

SAIN4

Sistemas Avanzados de eficiencia productiva para la Industria 4.0

PROGRAMA: PROYECTOS DE I+D EN COLABORACIÓN

ACTUACIÓN: IMDECA-Proyectos de I+D en colaboración

Fecha de concesión: 1 de julio de 2016

Resumen de resultados relativos a:
Modelo de referencia de la Industria 4.0 y
selección de variables críticas

Pertenciente al paquete de trabajo: PT1

RESUMEN

SAIN4 es un proyecto financiado con el Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial (IVACE) y la Unión Europea a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

El objetivo de este resumen de resultados es doble. Por un lado describir un modelo de la Industria 4.0 aplicable a los sectores Madera-Mueble y Metalmecánico, y que pueda utilizarse para evaluar la situación de las empresas respecto los objetivos propuestos por el paradigma Industria 4.0. Por otro lado establecer un sistema o metodología que, frente a un proceso o instalación industrial determinada de los sectores Madera-Mueble o Metalmecánico, facilite la identificación de aquellas variables de proceso o ambientales que tienen mayor incidencia en los resultados del mismo.

ABSTRACT

SAIN4 is a project funded by the Valencian Institute for Business Competitiveness (IVACE) and the European Union through the European Regional Development Fund (FEDER).

The objective of this summary of results is twofold. On the one hand, it describes a model of Industry 4.0 applicable to the Wood-Furniture and Metal-Mechanical sectors, and that can be used to evaluate the situation of the companies with respect to the objectives proposed by the Industry 4.0 paradigm. On the other hand establish a system or methodology that, in front of a particular industrial process or installation of the Wood-Furniture or Metal-Mechanical sectors, facilitates the identification of those process variables or environmental variables that have a greater impact on the results of the same.

Tabla de Contenidos

1. Introducción	4
1.1. Objetivos del Paquete de Trabajo 1	4
1.2. Objetivo del presente documento	4
2 Modelos de referencia actuales	6
2.1 Metodologías de transformación	6
2.2 Modelos de madurez digital	9
3. Modelo sectorial de referencia Industria 4.0	22
3.1 Visión general del Modelo	22
3.2 Estructura y componentes del modelo.	22
3.2.1 Áreas de análisis.	23
3.2.2 Facilitadores de la transformación digital.	24
3.2.2.1. Facilitadores dependientes.	25
3.2.2.2. Facilitadores independientes.	30
4 Procesos y variables significativas en los sectores Madera-Mueble y Metalmecánico.	31
4.1 Procesos principales	31
4.2. Influencia de las variables en la eficiencia de los procesos	32
4.2.1. Introducción: medición de la eficiencia a través del OEE	32
4.2.2 Variables significativas relacionadas con la eficiencia productiva	34
4.2.3 Análisis de la influencia de las variables. Conclusiones	36
5 Referencias bibliográficas	44

1 Introducción

1.1 Objetivos del Paquete de Trabajo 1

El objetivo de este paquete de trabajo (PT1. Modelo de Referencia de la Industria 4.0) pretende el estudio detallado de la problemática de la Industria 4.0, y la definición y validación de un modelo de referencia sectorial, que permita establecer el nivel de digitalización de cualquier empresa respecto al óptimo establecido en el modelo teórico de la Industria 4.0. Además, se establecerá una metodología para descubrir las variables explicativas del proceso productivo en las empresas de los sectores Madera-Mueble y Metalmecánico.

Debido a los diferentes niveles de desarrollo tecnológico de las empresas industriales, no es una práctica realista universalizar soluciones tecnológicas orientadas a mejorar la competitividad de las mismas. Por ello se plantea un primer paquete de trabajo en el que se defina, de forma muy detallada y con una visión de 360°, las implicaciones de la integración de una empresa industrial en el paradigma de la Industria 4.0, mediante la creación de un modelo de referencia específico para los sectores de competencia de los participantes que identifique, categorice y cuantifique las variables asociadas a dicho paradigma.

Este modelo servirá, de forma general, para establecer los requisitos que debe satisfacer una empresa para aprovechar los beneficios de la captura, registro y utilización del flujo de información que se genera en el ciclo de vida completo del producto, desde su diseño hasta el final de su vida, con los consiguientes procesos asociados de la cadena de valor empresarial e inter-empresas y de ahí la necesidad de analizar con una perspectiva completa (360°) todos los procesos involucrados. Esta visión general es necesaria para poder acotar el alcance del proyecto: no es viable plantear una solución basada en TIC que pueda mejorar la eficiencia productiva de cualquier tipo de empresa, en cualquier sector y con cualquier nivel de desarrollo tecnológico.

A partir de esta perspectiva general, se concretarán las variables que inciden directamente en la eficiencia productiva de un determinado tipo de empresas, previamente categorizadas mediante la aplicación del modelo. Esta actividad redundará en la viabilidad del proyecto, ya que nuevamente resultaría extremadamente complejo definir de forma universal las variables explicativas de la eficiencia productiva en cualquier tipo de empresa. Y son precisamente los datos asociados a estas variables los que posteriormente se utilizarán para generar el sistema de optimización propuesto.

1.2 Objetivo del presente documento

El objetivo del documento es doble. Por un lado describir un modelo de la Industria 4.0 aplicable a los sectores Madera-Mueble y Metalmecánico, y que pueda utilizarse para evaluar la situación de las empresas respecto los objetivos propuestos por el paradigma Industria 4.0. Por otro lado establecer un sistema o metodología que, frente a un proceso o instalación industrial determinada de los sectores Madera-Mueble o Metalmecánico, facilite la identificación de aquellas variables de proceso o ambientales que tienen mayor incidencia en los resultados del mismo.

Para ello, se han realizado las siguientes actividades:

- Se han analizado las metodologías para la transformación digital de las empresas en general, así como los modelos de referencia que existen en la actualidad y, considerando las características de los sectores objetivo, se planteó una primera versión del Modelo Industria 4.0 considerando cinco áreas de generación de valor y tres facilitadores esenciales.
- Se desarrolló toda la metodología para aplicar el modelo en la empresa, desde la generación de los niveles de madurez digital para cada facilitador, hasta el sistema de evaluación y presentación de resultados, así como la metodología para realizar el diagnóstico de cada empresa.
- Se han definido los procesos de transformación más significativos que se utilizan en ambos sectores, y se han identificado un conjunto de variables de proceso, producto, operación y ambientales que pueden tener influencia, a priori, sobre el resultado del mismo.
- Se ha definido cómo puede influir cada variable en la Calidad, Disponibilidad y Rendimiento de cada proceso. Ante la imposibilidad de definir una escala objetiva de valoración, ya que requeriría realizar una ingente e inviable cantidad de experimentos, se ha optado por realizar una valoración subjetiva a través de técnicos sectoriales. Para ello se ha desarrollado una sencilla aplicación mediante Access que agiliza tanto la valoración como la obtención de resultados.

2 Modelos de referencia actuales

2.1 Metodologías de transformación

Al tratar el tema de la Industria 4.0, es muy común encontrar publicaciones que detallan y definen conceptos relacionados con las tecnologías facilitadoras que la hacen posible, si bien también es imprescindible contar con un cuerpo de **conocimiento consolidado de metodologías y modelos** que permitan a las empresas identificar sus debilidades y planificar de forma ordenada y eficiente la transición digital.

En este sentido, se analizan en el presente apartado **dos propuestas de metodologías** para la transformación de una compañía en Industria 4.0. Por una parte, se describe la visión de Capgemini a través de los documentos *Are Manufacturing Companies Ready to Go Digital?: Understanding the Impact of Digital* (Ebner & Bechtold, 2012)¹ y *Industry 4.0 - The Capgemini Consulting View: Sharpening the Picture beyond the Hype* (Bechtold, 2014)². Por otra parte, se estudia la propuesta de la consultora Roland Berger plasmada en el informe de 2015 *The digital transformation of industry*³ encargado por el BDI (Bundesverband der Deutschen Industrie eV).

En el caso de los autores Ebner & Bechtold (2012) y Bechtold et al. (2014) de Capgemini, se proponen en su metodología **6 etapas** para la transformación digital de una empresa:

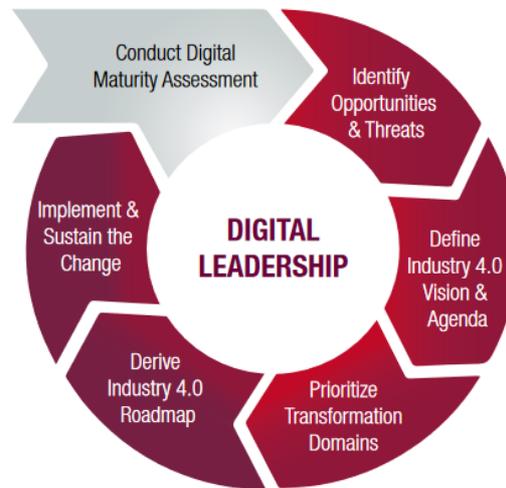


Figura 1. Etapas para la transformación digital de una empresa. Fuente: Bechtold et al. (2014) – Capgemini Consulting.

- 1) Realizar una evaluación de la madurez digital. Se propone realizar una evaluación de sus fortalezas y debilidades acerca de aspectos como: modelos de negocio, prácticas digitales, prácticas de gestión, y capacidades digitales.

¹ https://www.capgemini.com/resource-file-access/resource/pdf/Are_Manufacturing_Companies_Ready_to_Go_Digital_.pdf

² https://www.de.capgemini-consulting.com/resource-file-access/resource/pdf/capgemini-consulting-industrie-4.0_0.pdf

³ http://bdi.eu/media/user_upload/Digital_Transformation.pdf

- 2) Identificar amenazas y oportunidades. Se propone explorar el entorno de la compañía en busca de oportunidades y amenazas de la nueva era digital.
- 3) Definir la visión digital de la empresa y su agenda. La empresa debe de realizar un esfuerzo de anticipación acerca de cómo quiere hacer negocios en la era de la industria digital. Se propone definir una agenda que marque objetivos en el tiempo con hitos concretos de dicha transformación.
- 4) Priorizar los dominios de transformación. Priorizar acciones en base a su beneficio y facilidad de implantación (utilizar una matriz de priorización).
- 5) Desarrollar una hoja de ruta digital. Esta hoja de ruta consistirá en un plan detallado y tangible para la transformación digital.
- 6) Implementar y mantener el cambio. Se trata de un esfuerzo continuo en el tiempo.

Por su parte, Roland Berger propone un **modelo de 3 fases** para llevar a cabo la transformación:

- 1) Análisis de la influencia de las tecnologías digitales en la industria. El objetivo es identificar qué cambios se van a producir en el mercado y entorno de la empresa dentro de la nueva era digital.
- 2) Análisis de la madurez digital. El objetivo es identificar oportunidades y amenazas ante los nuevos escenarios, así como identificar las carencias de capacidades para la transformación.
- 3) Desarrollo e implementación de la hoja de ruta de la transformación.



Figura 2. Etapas para la transformación digital de una empresa. Fuente: Roland Berger (2015)

Las dos metodologías propuestas presentan una serie de etapas generales, con similitudes entre ambas. Ambas propuestas, proponen un enfoque similar al de la **metodología PDCA** de Deming, comúnmente utilizada en sistemas de gestión (Calidad, Medioambiental, I+D+i, etc.), y utilizan algunas herramientas comúnmente utilizadas en proyectos de **planificación estratégica**.

