URL:** <https://contrataciondelestado.es/>

**Tipo de fuente:** Sitio web oficial gubernamental

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** Plataforma de contratación pública que permite la gestión de licitaciones y contrataciones con la Administración Pública española.

**Aplicación en el informe:** Se incluyó como referencia en los diagnósticos de las empresas analizadas sobre herramientas digitales para la gestión comercial y acceso a mercados públicos.

### Registro de Licitadores

**URL:** <https://registrodelicitadores.gob.es/>

**Tipo de fuente:** Sitio web oficial gubernamental

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** Registro administrativo de empresas licitadoras en España, que facilita la participación en procedimientos de contratación pública.

**Aplicación en el informe:** Complemento al portal de contratación pública como herramienta para la gestión de licitaciones.

### CONFEMETAL (2026). Metal en Cifras – Enero 2026

**URL:** <https://www.confemetal.es>

**Tipo de fuente:** Sitio web oficial de organización empresarial sectorial

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** CONFEMETAL (Confederación Española de Organizaciones Empresariales del Metal) es la organización empresarial de referencia del sector metal en España, representativa a nivel estatal. Publica mensualmente el boletín “Metal en Cifras” con datos actualizados del sector, incluyendo indicadores de facturación, empleo, inversión y tendencias.

**Aplicación en el informe:** Esta fuente proporciona el contexto macroeconómico del sector metal español, permitiendo comparar los niveles de digitalización de las empresas diagnosticadas con el tamaño y desempeño general del sector. Los datos de empleo y facturación contextualizan el entorno operativo de las empresas.

### Ministerio de Industria y Turismo (2025). Fichas Sectoriales de la Industria Española 2024-2025

**URL:** <https://www.mincotur.gob.es>

**Tipo de fuente:** Sitio web oficial gubernamental

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** El Ministerio de Industria y Turismo publica las Fichas Sectoriales de la Industria Española, documentos que proporcionan datos estructurados sobre la situación, tendencias y políticas de cada sector industrial. La Secretaría General de Industria y de la Pequeña y Mediana Empresa es la responsable de la elaboración de estos documentos.

**Aplicación en el informe:** Las fichas sectoriales complementan el análisis de madurez digital del sector metal con datos oficiales sobre el posicionamiento de la industria española, facilitando comparativas sectoriales y la identificación de políticas de apoyo aplicables.

### INE – Instituto Nacional de Estadística (2025). Índice de Producción Industrial

**URL:** <https://www.ine.es>

**Tipo de fuente:** Base de datos estadísticos oficial

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** El INE proporciona estadísticas oficiales sobre la producción industrial española, incluyendo el Índice de Producción Industrial (IPI), serie IPIMET, y la Encuesta Estructural de Empresas del Sector Industrial (EEESI). Los datos incluyen tasas de variación, índices de cifra de negocios y evolución de precios.

**Aplicación en el informe:** Los datos del INE proporcionan indicadores macroeconómicos que contextualizan la situación del sector metal dentro del marco industrial español, permitiendo evaluar el entorno en que operan las empresas diagnosticadas.

### **INE - Instituto Nacional de Estadística (2024). Estadística Estructural de Empresas: Sector Industrial (EEESI) 2023**

**URL:** <https://www.ine.es>

**Tipo de fuente:** Estadísticas estructurales oficiales

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** La Encuesta Estructural de Empresas del Sector Industrial (EEESI) proporciona información detallada sobre la estructura, actividad y características de las empresas industriales españolas, incluyendo datos de empleo, inversión, facturación y tecnología.

**Aplicación en el informe:** Esta fuente complementa los datos de producción industrial con información estructural sobre las empresas del sector, permitiendo contextualizar los niveles de digitalización detectados en las PYMES metalúrgicas.