En la siguiente imagen, se muestra un esquema de dichas correspondencias identificadas entre ambas metodologías, y aquellos aspectos que recuerdan al ciclo PDCA así como a algunas herramientas típicas de planificación estratégica.

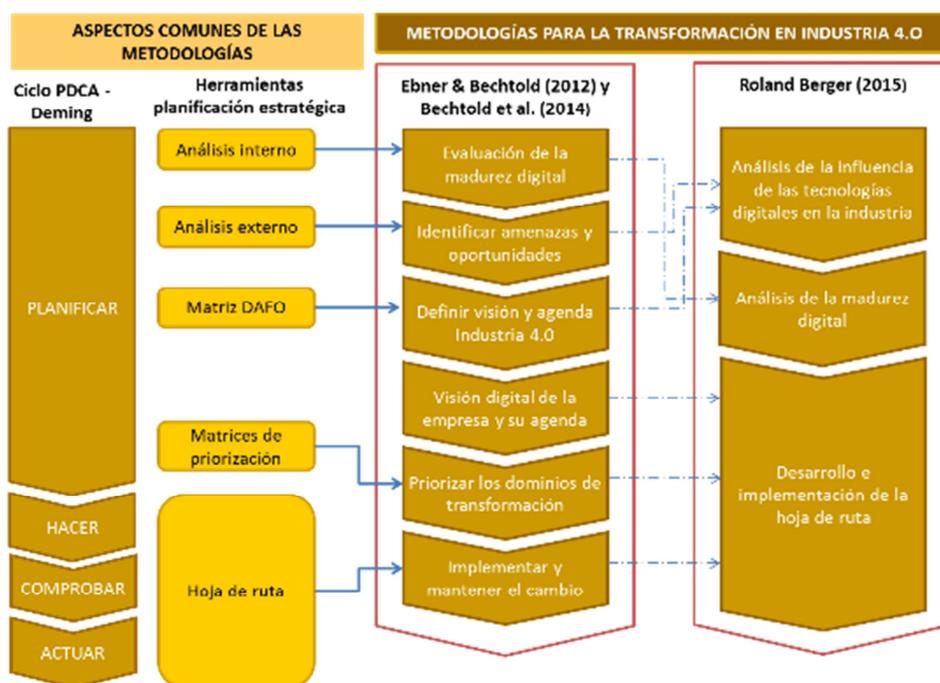


Figura 3. Esquema común de metodologías para la transformación en industria 4.0. Fuente: elaboración propia

Dentro de una fase general inicial de *Planificación*, las dos metodologías proponen una etapa de **evaluación de la madurez digital** de la organización, que se correspondería con un **análisis interno** respecto de las capacidades digitales de la empresa. De igual manera se proponen etapas de evaluación y prospección del entorno Industria 4.0, que se correspondería con un **análisis externo** focalizado en cómo la digitalización de la industria puede cambiar la forma de hacer negocios de la empresa. Una vez ejecutadas las dos primeras etapas, se proponen actividades de identificación de fortalezas y debilidades, así como amenazas y oportunidades, que pueden materializarse en la clásica **matriz DAFO**. Por último, en esta fase de planificación, por parte de Bechtold et al. (2014) se proponen etapas de establecimiento de la visión de la empresa, el establecimiento de una agenda inicial, y la priorización de actividades de transformación (**matrices de priorización**).

En una segunda fase de **puesta en marcha de la transformación** (“hacer”, según ciclo PDCA), se propone implementar una hoja de ruta de la transformación que detalle las tareas concretas a llevar a cabo por la empresa.

Para las fases finales de **comprobar los resultados y actuar sobre las desviaciones**, solo Bechtold et al. (2014) define de forma explícita actividades de mantenimiento del cambio, aunque no entra en detalles acerca de cómo implementar el seguimiento y las acciones correctivas.

Una vez analizadas estas dos propuestas de metodologías, es posible afirmar que existe una **carencia de metodologías contrastadas** de forma empírica para la transformación de una empresa en industria 4.0. Las pocas metodologías existentes, **definen una serie de fases generales** a seguir sin entrar en detalles de tareas y actividades concretas, inputs, outputs e indicadores de control.

De manera general, las dos metodologías propuestas siguen un **esquema similar al ciclo PDCA** de Deming, utilizado en sistemas de gestión como la calidad, medioambiental, etc., donde se proponen algunas herramientas de planificación estratégica, particularizadas al caso digital, como: análisis interno/externo, matriz DAFO, matrices de priorización, y diseño de hoja de ruta.

En cualquier caso, el proceso de transformación de una empresa hacia el concepto de industria 4.0, se inicia en ambos casos con una **evaluación interna de la empresa (análisis de la madurez digital)** y externa del entorno de la misma, a partir del cual se puedan identificar las debilidades y fortalezas respecto de la industria digital, así como las amenazas y oportunidades que se presentan.

Resulta **por tanto necesario contar con un modelo del concepto de industria 4.0** que permita comparar y evaluar a la empresa y su entorno, como paso previo a la elaboración de la hoja de ruta de la transformación. Para ello, en el siguiente apartado se profundiza en la revisión de los modelos propuestos por diferentes empresas para medir el grado de madurez digital.

2.2 Modelos de madurez digital

En esta sección ofrecemos una revisión de los estudios y modelos disponibles en la literatura en cuanto al análisis del gap competencial empresarial y de los empleados en el ámbito de la industria 4.0, de cara a tomarse como base para la construcción de nuestro modelo de referencia para situar a cada empresa respecto a su integración en este nuevo paradigma.

Como referencia principal tomamos el **“Industry 4.0 Readiness”**⁴, que fue realizado por la Fundación IMPULS de la Federación de Ingeniería alemana (VDMA) y dirigido por IW Consult y el Instituto de Gestión Industrial (FIR) en la RWTH Aachen University. Consiste en una herramienta online de auto-diagnóstico que calcula una puntuación del estado de la empresa en el contexto de la industria 4.0, esto es, permite conocer en qué aspectos se está ya preparado para este nuevo paradigma y en cuales aún hay campo de mejora.

Su modelo de “preparación” para la industria 4.0 se basa en **6 dimensiones claves**:

⁴ Impuls (2015): Industry 4.0 Readiness Online Self-Check for Businesses. En: <https://www.industrie40-readiness.de/?lang=en>

- Estrategia y organización. La estrategia y la cultura corporativa son críticas para el lanzamiento de la industria 4.0 en una organización.
- Fábrica inteligente, que posibilita una producción distribuida y altamente automatizada.
- Operaciones inteligentes, donde el proceso de producción es guiado por “piezas” inteligentes.
- Productos inteligentes, que suponen la incorporación de componentes TIC en los productos físicos tradicionales dotándoles de funcionalidad avanzada.
- Servicios basados en datos, que se forjan en modelos de negocio.
- Empleados. Para una implementación satisfactoria de la industria 4.0 es necesario personal cualificado.

Estas seis dimensiones se usan para construir un modelo de “preparación” para la industria 4.0 de **seis niveles** (del 0 al 5), tal y como muestra la siguiente figura:

- Nivel 0, que representa a los extraños, aquellas compañías que no han hecho nada o muy poco en cuanto a planificar o implementar acciones de industria 4.0.
- Nivel 1, que representa a los principiantes.
- Nivel 2, que representa a los intermedios.
- Nivel 3, que representa a los experimentados.
- Nivel 4, que representa a los expertos.
- Nivel 5, que representa a los de ejecución top, esto es, empresas que han implementado con éxito todas las acciones que engloban el paradigma de la industria 4.0.

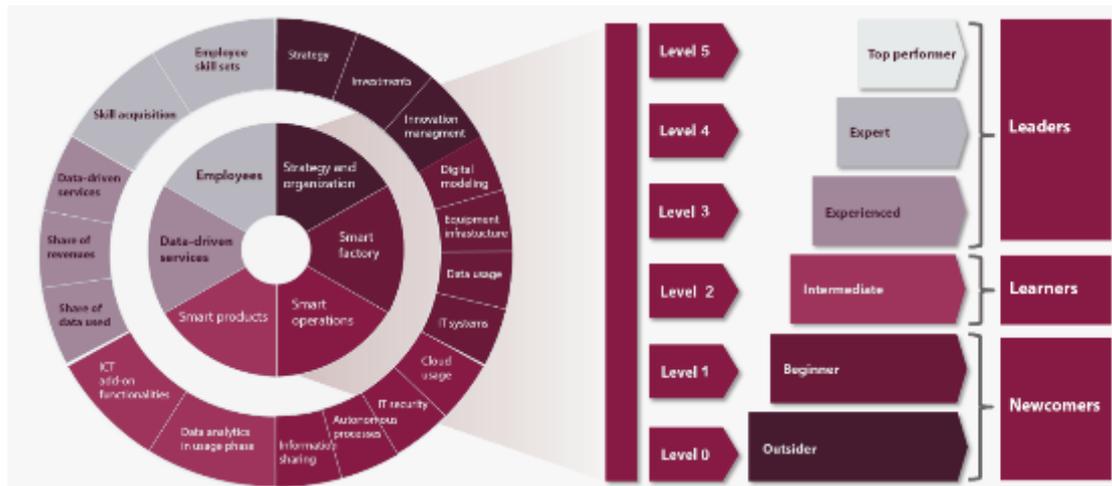


Figura 4. The Industry 4.0 Readiness Model – Dimensions and Levels

Estrategia y organización

La industria 4.0 es más que mejorar los productos o procesos existentes mediante la incorporación de tecnología digital, realmente supone la oportunidad de desarrollar modelos de negocio completamente nuevos. Por ello, su implementación tiene una gran importancia estratégica. En esta dimensión el modelo explora la apertura actual y la interacción cultural hacia la industria 4.0 con estos cuatro criterios:

- ***Estado de la implementación de una estrategia de industria 4.0***
- ***Operatividad y revisión de la estrategia mediante un sistema de indicadores***
- ***Inversión en industria 4.0***
- ***Uso de tecnología y gestión de la innovación***

Fábrica inteligente

Una implementación exitosa de la industria 4.0 permite una producción distribuida y altamente automatizada. Al contrario que en una producción tradicional, componentes inteligentes controlarán y monitorizarán el proceso de producción pudiendo, en su última expresión, trabajar incluso autónomamente. Esto es lo que ocurre en la fábrica inteligente, un entorno donde los sistemas de producción y los de logística se organizan así mismos sin intervención humana. Para ello se basan en sistemas ciber-físicos (CPS), que enlazan el mundo físico y el mundo virtual mediante comunicación a través de infraestructura TIC, el Internet de las Cosas. Además, la industria 4.0 implica modelado digital a través de la recolección, almacenamiento y procesado inteligente de datos. En este sentido, el concepto de fábrica inteligente implica que la información se transmite y que los recursos se usan más eficientemente. Para ello es necesaria colaboración cross-empresarial en tiempo real entre sistemas de producción, sistemas de información y personas. Estos sistemas integrados

producirán grandes cantidades de datos que serán procesados, analizados e integrados en modelos de toma de decisión.