### **UNESID - Unión de Empresas Siderúrgicas (2025). La industria siderúrgica española 2024**

**URL:** <https://www.unesid.org>

**Tipo de fuente:** Sitio web de asociación sectorial

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** UNESID representa a la industria siderúrgica española y publica datos anuales sobre producción, empleo, inversión y tendencias del sector. La asociación incluye información sobre las 22 plantas siderúrgicas y las 50 instalaciones de laminación y primera transformación.

**Aplicación en el informe:** Como subsector del metal, la siderurgia proporciona un referente de madurez industrial y adopción tecnológica que permite contextualizar los niveles de digitalización detectados en empresas del sector metal.

## **2.2 FUENTES EUROPEAS, INTERNACIONALES Y ESTADÍSTICAS COMPARADAS**

### **Eurostat - Estadísticas de Competencias Digitales**

**URL:** <https://ec.europa.eu/eurostat/>

**Tipo de fuente:** Base de datos estadísticos oficial europeo

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** Oficina de Estadística de la Unión Europea que proporciona datos comparables sobre competencias digitales, digitalización empresarial y adopción tecnológica en los Estados miembros.

**Aplicación en el informe:** Se utilizó en la sección de Competitividad Digital para contextualizar el nivel de competencias digitales en España respecto a la media europea, y como referencia para identificar la brecha de talento digital en el sector metal.

### World Digital Competitiveness Ranking 2024 (IMD)

**URL:** <https://www.imd.org/>

**Tipo de fuente:** Ranking internacional de competitividad

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** Ranking anual elaborado por el IMD (Institute for Management Development) de Suiza que evalúa la capacidad de los países para adoptar y explorar tecnologías digitales en su transformación económica y social.

**Aplicación en el informe:** Se empleó en la sección de Posicionamiento Internacional para mostrar la evolución de España en digitalización y como referencia para evaluar la competitividad del sector metal español.

### UNCTAD - Informe de Economía Digital

**URL:** <https://unctad.org/>

**Tipo de fuente:** Informe internacional de Naciones Unidas

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** United Nations Conference on Trade and Development (Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo) que publica análisis sobre la economía digital global, incluyendo adopción tecnológica en países en desarrollo y desarrollados.

**Aplicación en el informe:** Se consultó para contextualizar la transformación digital del sector metal español en el marco de la economía digital global.

### Eurostat (2025). Industrial Production Statistics 2024

**URL:** <https://ec.europa.eu/eurostat>

**Tipo de fuente:** Base de datos estadísticos oficial europeo

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** Eurostat es la oficina de estadística de la Unión Europea, proporcionando datos comparables sobre producción industrial, participación del sector manufacturing en PIB, y tendencias de digitalización. Los datos abarcan todos los Estados miembros y permiten comparativas sectoriales.

**Aplicación en el informe:** Eurostat proporciona el marco comparativo europeo para evaluar la posición del sector metal español en términos de digitalización, inversión industrial y adopción tecnológica respecto a la media de la Unión Europea.

### **Eurostat (2024). Manufacturing Statistics – Industry Share of GDP**

**URL:** <https://ec.europa.eu/eurostat>

**Tipo de fuente:** Estadísticas de participación sectorial

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** Estadísticas sobre la participación del sector manufacturing en el PIB europeo, incluyendo datos por países y sectores. Permite evaluar la importancia relativa de la industria manufacturera en la economía europea.

**Aplicación en el informe:** Estos datos contextualizan la importancia del sector metal dentro del tejido industrial europeo, permitiendo comparativas de digitalización con otros países del entorno.

### **EUROFER – European Steel Association (2025). Economic and Steel Market Outlook 2025-2026**

**URL:** <https://www.eurofer.eu>

**Tipo de fuente:** Estudio sectorial europeo

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** El Steel Market Outlook de EUROFER proporciona análisis del mercado siderúrgico europeo, incluyendo proyecciones de demanda, capacidad instalada, precios y tendencias de comercio. El Q4 2025 Update incluye perspectivas para 2025-2026.