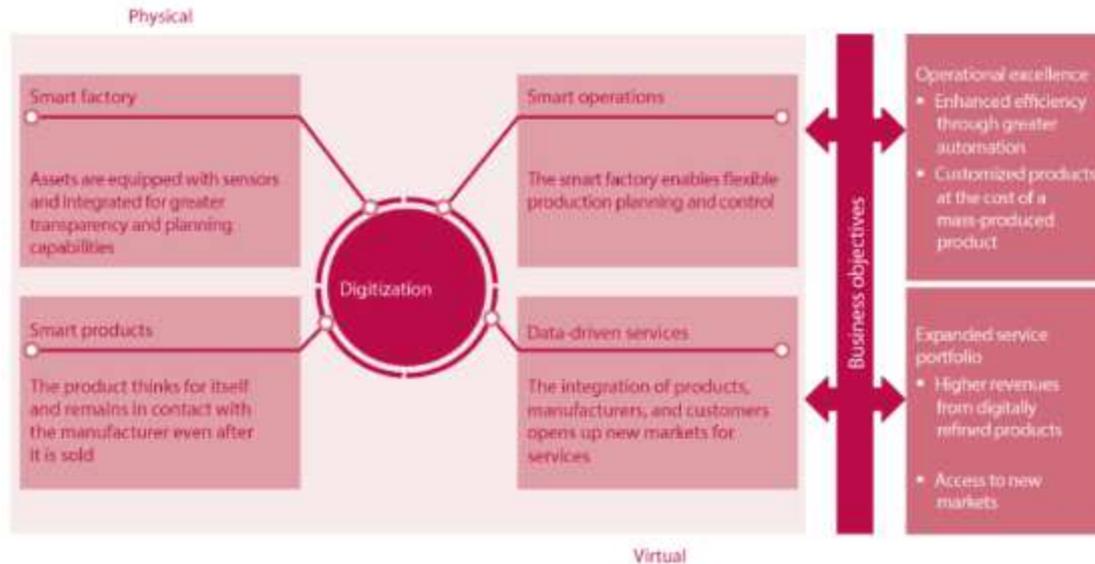


Figura 5. Virtual Factory Model

El progreso de una empresa en esta dimensión de fábrica inteligente se mide en este modelo mediante los siguientes cuatro criterios:

- **Modelado digital**
- **Infraestructura/equipamiento**
- **Uso de los datos**
- **Sistemas TI**

Operaciones inteligentes

Algo que distingue a la industria 4.0 es la integración en toda la empresa de los mundos físico y virtual. Con la llegada de la digitalización y el exceso de datos ha sido posible llegar a nuevas formas y enfoques en los sistemas de planificación de la producción (PPS) y en la gestión de la cadena de suministro (SCM). Los requisitos técnicos en producción y en planificación de la producción necesarios para realizar el auto-control de cada elemento se conocen como “operaciones inteligentes”.

La preparación para la industria 4.0 en esta dimensión de operaciones inteligentes se determina con los siguientes cuatro criterios:

- **Compartición de información.**

- **Uso de la nube**
- **Seguridad en los sistemas TI**
- **Procesos autónomos**

Productos inteligentes

Los productos inteligentes son un componente vital del concepto unificado de “fábrica inteligente” facilitando una producción automatizada, flexible y eficiente. Así, los productos físicos se equipan con componentes TIC (sensores, RFID, interfaces de comunicación, etc.) para recolectar datos sobre su entorno y sobre su propio estado. Solo cuando los productos recogen datos, saben su camino en la producción y se comunican con sistemas de alto nivel, los procesos de producción pueden ser mejorados y guiados autónomamente y en tiempo real. Además, se hace posible la monitorización y optimización del estado de los productos individuales. Esto tiene aplicaciones potenciales que van más allá de la producción. La utilización de productos inteligente en producción hace posible nuevos servicios, por ejemplo, a través de comunicaciones entre clientes y fabricantes.

La preparación en el área de productos inteligentes se determina evaluando las **funcionalidades añadidas por las TIC en los productos**, así como analizando hasta qué **punto qué datos de uso se analizan**.

Servicios basados en datos

La idea de los servicios basados en datos es posibilitar los futuros modelos de negocio e incrementar el beneficio del cliente. Cada vez más los negocios basados en servicios y los servicios post-venta se basarán en la evaluación y el análisis de los datos recolectados, así como en la integración global de las empresas. Los productos físicos deben equiparse con infraestructura física TIC para poder enviar, recibir o procesar la información necesaria para los procesos operativos.

La preparación en el área de servicios basados en datos se determina mediante estos tres criterios:

- **Disponibilidad de servicios basados en datos**
- **Cuota de ingresos derivada de los servicios basados en datos**
- **Cuota de datos usados**

Empleados

Los empleados ayudan a las empresas a posibilitar su transformación digital y son los más afectados con los cambios en el lugar de trabajo. Su entorno de trabajo se altera directamente,

requiriendo la adquisición de nuevas habilidades y conocimientos. Esto hace que cada vez sea más crítico que las empresas preparen a sus empleados para estos cambios mediante una formación y educación continua y apropiada.

La preparación en la dimensión de empleados se determina analizando las **capacidades de los empleados en varias áreas** y los **esfuerzos de la empresa para que estos adquieran nuevas habilidades y se formen**. En cuanto a las áreas, indican las siguientes: *infraestructura TI, tecnología de automatización, analítica de datos, seguridad de datos y de comunicaciones, software colaborativo, y habilidades no técnicas como conocimientos de sistemas y de procesos*.

Una segunda referencia de interés es el “**Industry 4.0 Self-Assessment**”⁵ elaborado por PwC en 2016. Esta herramienta se ha diseñado para evaluar la posición de las empresas en lo que refiere al nuevo paradigma de la industria 4.0. Para ello, mide la posición actual de la compañía frente al nivel de madurez deseado a lo largo de seis dimensiones. En definitiva, permite identificar necesidades, así como clasificar el nivel de madurez actual de la empresa. Para realizar la herramienta, se creó un modelo de madurez con las dimensiones funcionales más relevantes, así como los estados de madurez en los que una compañía puede estar.

Las seis dimensiones consideradas en este modelo de PwC son:

- Modelos de negocio, portfolio de productos y servicios
 - ¿Cómo se combinan los productos físicos y los servicios en el portfolio de la compañía? ¿Qué características digitales o servicios se ofrecen? ¿hasta qué punto está la ingeniería digitalizada?
- Acceso al mercado y al cliente
 - ¿Qué canales se usan para interactuar con el cliente? ¿qué datos se están midiendo actualmente para estudiar a los clientes? ¿cómo se monitorizan las interacciones con el cliente?
- Cadenas de valor y procesos
 - ¿A qué nivel están integradas la ingeniería y la fabricación internamente? ¿cómo se gestiona la cadena de suministro? ¿cómo se planifican las capacidades productivas?
- Arquitectura TI
 - ¿Cómo son los procesos soportados por las tecnologías digitales? ¿cuáles son las capacidades técnicas? ¿cómo la infraestructura TI soporta los servicios digitales?

⁵ <https://i40-self-assessment.pwc.de/i40/landing/>

- Cumplimiento, legalidad, riesgos, seguridad e impuestos
 - ¿Cómo se evalúan e implementan técnicamente los aspectos de cumplimiento? ¿Cómo se identifican los riesgos legales? ¿se implementan las oportunidades de financiación? ¿cómo se asegura la seguridad cibernética?
- Organización y cultura
 - ¿Qué capacidad de cambio tiene la organización? ¿Qué capacidades de *industria 4.0 / operaciones digitales* están disponibles en la compañía?

En cuanto a los niveles, se establecieron cuatro:

- I-novato digital. Son aquellas empresas que acaban de empezar la digitalización de su modelo de negocio y de sus operaciones, y cuyo principal foco es que la integración interna se ponga en marcha. Su portfolio está dominando típicamente por productos físicos y la integración está limitada dentro de las cadenas de valor horizontales y verticales.
- II-integrador vertical. Son aquellas empresas que ya han añadido características digitales a sus productos y/o disponen en su portfolio de productos y servicios digitales. Usan los datos para crear valor y ya han conseguido cierta integración de su cadena de valor vertical interna con su sistema de planificación de recursos, desde la planta de producción hasta las máquinas de producción o incluso los productos.
- III-colaborador horizontal. Son empresas que ya han alcanzado un nivel decente de integración vertical y su foco actual es la colaboración e integración con proveedores, clientes y colaboradores. Además de la integración IT y de procesos horizontal, forman redes cooperativas flexibles con sus colaboradores para satisfacer las necesidades del cliente.
- IV-campeón digital. Son empresas que ya han alcanzado un nivel considerable de integración vertical y horizontal. Su foco actual es por tanto el desarrollo de nuevos y disruptivos modelos de negocio, con frecuencia basados en datos, así como un portfolio de productos y servicios innovadores para satisfacer las necesidades de los clientes individualmente. Además, la colaboración es uno de sus motores clave para generar valor.

Las siguientes figuras muestran los resultados del auto-diagnóstico de una empresa ficticia a modo de ejemplo. El nivel obtenido es el I-novato digital.

Detailed Result

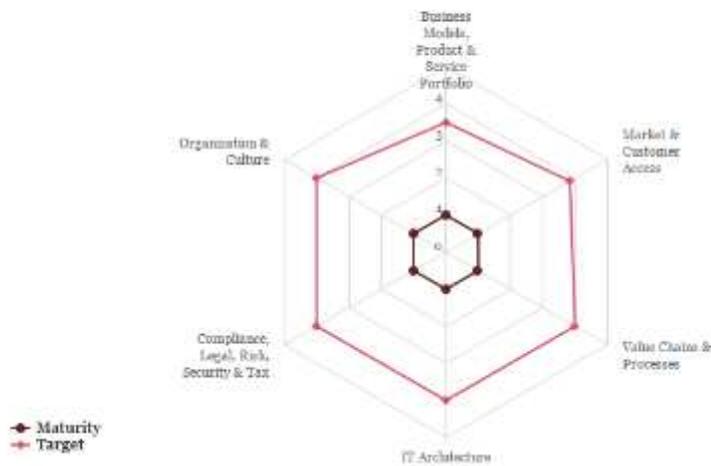


Figura 6. Ejemplo de auto-diagnóstico – diagrama de araña (Industry 4.0 Self-Assessment)

Your Position In The Maturity Model

The **Digital Novice** has just started the digitization of his business model and operations and the main focus is on getting internal integration started. The portfolio is typically dominated by physical products and there is limited integration within the vertical and horizontal value chains.



Figura 7. Ejemplo de auto-diagnóstico – nivel de madurez (Industry 4.0 Self-Assessment)

Otra referencia reciente respecto del estatus de adopción de la Industria 4.0 es el informe publicado por el Boston Consulting Group (BCG) titulado **“Time to Accelerate in the Race**

Toward Industry 4.0⁶ en el que se lleva a cabo una comparativa entre los países de Alemania y Estados Unidos en relación con su nivel de preparación para la nueva era industrial.

El informe, que toma como base la información recogida en más de 600 encuestas a grandes compañías alemanas y estadounidenses, parte con el objetivo de evaluar el grado de adopción de la Industria 4.0 en estos países e identificar los principales retos y desafíos que supone su implementación.

Uno de los retos principales identificados en el estudio es la **búsqueda de talento y la falta de competencias digitales de sus empleados**. El concepto de Industria 4.0 tiene un impacto significativo en la mano de obra ya que se requieren de nuevas capacidades que son distintas de las de los empleados actuales. En este sentido, la transición hacia el nuevo modelo industrial demanda principalmente una **fuerza de trabajo con competencias en materia de gestión de datos, seguridad de datos, desarrollo de software, programación, ciencia de datos y analítica**, tal y como refleja la siguiente figura:

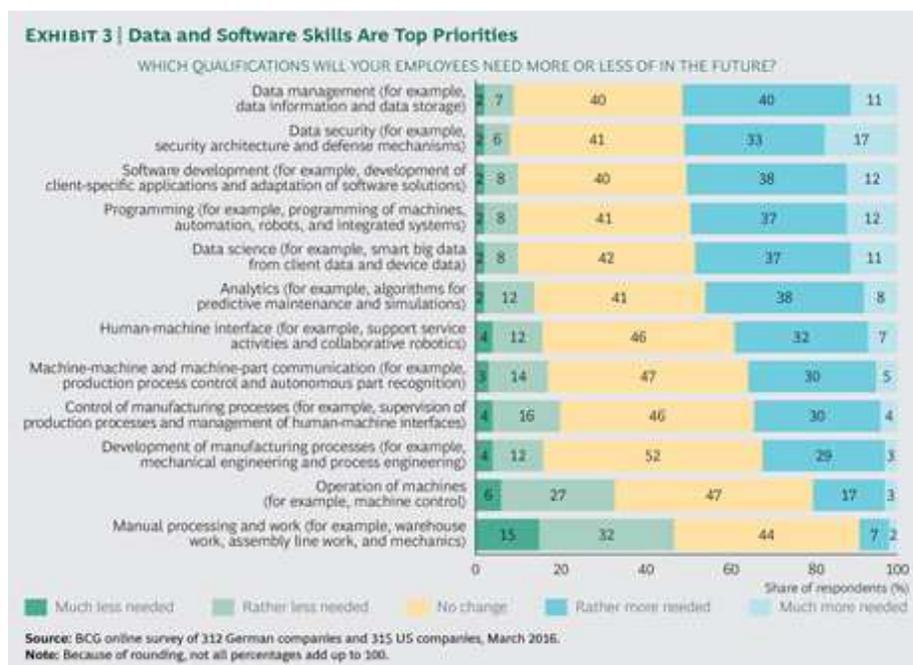


Figura 8. Data and Software Skills Are Top Priorities (Boston Consulting Group)

Para hacer frente a este gap competencial las compañías alemanas se centran en mayor medida en la formación continua e interna de sus trabajadores, mientras que las estadounidenses, además de la formación continua, apuestan por la reconversión profesional.

⁶ <https://www.bcgperspectives.com/content/articles/lean-manufacturing-operations-time-accelerate-toward-industry-4/?chapter=3#chapter3>

En cualquier caso, ambos países deben redoblar sus esfuerzos en la atracción global del talento digital.

Es interesante también reflejar el trabajo realizado por **TECNALIA: Modelo de diagnóstico e impacto 4.0 (MDI-4.0)**^{7,8}. La herramienta desarrollada por Tecnalia pretende tener una visión de todos aquellos aspectos y características que influyen en la transformación industrial y cuyos beneficios para la empresa son:

- Establecer oportunidades de mejora e impacto relevante
- Identificar nuevos servicios
- Obtener un roadmap tecnológico de acciones a futuro

MDI-4.0 permite la identificación en las empresas de necesidades y retos con impacto potencial alineados con la estrategia industria 4.0. En concreto consiste en captar el estado actual en algunas áreas y su vinculación con las tecnologías (*análisis de espacios*), compararlas con lo que sería un estado óptimo en su sector dentro del concepto de industria 4.0, e identificar oportunidades de mejora con impacto relevante que puedan ayudarle a posicionarse mejor en el mercado. Para ello se basa en **7 áreas y espacios de análisis** en cada una de ellas, cubriendo todas las dimensiones implicadas: clientes, procesos, plantilla, proveedores, sostenibilidad y conectividad.

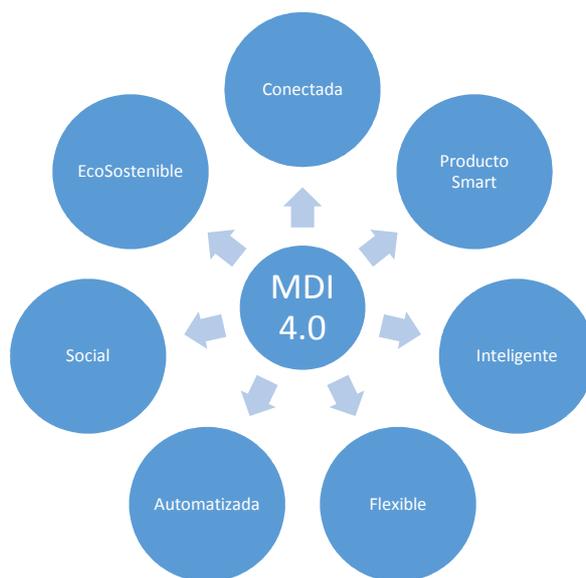


Figura 9. Áreas de análisis MDI 4.0. Fuente: Tecnalia y elaboración propia

7

http://www.elara.es/documentos/TECNALIA_Industry%204.0_IVJornada%20de%20Productividad_Elara.pdf

⁸ <http://www.2016cbimbilbao.com/archivo/ficheros/laka.pdf>

Las áreas *conectada*, *producto Smart* y *social externa* permitirían valorar su eficacia en su relación exterior. Las áreas *conectada*, *inteligente*, *flexible* y *automatizada* permitirían valorar la eficiencia en sus procesos internos. Las áreas “*automatizada* y *social interna*” analizarían el atractivo para los trabajadores y el área *eco-sostenible* la sostenibilidad medioambiental.

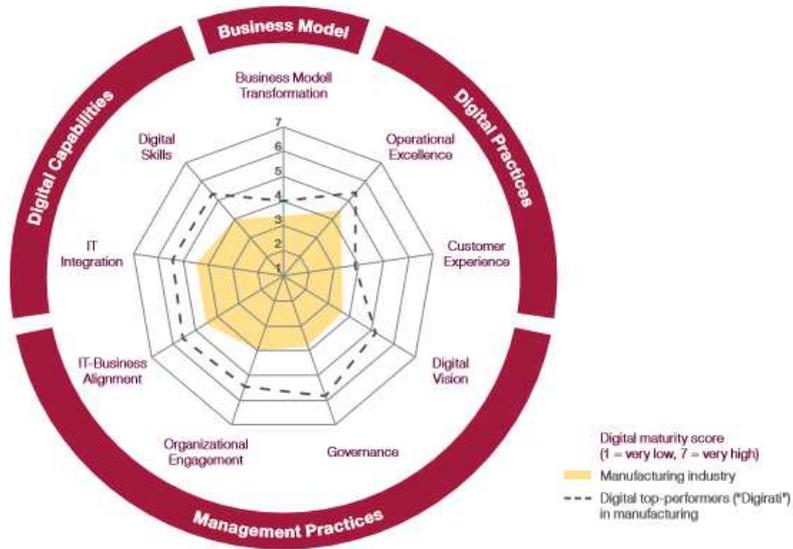
A modo de ejemplo se detalla el área “conectada”. Su objetivo es que la industria sea capaz de obtener e intercambiar datos e información de sus procesos, almacenarlos, y gestionarlos de forma segura y accesible en remoto, interna y externamente, en tiempo real. Consta de 5 espacios:

- Obtener datos. Monitorización planta y procesamiento seña.
- Protocolos y estándares de comunicación (para la obtención de los datos).
- Acceso a almacenamiento de datos. Arquitecturas descentralizadas y repositorios remotos.
- Cooperación e interrelación: intercambiar datos. Integración de herramientas, sistemas y procesos.
- Ciberseguridad.

Por último, incluimos el modelo de madurez digital de la industria manufacturera de la consultora CapGemini⁹. En este trabajo se consideran 4 grandes dimensiones o campos clave y 7 niveles o puntuaciones (del 1, la más baja, al 7):

- Modelo de negocio, que implica el aprovechamiento de la transformación digital para la puesta en marcha de nuevos servicios y productos, alcanzando nuevos clientes y mercados.
- Prácticas digitales, que se focaliza en la ejecución operativa y la experiencia del usuario. Se incluyen tecnologías móviles, mensajería instantánea, y dispositivos embebidos para la eficiencia de los procesos operativos y en los diferentes canales de comunicación digitales para la atención al cliente.
- Prácticas de gestión, incluyendo la visión digital (liderazgo en la transformación que permite la digitalización), la gobernanza (coordinación y puesta en marcha de las acciones necesarias), el compromiso organizacional (involucración a todos los actores relevantes) y el alineamiento de TIC y negocio, haciendo frente a barreras organizacionales.
- Capacidades digitales, donde, además de las competencias digitales de los empleados, cobra especial relevancia la integración de plataformas y sistemas TIC para alcanzar mayor agilidad y transparencia operativa.

⁹ https://www.de.capgemini-consulting.com/resource-file-access/resource/pdf/digitizing-manufacturing_0.pdf



Source: Capgemini Consulting – MIT Center for Digital Business, please consult page 31

© Capgemini Consulting 2014

Figura 10. Panel de madurez digital de la industria manufacturera (CapGemini 2014)

A modo de resumen, en la Figura 11 se ofrece una tabla comparativa de los modelos indicados anteriormente:

Dimensiones clave de los modelos actuales

IMPULS	PRICE WATERHOUSE	BCG (encuesta)	TECNALIA	CAP GEMINI	McKINSEY (generadores de valor)
Estrategia y organización	Organización y cultura			Modelo de negocio Visión Digital Gobierno Compromiso de la organización Alineamiento TIC del negocio	
Fábrica inteligente	Arquitectura TI				Utilización de activos
Operaciones inteligentes	Cadena de valor y procesos		Proveedores - Procesos	Excelencia operativa	Recursos y procesos Calidad Inventarios
Productos inteligentes			Producto smart		
Servicios basados en datos	Portafolio productos y servicios. Modelo de negocio				Servicio post venta
Empleados		Talento y competencias digitales del personal	Plantilla	Capacidades digitales	Personal
	Acceso al mercado y cliente		Clientes	Experiencia del cliente	Time to market Ajuste oferta-demanda
	Cumplimiento, legalidad, riesgos, seguridad e impuestos				
			Sostenibilidad		
			Conectividad	Integración TI	

Figura 11. Áreas de evaluación de los seis modelos existentes

3. Modelo sectorial de referencia Industria 4.0

3.1 Visión general del Modelo

El modelo de evaluación de la madurez de una empresa respecto del concepto de industria 4.0 desarrollado se compone de cinco áreas de análisis (Innovación, Productos/Servicios, Mercado, Fabricación, y Red de suministro), tres facilitadores de la transformación dependiente de la empresa (la tecnología, el desempeño digital y las personas) y un elemento facilitador independiente de la empresa (entorno).