**Aplicación en el informe:** Como subsector importante del metal, el acero europeo proporciona contexto sobre las tendencias del mercado que afectan a las empresas del sector metal español, especialmente aquellas orientadas a la exportación.

### **Capgemini Research Institute (2025). Reshoring and Nearshoring Trends in European Manufacturing**

**URL:** <https://www.capgemini.com>

**Tipo de fuente:** Estudio de mercado de consultores

**Fiabilidad:** Media

**Descripción del contenido:** Análisis de las tendencias de reubicación (reshoring) y proximidad (nearshoring) en el manufacturing europeo, incluyendo factores que impulsan la relocalización de cadenas de suministro y el impacto en la industria.

**Aplicación en el informe:** Este estudio proporciona contexto sobre las dinámicas de localización que pueden beneficiar al sector metal español en un entorno de reindustrialización europea.

## 2.3 FUENTES DE ESTUDIOS DE MERCADO, SECTORIALES Y TECNOLOGÍA

### Informe Industria 4.0 España (Forética)

**URL:** <https://foretica.org/>

**Tipo de fuente:** Estudio sectorial de organización especializada

**Fiabilidad:** Media-Alta

**Descripción del contenido:** Informe elaborado por Forética sobre el estado de la digitalización del sector industrial español, incluyendo análisis de adopción de tecnologías 4.0 y tendencias emergentes.

**Aplicación en el informe:** Se utilizó extensivamente en las secciones de Análisis de Madurez Digital para establecer comparativas entre el sector metal y el conjunto de la industria española, identificando brechas y áreas de oportunidad.

### Industry 5.0 Market Report (MarketsandMarkets)

**URL:** <https://www.marketsandmarkets.com/>

**Tipo de fuente:** Informe de mercado comercial

**Fiabilidad:** Media

**Descripción del contenido:** Estudio de mercado sobre la industria 5.0 global, con proyecciones de crecimiento, análisis de segmentos y principales actores del mercado.

**Aplicación en el informe:** Se empleó en la sección de Marco Contextual para justificar la transición hacia la Industria 5.0, proporcionando datos de mercado que respaldan la urgencia de la transformación digital.

### European Digital Innovation Platforms

**URL:** <https://european-new-car-market.eu/>

**Tipo de fuente:** Plataforma de innovación digital europea

**Fiabilidad:** Media

**Descripción del contenido:** Plataforma europea de innovación digital para la industria, con información sobre redes de ecosistemas digitales y adopción de tecnologías emergentes.

**Aplicación en el informe:** Se consultó como referencia para identificar plataformas de apoyo a la transformación digital disponibles para el sector metal español.

## VIII Informe Smart Industry 4.0 – Observatorio de Industria y Tecnología (2025)

**URL:** <https://observatorioindustria.org/wp-content/uploads/2025/12/VIII-INFORME-SMART-INDUSTRY-40.pdf>

**Tipo de fuente:** Estudio sectorial

**Fiabilidad:** Media-Alta

**Descripción del contenido:** El VIII Informe Smart Industry 4.0, presentado en diciembre de 2025, analiza la adopción de tecnologías clave en la industria española. En 2025, el Observatorio y Structurit fusionaron sus líneas de trabajo para construir una visión unificada del ecosistema industrial español.

**Aplicación en el informe:** Este informe proporciona datos comparativos sobre el nivel de digitalización de la industria española que permiten evaluar la posición del sector metal respecto al conjunto del tejido industrial, identificando brechas y áreas de oportunidad específicas.

## 2.4 FUENTES DE BASES DE DATOS DE OCUPACIONES Y COMPETENCIAS

### O\*NET Skills and Occupations Database

**URL:** <https://www.onetcenter.org/>

**Tipo de fuente:** Base de datos oficial del Departamento de Trabajo de EE.UU.

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** Base de datos completa de habilidades, ocupaciones y requisitos del mercado laboral estadounidense, ampliamente utilizada como referencia internacional para el análisis de competencias profesionales.