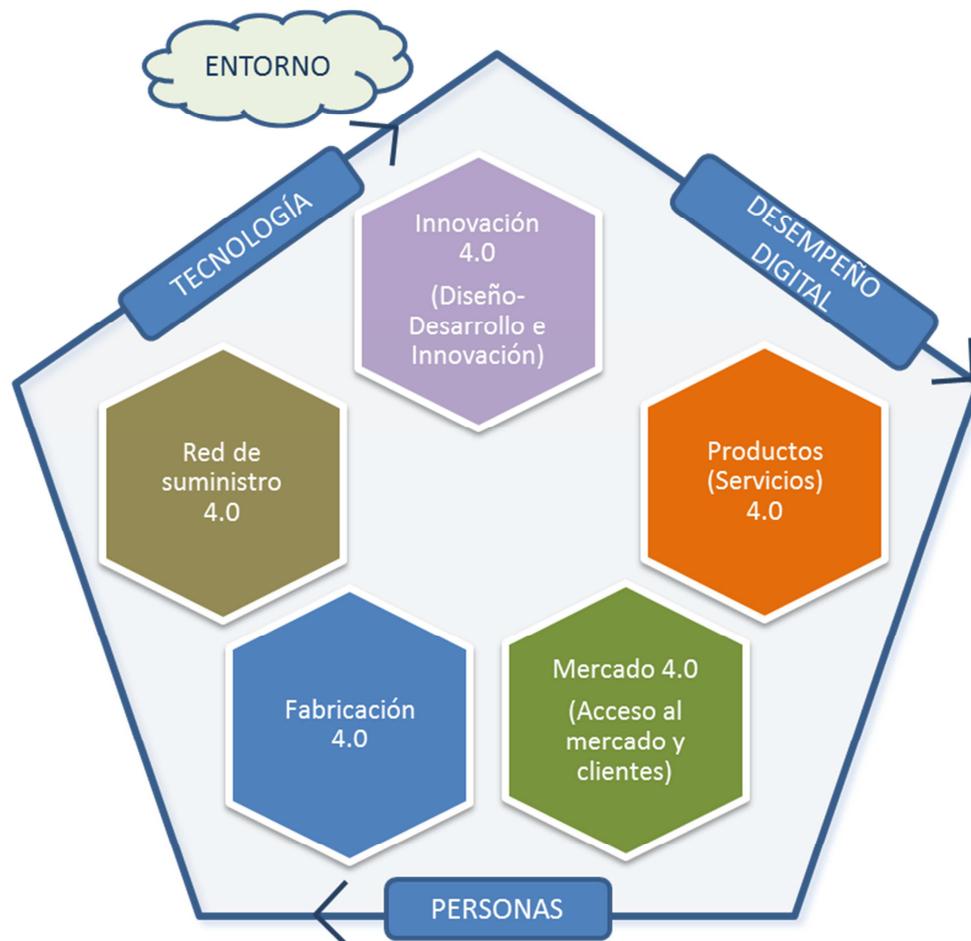


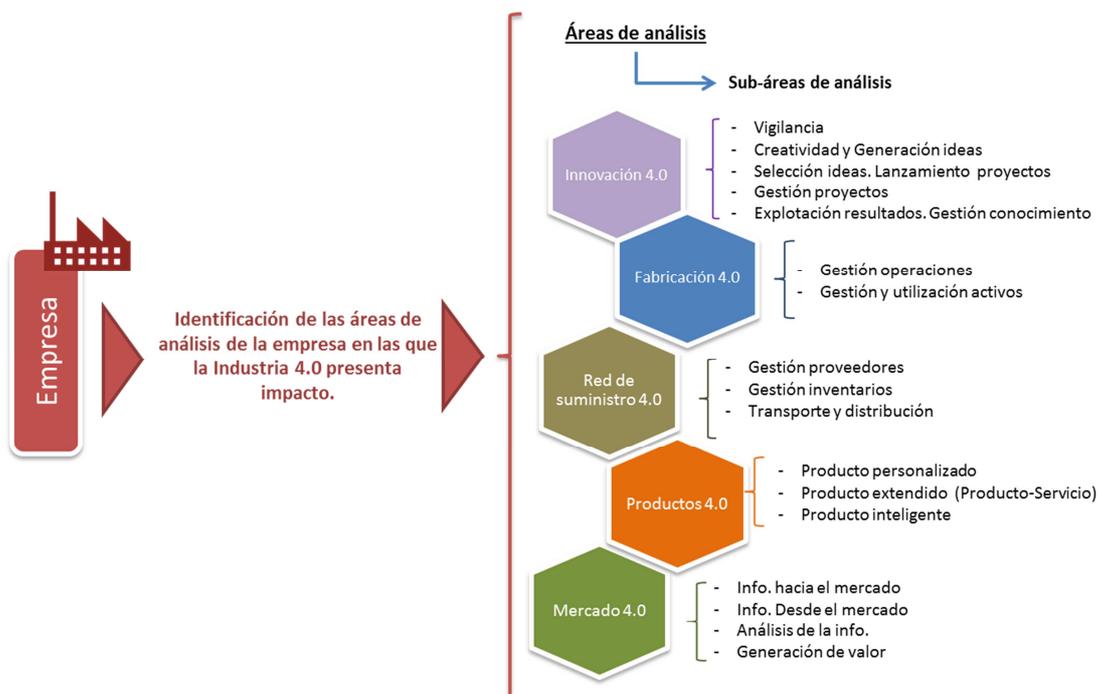
Figura 12. Modelo sectorial de Industria 4.0 (VERSIÓN 1)

3.2 Estructura y componentes del modelo.

La utilidad del modelo es evaluar el nivel de excelencia de una empresa de los sectores metalmecánico y madera-mueble, de acuerdo con el concepto de Industria 4.0. Dicha evaluación supone el paso previo para la generación de una hoja de ruta que guíe a la empresa en su proceso de transformación digital.

3.2.1 Áreas de análisis.

En primer lugar, se estructura el análisis de la empresa en cinco áreas, donde el concepto de Industria 4.0 presenta impacto. Cada área de análisis se subdivide en sub-áreas de análisis, que contienen los procesos clave de la empresa relacionadas con cada área de análisis. El objetivo es trabajar con unidades de análisis elementales, en las que se integran actividades y procesos clave para la transformación digital.



- Innovación 4.0. El proceso de diseño, desarrollo e innovación se lleva a cabo de forma colaborativa tanto a nivel interno como con diferentes empresas conectadas mediante herramientas TIC. Como resultado, los tiempos y costes desarrollo son menores y las innovaciones generadas son de tipo disruptivo. Los subprocesos relevantes son:
 - o Vigilancia.
 - o Creatividad y generación de ideas.
 - o Selección de ideas. Lanzamiento de proyectos
 - o Gestión de proyectos
 - o Explotación de resultados. Gestión del conocimiento

- Fabricación 4.0. En el proceso de fabricación se combina la eficiencia productiva con la flexibilidad y la agilidad (tiempos y series de fabricación cortos). Se aplican los conceptos de "mass customization". Los subprocesos relevantes son:
 - o Gestión de operaciones
 - o Gestión y utilización de activos.

-
- Red de suministro 4.0. Se requiere gestionar una cadena de valor muy fraccionada y especializada, bajo los mismos parámetros de la fabricación: eficiencia, flexibilidad y agilidad. En la gestión de la cadena de suministro, se adoptan modelos logísticos inteligentes. Se alcanza la trazabilidad a nivel ítem en toda la cadena de suministro y de valor. Los subprocesos relevantes son:
 - Gestión de proveedores
 - Gestión de inventarios
 - Transporte y distribución

 - Productos 4.0. Se ofrecen productos y servicios personalizados. Nuevos productos inteligentes o con nuevas funcionalidades relacionadas con el mundo digital. Nuevos servicios relacionados con la información capturada. En este caso se consideran como subprocesos relevantes:
 - Productos personalizados.
 - Producto extendido (servitización)
 - Producto inteligente. Productos con funcionalidades nuevas.
 - Nuevas funcionalidades de productos actuales.

 - Mercado 4.0. Utilización y aprovechamiento de los canales digitales no solo para vender, sino para obtener información del cliente y anticiparse a sus necesidades. Los subprocesos relevantes son:
 - Información hacia el mercado.
 - Información desde el mercado
 - Análisis de información.
 - Puesta en valor

3.2.2 Facilitadores de la transformación digital.

Se han identificado todos aquellos elementos que facilitan la transformación digital de cualquier empresa. Los facilitadores pueden ser dependientes de la propia empresa (tiene capacidad para actuar sobre ellos, adoptándolos en mayor o menor medida), o independientes (no puede actuar sobre ellos, por ejemplo, legislación, entorno financiero, etc.).



3.2.2.1. Facilitadores dependientes.

En esta categoría se agrupan el conjunto de elementos que dependen de las características de la propia empresa, y que pueden servir como facilitadores o impulsores de la transformación digital de la empresa.

Tecnología.

Es el conjunto de tecnologías que permiten la hibridación entre el mundo físico y el mundo digital/virtual, tanto en una dirección como en otra, aquellas que permiten la conexión de la fábrica con el consumidor final, tecnologías de comunicación y tratamiento de datos, así como aplicaciones de gestión intra-empresa / inter-empresa. Además de recoger aquellas que aparecen en la literatura, se ha considerado grupos de tecnologías muy específicas de las áreas que se van a evaluar. En la medida de lo posible se han sectorializado las tecnologías. A continuación, se muestra una tabla resumen con las tecnologías consideradas en el modelo, y una breve descripción.

Clasificación	Tipo de tecnología	Descripción
Hibridación del mundo físico y digital	Sensórica en productos	Utilización de sensores en productos (o piezas en curso de fabricación) para convertir magnitudes físicas en datos.
	Sensórica en procesos	Utilización de sensores externos a las máquinas en procesos productivos para convertir magnitudes físicas en datos.
	Sistemas embebidos en productos	Dispositivos que incorporan capacidad de procesamiento, además de capacidad de detección o medición de variables físicas. Ajenos a las máquinas.
	Sistemas embebidos en procesos	Dispositivos que incorporan capacidad de procesamiento, además de capacidad de detección o medición de variables físicas. Ajenos a las máquinas.
	Robótica (colaborativa, avanzada, etc.) y automatización	Se engloba en esta tecnología tanto la robótica propiamente dicha como los sistemas automatizados programables, tipo CNC y similares, dado el nivel tecnológico del sector.
	Fabricación aditiva	Impresión 3D con cualquier finalidad: prototipos, muestras, productos, matrices, moldes, etc.
	Visión artificial	Visión utilizada en procesos productivos con diversos fines: defectos, posición, etc.
	Realidad aumentada, realidad virtual.	Uso de la RA con fines de adiestramiento, fines operativos o fines comerciales (relación con clientes, mktg, etc)
Conexión de la empresa con el consumidor	Simulación y virtualización productiva	Simuladores de algún tipo, incluso caseros tipo excel para hacer previsiones, simular resultados, etc.
	Redes sociales / Blogs	Incluye la utilización de cualquier tipo de red, con fines empresariales: obtener información de usuarios o clientes, información de productos, etc.
	Catálogo electrónico	Virtualización del catálogo para su difusión por Internet. Incluye como etapa básica el uso de software CAD 3D
Comunicación y tratamiento	Página web / App propia	Utilización de la web de forma activa, no sólo como escaparate de la empresa.
	Ciberseguridad	Dispone de un departamento TIC con personal especializado en estas tecnologías.

de datos	Computación avanzada en la nube (cloud computing)	Utiliza servicios cloud de algún tipo
	Conectividad y movilidad	Dispone de terminales móviles para desarrollar actividades operativas, en cualquier área: diseño, producción, distribución, comercial, etc.
	M2M	Dispone de algún tipo de comunicación, o red, que permita transferencia de datos entre máquinas, o entre productos y máquinas.
	Big Data	Realiza análisis de datos masivos, con objeto de detectar patrones, tendencias, etc.
Gestión intraempresa / interempresa	Soluciones de negocio	Utilización de ERP, MES, CRM, etc
	Soluciones de inteligencia	Análisis y correlación de datos, mediante software de BI
	Plataformas colaborativas	Uso de plataformas web colaborativas con diversas finalidades: diseño, logística, producción, proveedores, clientes, market place, etc.

Personas.

El segundo facilitador considerado en el modelo, es la existencia en la empresa de personal con capacidades y actitud adecuada para el proceso de transformación digital. Las competencias básicas para dicho proceso de transformación se agrupan en cuatro áreas

- a) Competencias digitales para el procesado de la información. Se trata de competencias referidas al uso y procesado de la información.