**Aplicación en el informe:** Se utilizó como referencia para la clasificación de perfiles profesionales digitales necesarios en el sector metal, especialmente en la sección de Desafíos relacionada con la brecha de talento.

## 2.5 FUENTES DE INDUSTRIA 4.0 E INDUSTRY 5.0

**Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J. (2013). Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0**

**URL:** <https://www.acatech.de>

**Tipo de fuente:** Marco conceptual fundacional

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** El informe de Acatech (Academia Nacional de Ciencia e Ingeniería de Alemania) establece las recomendaciones estratégicas para la implementación de Industrie 4.0, siendo el documento fundacional del concepto presentado en la Hannover Messe 2013.

**Aplicación en el informe:** Este documento proporciona el marco conceptual fundacional para comprender la transformación hacia la Industria 4.0, permitiendo contextualizar los niveles de digitalización detectados en las empresas diagnosticadas respecto al estándar de referencia internacional.

### **European Commission – DG Research and Innovation (2021). Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry**

**URL:** [https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50\\_en](https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en)

**Tipo de fuente:** Documento de política europea

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** El informe “Industry 5.0” de la Comisión Europea complementa el paradigma de Industrie 4.0 introduciendo la sostenibilidad, la centralidad humana y la resiliencia como drivers de la transición industrial. Representa la visión europea de la próxima generación industrial.

**Aplicación en el informe:** El paradigma Industry 5.0 proporciona el marco estratégico hacia el que deben evolucionar las empresas del sector metal, complementando la eficiencia tecnológica con sostenibilidad, bienestar laboral y responsabilidad social.

### **Comisión Europea (2021). Clean Steel Partnership – Strategic Research and Innovation Agenda (SRIA)**

**URL:** <https://www.clean-steel-partnership.eu>

**Tipo de fuente:** Agenda de I+D europea

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** El Clean Steel Partnership establece la agenda de investigación e innovación para la descarbonización de la industria siderúrgica europea, en el marco del programa Horizon Europe. Define los technological pathways y las inversiones necesarias para lograr la neutralidad climática.

**Aplicación en el informe:** Las conclusiones del Clean Steel Partnership aplican directamente al sector metal español, proporcionando casos de uso de digitalización para la gestión ambiental y el cumplimiento normativo en un contexto de descarbonización.

### **Comisión Europea (2021). Updating the 2020 New Industrial Strategy (COM(2021) 350 final)**

**URL:** <https://eur-lex.europa.eu>

**Tipo de fuente:** Documento estratégico europeo

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** La actualización de la Nueva Estrategia Industrial de 2020 aborda la recuperación post-pandemia y la construcción de un Mercado Único más fuerte para Europa. Establece prioridades para la transición verde y digital.

**Aplicación en el informe:** Esta estrategia proporciona el marco político europeo para la reindustrialización, contextualizando las oportunidades de digitalización del sector metal dentro de las prioridades de la UE.

## 2.6 MARCO NORMATIVO, FINANCIACIÓN Y PROGRAMAS PÚBLICOS

### Portal de Factura Electrónica (Hacienda)

**URL:** <http://www.hacienda.gob.es/es-ES/Servicios/Paginas/Facturaelectronica.aspx>

**Tipo de fuente:** Sitio web oficial gubernamental

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** Portal de la Agencia Tributaria española sobre facturación electrónica, incluyendo normativa vigente y procedimientos de adaptación.

**Aplicación en el informe:** Se mencionó en los diagnósticos empresariales como ejemplo de requisito normativo que impulsa la digitalización empresarial.

### Comisión Europea (2023). Reglamento (UE) 2023/956 – CBAM

**URL:** <https://eur-lex.europa.eu>

**Tipo de fuente:** Normativa europea

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** El Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono (CBAM - Carbon Border Adjustment Mechanism) establece un sistema para evitar la fuga de carbono, requiriendo la declaración de emisiones embebidas en importaciones de ciertos productos. Es parte del European Green Deal.