Competencia	Descripción
Comunicar información	Compartir información digital con otros en el trabajo
Crear información	Generar nuevos contenidos digitales y el conocimiento de la organización, integración, adopción y aplicación de la información digital
Aplicar la información	Usar la información en varios formatos digitales, efectiva y eficientemente para mejora las tareas del puesto de trabajo
Evaluar la información	Juzgar la calidad, la pertinencia, utilidad, validez y aplicabilidad de la información digital
Integrar información	Interpretar, analizar, resumir, comparar y contrastar, combinar, proponer cambios en la finalidad de informar y

	representación digitales
Organizar la información	Traducir, reestructurar, y proteger la información digital
Acceso a la información	Localizar, seleccionar y recuperar información digital
Determinar las necesidades de información	Reconocer, definir y articular las necesidades de información digital
Información de entrada	Identificar, reconocer, registrar y almacenar información digital para facilitar la recuperación y el uso

b) Competencias digitales instrumentales/técnicas. Referidas al conocimiento y habilidades en el uso de herramientas digitales. No todo el mundo las necesita, son necesarias según el desempeño exigido o puesto de trabajo al que se refieran, pueden identificarse competencias referidas a herramientas específicas. Constituyen así un prerrequisito para un buen desempeño digital en el puesto de trabajo.

Competencia	Descripción
Conocimiento y uso de equipos	Capacidad para interactuar con ordenadores, módems, y dispositivos digitales para realizar tareas de trabajo.
Conocimiento y uso de herramientas software	Capacidad de uso de software específico al puesto de trabajo y/o tareas
Uso de recursos en red	Entender el uso y aplicación de los recursos disponibles para el trabajo en red
Conocimiento aspectos legales y éticos	Capacidad para identificar los posibles riesgos legales y/o éticos de los datos y medios empleados
Programación	Habilidades y conocimiento de programación (si es requerida)
Aplicar medidas de seguridad en entornos digitales	Capacidad para proteger hardware, aplicaciones software, los datos y la información

c) Competencias transversales personales. Habilidades, capacidades y conocimientos no técnicos y ampliamente transferibles que combinadas con las competencias específicas ocupacionales digitales y técnicas contribuyen al aumento del rendimiento en el trabajo

Competencia	Descripción
Trabajo en equipo	Capacidad de trabajar activamente en la consecución de una meta común subordinando los intereses particulares a

	los objetivos del equipo
Adaptabilidad al cambio	Adaptarse a los cambios, modificando si es necesario la conducta para alcanzar nuevos objetivos, información o cambios del medio de origen externo o interno
Organización y planificación	Capacidad de determinar eficazmente las metas y prioridades de la tarea/área/proyecto, estipulando acciones plazos y recursos
Capacidad de gestión/liderazgo	Capacidad de alertar al grupo de necesidades de cambios
Iniciativa	Predisposición a emprender acciones, crear oportunidades, y mejorar resultados sin necesidad de requerimientos externos
Orientación a resultados	Habilidad de aspirar al logro de resultados positivos para la organización
Compromiso	Sentir como propios los objetivos
Aprendizaje continuo	Capacidad de buscar y compartir información útil para la resolución de situaciones
Pensamiento y Resolución de Problemas	Capacidad para aplicar pensamiento crítico y resolver problemas
Autoaprendizaje	Capacidad de aprender a aprender. Habilidades para la gestión de la carrera profesional

Desempeño Digital.

Se trata de un facilitador que hace referencia a la capacidad de la organización para extraer y gestionar la información relevante en cada uno de los procesos, analizarla de forma sistemática utilizando herramientas avanzadas, y hacerla llegar a cualquier punto de la cadena de valor donde sea útil o necesaria. Contempla: Información digital, Automatización y Conectividad. A continuación se muestra una tabla que recoge las capacidades de la organización consideradas en el modelo de evaluación.

Capacidad de la Organización	Descripción de la capacidad
Identificación de datos relevantes	Actividad metódica para identificar los datos generados en cada proceso y descartar aquellos cuya utilización, en principio, no se considera relevante a efectos de mejora en cualquier ámbito de la empresa.
Captura de datos	Plan de acción para desplegar la infraestructura requerida para obtener los datos desde sus fuentes. Incluye dispositivos físicos (sensores, etc) y elementos lógicos

	(software).
Filtrado y almacenamiento	Tratamiento previo de los datos recogidos para desechar los defectuosos, limitar la frecuencia de adquisición, etc, y seguidamente almacenamiento de datos en los dispositivos adecuados.
Análisis automatizado	Análisis sistemático de todos los datos recogidos para obtener conclusiones de diverso tipo.
Identificación de datos en sumideros/utilizadores	Actividad metódica para identificar los procesos o sistemas que necesitan utilizar los datos extraídos, o podrían utilizarlos con propósito de mejora.
Utilización de datos en los utilizadores	Uso efectivo de los datos en los puntos adecuados, obteniendo un beneficio claro por esta acción.

3.2.2.2. Facilitadores independientes.

El entorno de la empresa (marco político y financiero) supone un facilitador, que no depende de las características de una empresa, y que queda fuera de las acciones de la hoja de ruta en el proceso de transformación digital de una compañía.

4 Procesos y variables significativas en los sectores Madera-Mueble y Metalmecánico.

4.1 Procesos principales

De todos los procesos que se desarrollan en los sectores Madera-Mueble y Metalmecánico, se ha considerado representativos los indicados en la tabla siguiente.

PROCESO	TIPO DE PROCESO	MATERIAL	FUNGIBLE / UTILLAJE	MÁQUINA
Marcado	Preparación	Madera	Plantillas	
Tronzado	Mecanizado	Madera	Herramienta de corte	Tronzadora
Corte con forma	Mecanizado	Madera	Herramienta de corte	Sierra cinta
Aserrado	Mecanizado	Madera	Herramienta de corte	Sierra cinta
Cepillado	Mecanizado	Madera	Herramienta de corte	Cepilladura
Regruessado	Mecanizado	Madera	Herramienta de corte	Regruesso
Moldurado	Mecanizado	Madera	Herramienta de corte	Moldurera
Corte a medida	Mecanizado	Madera	Herramienta de corte	Escuadradora
Premontaje	Montaje	Madera/Tablero		
Fresado	Mecanizado	Madera/Tablero	Herramienta de corte	Tupi /CNC
Taladrado/Escopleado	Mecanizado	Madera/Tablero	Herramienta de corte	Taladro /Escoplo
Espigado mechonado	Mecanizado	Madera	Herramienta de corte	Espigadora
Torneado	Mecanizado	Madera	Herramienta de corte	Torno
Tallado	Mecanizado	Madera	Herramienta de corte	Copiadora
Lijado	Acabado	Madera/Tablero	Lija	Lijadora
Montaje	Montaje	Madera/Tablero		Prensa de armar
Barnizado	Acabado	Madera/Tablero	Barnices	Línea /Cabina
Embalado	Manual	Madera/Tablero	Embalaje (cartón, film)	Embaladora
Seccionado	Mecanizado	Tablero	Herramienta de corte	Seccionadora
Perfilado	Mecanizado	Tablero	Herramienta de corte	Perfiladora
Chapado de cantos	Mecanizado	Tablero	Herramienta de corte/Cantos	Chapadora
Troquelado	Conformado	Metal	Matriz de corte	Troqueladora
Embutición	Conformado	Metal	Matriz de embutición	Prensa de embutir
Torneado	Mecanizado	Metal	Herramienta de corte	Torno
Fresado	Mecanizado	Metal	Herramienta de corte	Fresa
Roscado tubo	Mecanizado	Metal	Herramienta de corte	Roscadora
Taladrado	Mecanizado	Metal	Herramienta de corte	Taladro
Electroerosión	Mecanizado	Metal	Hilo	Electroerosión
Corte al agua	Mecanizado	Metal	Agua	Corte al agua
Corte láser	Mecanizado	Metal	Láser	Corte láser
Corte plasma	Mecanizado	Metal	Plasma	Corte plasma
Oxicorte	Mecanizado	Metal	Oxígeno/Gas	Oxicorte
Corte con sierra	Mecanizado	Metal	Herramienta de corte	Sierra
Doblado	Conformado	Metal		Curvadora
Soldadura	Montaje	Metal	Electrodos	Maq Soldar
Desbarbado	Acabado	Metal		Maq Desbarbadora
Lijado	Acabado	Metal	Lija	Lijadora
Pulido	Acabado	Metal		Pulidora
Granallado	Acabado	Metal	Granalla	Granalladora
Pintado	Acabado	Metal	Pintura	Tunel pintura
Recubr. electrolíticos	Acabado	Metal	Metales/Prod. químicos diversos	Baños

La tabla muestra una visión simplificada de los procesos principales en ambos sectores, ya que se ha considerado innecesario explicar qué tipo de transformación realiza cada proceso, la

gama de materiales completa que se pueden procesar, las diferentes tecnologías y sus particularidades, las características de los distintos tipos de fungibles para cada proceso, etc.

Al ser procesos muy conocidos, especialmente entre los técnicos que están desarrollando el proyecto, se considera que no aporta nada abundar en este aspecto y haría excesivamente largo el entregable.

4.2. Influencia de las variables en la eficiencia de los procesos

4.2.1. Introducción: medición de la eficiencia a través del OEE

El concepto de OEE aparece como un KPI (Key Performance Indicator), o Indicador Clave de Desempeño asociado a un programa estándar de mejora de la producción. La ventaja del OEE frente a otras métricas es que mide, en un único indicador, todos los parámetros fundamentales en la producción industrial: la disponibilidad, el rendimiento y la calidad. Dicho concepto fue desarrollado en los años 90, y desde entonces ha sido aceptado como indicador de gestión para la medida y evaluación de la productividad de la planta.

El OEE está compuesto por tres parámetros que miden la disponibilidad (fracción de tiempo en la que el proceso está realmente disponible para producir), la calidad (fracción de piezas aceptables respecto al total) y el rendimiento (tasa de producción real frente a la que se podría alcanzar). Se expresa como producto de estos tres parámetros y refleja el porcentaje de eficiencia global del proceso o máquina.

$$OEE = \text{Disponibilidad} * \text{Rendimiento} * \text{Calidad}$$

Hay dos autores de referencia: Nakajima (1988) y De Groote (1995). La diferencia principal entre ambos está en la base de partida para calcular el nivel que se alcanza en cada uno de los factores. Nakajima utiliza como referencia el máximo teórico que un proceso podría alcanzar en condiciones ideales según sus especificaciones. De Groote utiliza como referencia los tiempos o las cantidades planificadas, y las cantidades realmente procesadas (para disponibilidad, rendimiento y calidad respectivamente)

	Nakajima (1988)	De Groote (1995)
Availability (A)	$\frac{\text{Loading time} - \text{downtime}}{\text{Loading time}}$	$\frac{\text{Planned production time} - \text{unplanned downtime}}{\text{Planned production time}}$
Performance (P)	$\frac{\text{Ideal cycle time} \times \text{output}}{\text{Operating time}}$	$\frac{\text{Actual amount of production}}{\text{Planned amount of production}}$
Quality (Q)	$\frac{\text{Input} - \text{volume of quality defects}}{\text{Input}}$	$\frac{\text{Actual amount of production} - \text{non-accepted amount}}{\text{Actual amount}}$
OEE	$(A) \times (P) \times (Q)$	$(A) \times (P) \times (Q)$

Table II.
Definitions of OEE variables

Figura 1 – Diferencias en el cálculo del OEE
(Fuente: C.J. Bamber)

Desde el punto de vista del proyecto, lo realmente relevante no es cómo se calcula el OEE, ya que se busca establecer índices relativos de mejora de la eficiencia, sino cómo afectan las variables de los procesos a cada uno de los factores empleados para su cálculo.