**Aplicación en el informe:** El CBAM representa un factor contextual importante para el sector metal, ya que afecta directamente a la competitividad de empresas que trabajan con acero y aluminio, incentivando la digitalización para la gestión de emisiones y la mejora de eficiencia.

### Comisión Europea (2024). Reglamento (UE) 2024/1252 – Critical Raw Materials Act

**URL:** <https://eur-lex.europa.eu>

**Tipo de fuente:** Normativa europea

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** El Reglamento establece un marco para garantizar un suministro seguro y sostenible de materias primas fundamentales, identificando materiales críticos para la transición ecológica e industrial. Define objetivos ambiciosos de producción y procesamiento doméstico.

**Aplicación en el informe:** La CRMA proporciona el contexto regulatorio europeo que afecta a las cadenas de suministro del sector metal, incentivando la digitalización para garantizar trazabilidad y sostenibilidad en el aprovisionamiento de materias primas.

### Comisión Europea (2026). Propuesta de Industrial Accelerator Act (COM(2026) 100 final)

**URL:** <https://eur-lex.europa.eu>

**Tipo de fuente:** Propuesta normativa europea

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** La propuesta de Industrial Accelerator Act, presentada el 4 de marzo de 2026, forma parte de las iniciativas europeas para fortalecer la base industrial de Europa frente a competencias globales. Establece medidas para acelerar la transición industrial y garantizar cadenas de suministro estratégicas.

**Aplicación en el informe:** Esta propuesta normativa proporciona el horizonte legislativo europeo que afectaría al sector metal, incentivando la digitalización para garantizar trazabilidad, eficiencia y sostenibilidad en las cadenas de suministro.

### SEPIDES – Sociedad Estatal de Participaciones Industriales (2025). Manual de Gestión del FAIIP

**URL:** <https://www.sepides.es>

**Tipo de fuente:** Manual de financiación pública

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** El FAIIP (Fondo de Apoyo a la Inversión Industrial Productiva) proporciona financiación para proyectos industriales que contribuyan a la reindustrialización de España. El manual de gestión actualizado en octubre 2025 establece los criterios de elegibilidad y el proceso de solicitud.

**Aplicación en el informe:** El FAIIP representa una fuente de financiación relevante para las empresas del sector metal que requieran inversión para sus proyectos de transformación digital, complementando las ayudas del Kit Digital.

### Ministerio de Industria y Turismo (2025). PERTEs: estado de convocatorias y resoluciones

**URL:** <https://www.mincotur.gob.es>

**Tipo de fuente:** Portal de programas públicos

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** Los PERTEs (Proyectos Estratégicos para la Recuperación y Transformación Económica) canalizan inversiones públicas para sectores estratégicos de la economía española. El Ministerio publica regularmente el estado de convocatorias y resoluciones de los diferentes PERTEs.

**Aplicación en el informe:** Los PERTEs proporcionan oportunidades de financiación específica para proyectos de digitalización e inversión industrial en el sector metal, particularmente aquellos relacionados con sostenibilidad y transición ecológica.

### Gobierno de España (2023). Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia – Adenda 2023

**URL:** <https://www.planderecuperacion.gob.es>

**Tipo de fuente:** Documento de financiación europea

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** La Adenda 2023 al Plan de Recuperación amplió las inversiones disponibles con fondos adicionales, incrementando la capacidad de financiación para la transformación digital industrial. Incluye nuevas inversiones y modificaciones a programas existentes.

**Aplicación en el informe:** La Adenda 2023 incrementa las oportunidades de financiación para proyectos de digitalización del sector metal, proporcionando recursos adicionales para la adopción de tecnologías 4.0 e Industry 5.0.

### CEOE – Confederación Española de Organizaciones Empresariales (2025). VII Informe de Seguimiento de los Fondos Europeos

**URL:** <https://www.ceoe.es>

**Tipo de fuente:** Informe de seguimiento

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** El informe de CEOE proporciona análisis del estado de ejecución de los fondos europeos Next GenerationEU y su impacto en el tejido empresarial español. Incluye recomendaciones para mejorar la gestión y absorción de fondos.

**Aplicación en el informe:** El informe de CEOE proporciona contexto sobre el estado de absorción de fondos europeos que pueden beneficiar a la digitalización del sector metal, identificando posibles barreras y oportunidades de mejora.

### Ministerio de Industria y Turismo (2024). Proyecto de Ley de Industria y Autonomía Estratégica

**URL:** <https://www.congreso.es>

**Tipo de fuente:** Proyecto de ley nacional

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** El Proyecto de Ley de Industria y Autonomía Estratégica, publicado en BOCG (15-A-43-1, diciembre 2024), establece el marco regulatorio para fortalecer la autonomía estratégica industrial de España. Incluye medidas para la digitalización industrial y la sostenibilidad.

**Aplicación en el informe:** Este proyecto de ley proporcionará el marco regulatorio nacional que afecte a las empresas del sector metal, estableciendo obligaciones y oportunidades para la transformación digital.

### Gobierno de España (2023). Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia – Adenda 2023

**URL:** <https://www.planderecuperacion.gob.es>

**Tipo de fuente:** Documento de financiación europea

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** La Adenda 2023 al Plan de Recuperación amplió las inversiones disponibles con fondos adicionales, incrementando la capacidad de financiación para la transformación digital industrial. Incluye nuevas inversiones y modificaciones a programas existentes.

**Aplicación en el informe:** La Adenda 2023 incrementa las oportunidades de financiación para proyectos de digitalización del sector metal, proporcionando recursos adicionales para la adopción de tecnologías 4.0 e Industry 5.0.

### CEOE – Confederación Española de Organizaciones Empresariales (2025). VII Informe de Seguimiento de los Fondos Europeos

**URL:** <https://www.ceoe.es>

**Tipo de fuente:** Informe de seguimiento

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** El informe de CEOE proporciona análisis del estado de ejecución de los fondos europeos Next GenerationEU y su impacto en el tejido empresarial español. Incluye recomendaciones para mejorar la gestión y absorción de fondos.

**Aplicación en el informe:** El informe de CEOE proporciona contexto sobre el estado de absorción de fondos europeos que pueden beneficiar a la digitalización del sector metal, identificando posibles barreras y oportunidades de mejora.

### Ministerio de Industria y Turismo (2024). Proyecto de Ley de Industria y Autonomía Estratégica

**URL:** <https://www.congreso.es>

**Tipo de fuente:** Proyecto de ley nacional

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** El Proyecto de Ley de Industria y Autonomía Estratégica, publicado en BOCG (15-A-43-1, diciembre 2024), establece el marco regulatorio para fortalecer la autonomía estratégica industrial de España. Incluye medidas para la digitalización industrial y la sostenibilidad.

**Aplicación en el informe:** Este proyecto de ley proporcionará el marco regulatorio nacional que afecte a las empresas del sector metal, estableciendo obligaciones y oportunidades para la transformación digital.

### **H2Med / BarMar Project documentation**

**URL:** <https://www.mincotur.gob.es>

**Tipo de fuente:** Proyecto de infraestructura

**Fiabilidad:** Alta

**Descripción del contenido:** El proyecto H2Med (BarMar) es una infraestructura estratégica de transporte de hidrógeno verde entre España y Francia, coordinada a nivel europeo. Representa una inversión estratégica en infraestructura energética que beneficia a la industria.

**Aplicación en el informe:** El proyecto H2Med proporciona contexto sobre las oportunidades de inversión en infraestructura que pueden beneficiar al sector metal, especialmente en fabricación de componentes para infraestructura energética.



**confemetal**  
Industria, Tecnologías, Comercio y Servicios

**UGT**   
Industria,  
Construcción  
y Agro **FICA**

**CCOO**  
**industria**