Bamber et al. (2003) proponen 4 categorías que agrupan las causas origen de las pérdidas, donde incluyen a la propia máquina, al material, al personal y a la programación del trabajo.

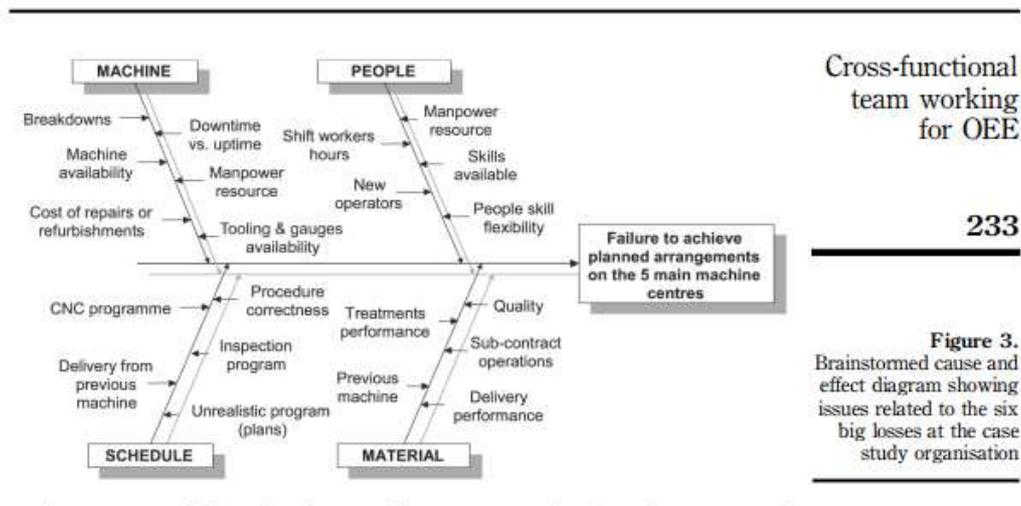


Figura 2 – Causas asignables a la pérdida de eficiencia en los procesos

(Fuente: C.J. Bamber)

En este sentido, se incluye un factor que tal y como está definido el OEE, no se toma en consideración: las pérdidas por “mala” programación de los trabajos de fabricación. Se añadiría una pérdida más que está relacionado con el indicador TEEP, que se define como sigue:

“TEEP es una métrica que muestra el rendimiento total de equipo basado en la cantidad de tiempo que el equipo está presente. OEE cuantifica la efectividad del equipo durante el tiempo en el que estaba programado su uso. TEEP mide la eficacia OEE contra el Tiempo de calendario, es decir: 24 horas al día, 365 días al año”. (Iannone and Nenni, 2015).

En cualquier caso, lo verdaderamente relevante es identificar aquellos factores que pueden originar pérdidas de eficiencia en los procesos, y sobre todo identificar las causas que los originan. Además de los cuatro factores de la figura anterior, cabe añadir uno que posiblemente sea específico de los sectores objetivo, especialmente en los procesos de acabado: las condiciones medioambientales. Por tanto, se van a considerar las variables relacionadas con los siguientes factores:

- Proceso (Máquina)
- Material (Producto procesado)
- Material (Producto añadido/Fungible)
- Personas
- Medio ambiente

4.2.2 Variables significativas relacionadas con la eficiencia productiva

Se han identificado las siguientes variables en cada uno de los grupos anteriores:

FACTOR	VARIABLE	OBSERVACIONES
Proceso - Máquina	Presión hidráulica	
	V giro herramienta	
	V avance pieza	
	Tiempo proceso	
	Intensidad corriente en vacío	Detección de funcionamiento anómalo
	Intensidad corriente en carga	Detección de funcionamiento anómalo
	Tensión entrada	Cálculo de potencia efectiva
	V giro motor ppal	
	V giro motor avance	
	Temperatura motor ppal	
	Presión aire entrada	
	Temperatura elemento calefactable	
	Nivel sonoridad	
	Nivel de aceite/lubricante	
	Sólidos en aceite	
	Consumo de fungible	
	Frecuencia ppal de vibración de máquina	
	Potencia de secado (UV)	En caso de secado con UV
	Velocidad secado (UV)	Velocidad de la línea UV
	Temperatura secado	En caso de secado con calor
Tiempo secado	En caso de secado con calor	
Material - Producto	Referencia de la pieza procesada	
	Material de la pieza	
	Calidad de la pieza	
	% Aprovechamiento (% Desperdicio)	
Material - Fungible	Material de la herramienta	
	Material aplicado	
	Temperatura	Del material aplicado
	Viscosidad	Del material aplicado
	Caudal	Del material aplicado
	Color	Del material aplicado
Medio ambiente	Temperatura ambiente	
	Humedad ambiental	
	Iluminación ambiente	
	Polvo o contaminantes	
Personal	Operador	

4.2.3 Análisis de la influencia de las variables. Conclusiones

Una vez están definidos los procesos relevantes y estimadas las variables que pueden afectar a cada proceso, se ha realizado el análisis de la influencia que cada una de las variables puede tener sobre cada proceso, considerando cada uno de los factores que influyen en la eficiencia del proceso: disponibilidad, calidad y rendimiento.

Como se indicó en la introducción, no es viable realizar un análisis objetivo de cómo afecta cada una de las variables a cada proceso y en cada factor de la eficiencia. Por ello, se ha decidido realizar un análisis subjetivo basado en el conocimiento y experiencia de los técnicos del Instituto. Al ser un análisis complejo por la cantidad de combinaciones posibles, se ha construido una aplicación informática que permite realizar una valoración subjetiva por parte de personal experto en los procesos de fabricación definidos.

La aplicación tiene el aspecto mostrado en la figura siguiente:

Figura 3 – Aplicación desarrollada para la valoración de las variables

Como puede apreciarse, tras seleccionar una Familia de procesos y un Proceso concreto, se selecciona una variable de la parte izquierda y se debe valorar su influencia en los tres factores de la eficiencia (Calidad, Disponibilidad y Rendimiento). El funcionamiento es extremadamente sencillo y cada usuario tiene su propia clave de acceso para realizar o retomar la evaluación en

cualquier momento, ya que es un proceso costoso. La evaluación ha sido realizada por 8 técnicos participantes en el proyecto.

En el apartado de resultados se han introducido diversas opciones de análisis, como se muestra en la figura siguiente.

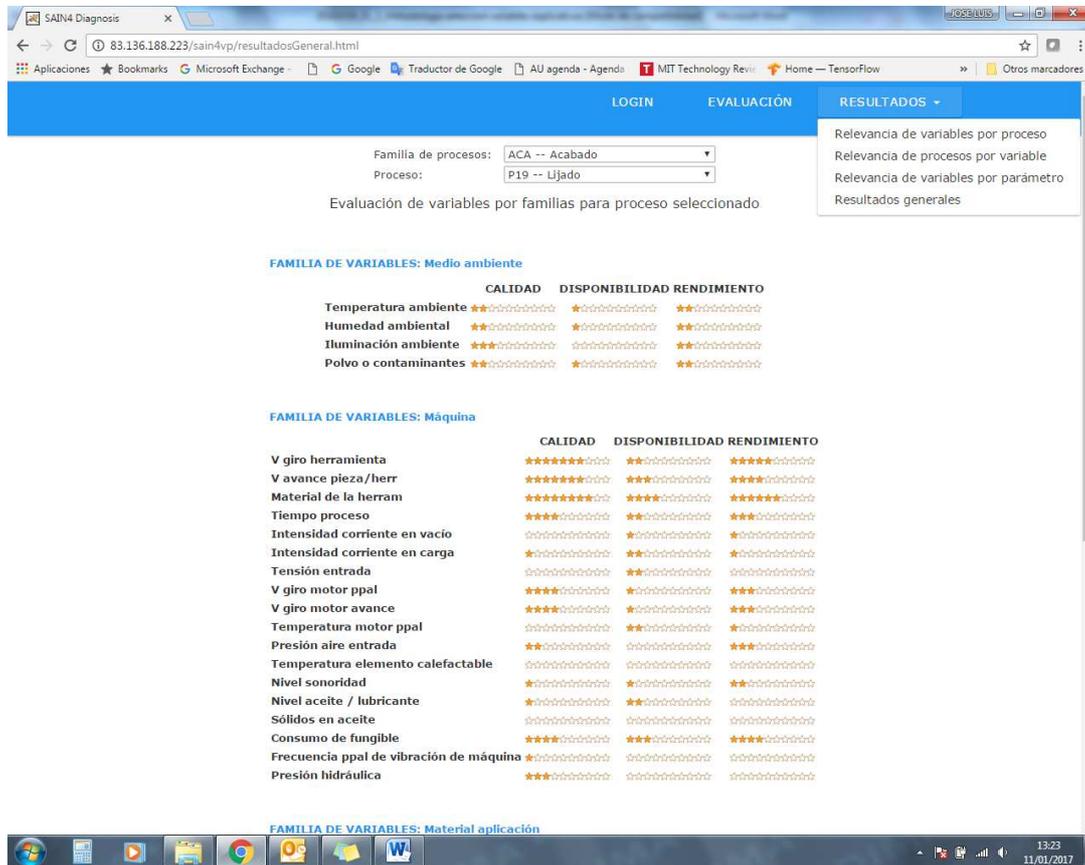


Figura 4 – Pantalla de resultados de la evaluación

En la tabla siguiente se muestra de forma resumida la valoración total obtenida por cada pareja Proceso-Variable en los tres factores de eficiencia considerados.

	V giro herramienta	V avance pieza/herr	Material de la herram	Tiempo proceso	Intensidad corriente en vacío	Intensidad corriente en carga	Tensión entrada	V giro motor ppal	V giro motor avance	Temperatura motor ppal
Marcado	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0
Tronzado	8	8	10	10	5	6	4	9	7	5
Corte con forma	6	6	7	8	4	7	4	6	7	3
Aserrado	7	7	6	6	4	7	6	8	8	4
Cepillado	9	8	8	6	6	8	7	8	8	6
Regruesado	8	9	9	6	5	7	4	9	10	4
Moldurado	10	9	10	6	4	7	6	7	7	5
Corte a medida	8	9	8	7	6	6	5	7	9	7
Premontaje	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0
Fresado	26	9	15	24	0	0	19	20	10	5
Taladrado escopleado	8	9	9	7	5	8	5	9	9	5
Espigado mechonado	8	7	7	7	5	4	4	6	6	5
Torneado	26	26	15	24	0	0	19	20	5	4
Tallado	7	5	6	4	4	4	4	6	5	6
Seccionado	8	6	7	4	4	6	4	6	6	3
Perfilado	8	7	6	6	5	6	5	6	7	7
Chapado de cantos	9	9	7	6	5	6	5	7	6	5
Taladrado	18	7	19	5	5	6	5	18	6	5
Lijado	7	8	10	7	6	18	12	18	18	20
Barnizado	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0
Montaje	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0
Embalaje	0	0	0	3	3	3	5	3	3	3
Pulido	7	8	10	7	0	0	0	0	0	0
Granallado	9	10	17	9	0	0	0	11	11	2
Pintado	13	13	24	7	0	0	0	13	13	0
Recubrimiento electrolítico	0	0	0	7	13	10	5	0	0	0
Troquelado	0	17	16	0	0	0	0	0	0	0
Embutición	0	13	16	0	0	0	0	0	0	0
Roscado tubo	0	11	13	0	0	0	0	0	0	0
Electroerosión	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Corte al agua	0	20	16	13	0	0	0	0	0	0
Corte láser	0	20	16	13	0	0	0	0	0	0
Corte plasma	0	20	17	12	0	0	0	0	0	0
Oxicorte	0	21	16	13	0	0	0	0	0	0
Corte con sierra	23	0	16	14	0	0	0	0	17	0
Doblado	0	0	12	19	0	0	0	20	23	0
Sodadura	0	0	0	20	0	0	27	0	0	0
Desbarbado	7	0	17	0	0	0	0	0	0	0

	Presión aire entrada	Temperatu ra elemento calefactabl e	Nivel sonoridad	Nivel aceite / lubricante	Sólidos en aceite	Consumo de fungible	Frecuencia ppal de vibración de máquina	Referencia de la pieza procesada	Material de la pieza	Calidad de la pieza
Marcado	0	0	0	0	0	0	0	7	18	22
Tronzado	8	0	4	7	4	3	5	6	4	4
Corte con forma	0	0	2	7	3	2	4	7	9	10
Aserrado	1	0	3	5	4	2	4	6	6	8
Cepillado	0	0	2	4	3	2	4	4	8	6
Regruesado	0	0	2	4	3	3	2	4	6	8
Moldurado	8	0	2	5	4	2	2	5	8	7
Corte a medida	9	0	2	5	4	0	4	9	11	10
Premontaje	14	7	0	6	3	0	0	8	9	11
Fresado	7	0	0	15	13	0	2	8	9	10
Taladrado escopleado	11	0	2	4	4	0	2	7	9	9
Espigado mechonado	7	0	2	3	2	0	4	8	10	10
Torneado	7	0	0	15	13	0	3	7	9	10
Tallado	0	0	1	4	3	0	1	11	15	15
Seccionado	7	0	2	5	4	2	3	6	11	10
Perfilado	10	0	2	5	5	0	4	4	11	10
Chapado de cantos	9	11	2	5	5	2	2	8	9	10
Taladrado	9	0	0	19	9	0	2	5	6	8
Lijado	6	0	2	2	0	19	4	14	2	18
Barnizado	7	8	0	0	0	0	0	6	11	11
Montaje	11	0	0	5	0	0	0	9	8	9
Embalaje	7	11	1	2	2	4	3	7	5	8
Pulido	8	0	0	0	0	4	3	7	2	12
Granallado	13	3	0	14	0	0	8	10	10	4
Pintado	7	14	0	14	0	24	0	10	6	3
Recubrimiento electrolítico	0	11	0	13	0	0	0	13	9	7
Troquelado	0	0	0	13	13	0	0	0	0	0
Embutición	0	0	0	13	13	0	0	0	0	0
Roscado tubo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Electroerosión	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Corte al agua	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6
Corte láser	0	0	0	0	0	0	0	0	15	6
Corte plasma	0	0	0	0	0	0	0	0	6	9
Oxicorte	0	0	0	0	0	0	0	0	6	8
Corte con sierra	0	0	0	14	0	0	0	0	13	12
Doblado	0	0	0	14	0	0	0	0	21	13
Sodadura	20	0	0	0	0	23	0	0	20	16
Desbarbado	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4

	% Aprovechamiento (% Desperdicio)	Material aplicado	Temperatura	Viscosidad	Caudal	Color	Potencia de secado (UV)	Velocidad secado (UV)	Temperatura secado	Tiempo secado	Temperatura ambiente
Marcado	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tronzado	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Corte con forma	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aserrado	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cepillado	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Regruessado	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Moldurado	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Corte a medida	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Premontaje	0	12	10	12	7	5	0	0	15	11	0
Fresado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
Taladrado escopleado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Espigado mechonado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Torneado	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
Tallado	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Seccionado	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Perfilado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Chapado de cantos	3	9	9	8	7	7	0	0	8	3	5
Taladrado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Lijado	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	5
Barnizado	0	7	7	7	7	10	17	14	7	7	17
Montaje	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Embalaje	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Pulido	0	2	9	3	0	3	0	0	0	0	8
Granallado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pintado	18	7	7	7	7	0	14	12	7	7	8
Recubrimiento electrolítico	0	10	7	7	7	0	13	0	7	7	0
Troquelado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Embutición	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Roscado tubo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Electroerosión	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Corte al agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
Corte láser	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
Corte plasma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
Oxicorte	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
Corte con sierra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Doblado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sodadura	0	22	23	0	0	0	0	0	0	0	3
Desbarbado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

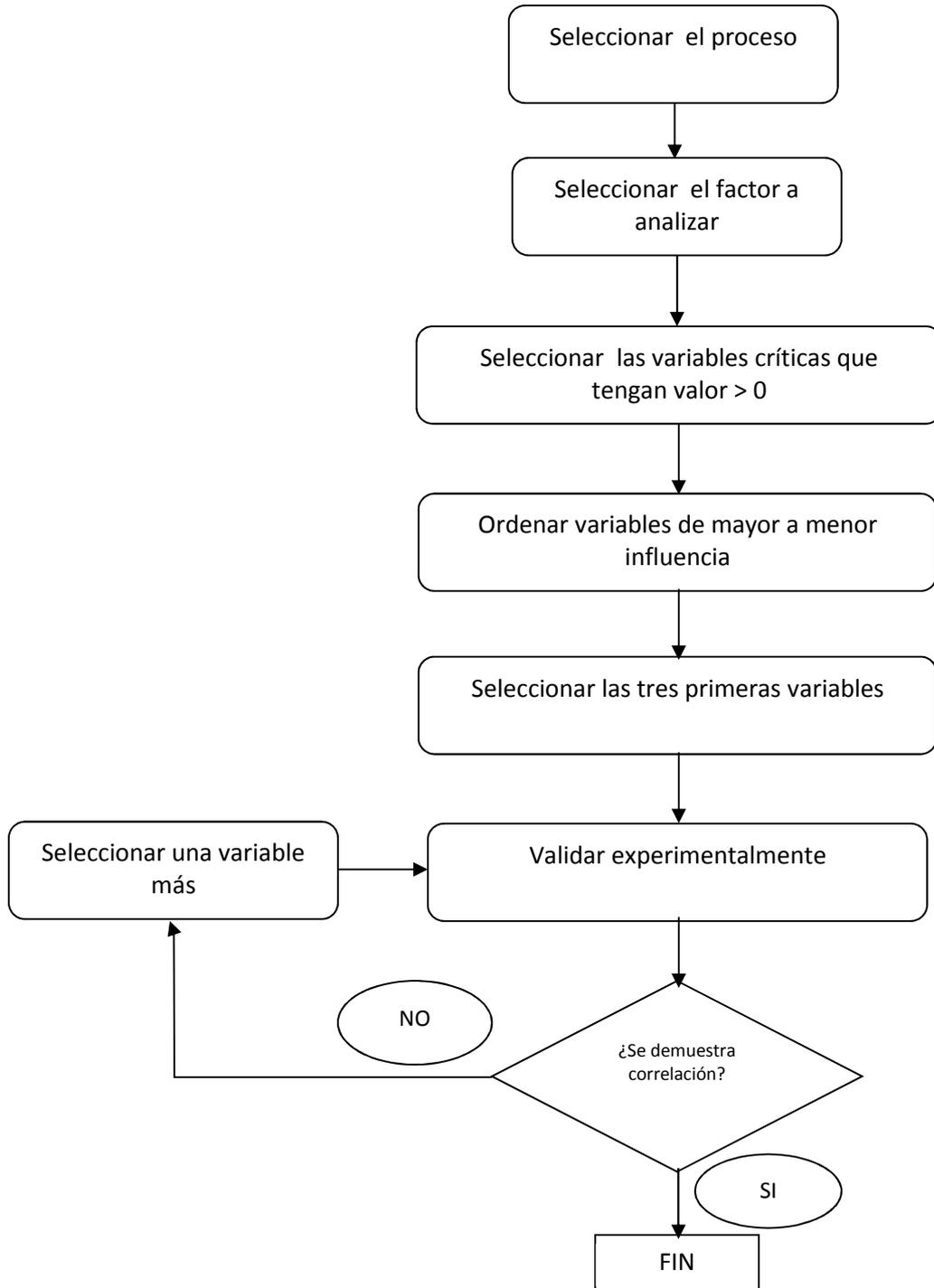
	Humedad ambiental	Iluminación ambiente	Polvo o contaminantes	Presión hidráulica
Marcado	0	0	0	0
Tronzado	0	0	1	0
Corte con forma	0	0	1	0
Aserrado	0	0	1	0
Cepillado	0	0	1	0
Regruesado	0	0	1	0
Moldurado	0	0	1	0
Corte a medida	0	3	1	0
Premontaje	0	5	1	6
Fresado	0	5	4	0
Taladrado escopleado	0	3	1	0
Espigado mechonado	0	3	1	0
Torneado	0	5	5	0
Tallado	6	3	1	0
Seccionado	1	3	1	0
Perfilado	2	3	1	0
Chapado de cantos	1	3	2	0
Taladrado	0	8	15	0
Lijado	8	0	2	10
Barnizado	7	15	7	5
Montaje	3	5	3	13
Embalaje	4	4	6	0
Pulido	7	0	2	10
Granallado	3	0	2	6
Pintado	7	8	7	0
Recubrimiento electrolítico	2	0	5	0
Troquelado	0	2	11	21
Embutición	0	2	11	0
Roscado tubo	0	6	9	0
Electroerosión	0	0	0	0
Corte al agua	6	2	11	0
Corte láser	6	1	13	0
Corte plasma	6	7	19	0
Oxicorte	6	2	13	0
Corte con sierra	0	6	9	0
Doblado	0	0	0	0
Sodadura	12	22	16	0
Desbarbado	0	8	3	0

Del análisis de estos resultados se puede extraer las siguientes conclusiones:

- En general, las variables que más afectan a los procesos productivos en el ámbito de los factores considerados son:

-
- Las relacionadas con la pieza o producto procesado (referencia, material y calidad previa)
 - La presencia de polvo o elementos contaminantes en el ambiente
 - El nivel de lubricante
 - La velocidad de avance de la pieza
 - La velocidad de giro de la herramienta
 - El material de la herramienta
 - El tiempo de proceso

Para utilizar estos resultados en la selección de variables críticas, se debe seguir el siguiente procedimiento:



5 Referencias bibliográficas

- Bechtold, J., Kern, A., Lauenstein, C., & Bernhofer, L. (2014). Industry 4.0-The Capgemini
- Boston Consulting Group (2015)“Time to Accelerate in the Race Toward Industry 4.0”
- Ebner, G., & Bechtold, J. (2012). “Are Manufacturing Companies Ready to Go Digital?”. Capgemini Consulting White Paper. Available online: (accedido 08.06. 2016.).
- http://www.elara.es/documentos/TECNALIA_Industry%204.0_IVJornada%20de%20Productividad_Elara.pdf
- Impuls (2015): Industry 4.0 Readiness Online Self-Check for Businesses
- Roland Berger (2015). The digital transformation of industry
- Nakajima, S. (1988). Introduction to TPM: Total Productive Maintenance. (Translation). *Productivity Press, Inc., 1988,, 129.*
- De Groote, P. (1995). Maintenance performance analysis: a practical approach. *Journal of Quality in Maintenance Engineering, 1(2), 4-24.*
- C.J. Bamber (2003). Cross- functional team working for overall equipment effectiveness (OEE). *Journal of Quality in Maintenance Engineering. Vol. 9 No. 3, 2003. pp. 223-238*